



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR AGROFORESTERIE

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE : 2020-2021

N° D'ORDRE : 041

CANDIDAT

Nom : KOFFI

Prénom : Konan Jean Mathias

THESE DE DOCTORAT

Mention : Agriculture et Foresterie Tropicale

Spécialité : Agro-physiologie

**Estimation de la maturité physiologique de la
mangue et du rendement du verger de
manguier (*Mangifera indica* L., variété 'Kent')
au nord de la Côte d'Ivoire : vers la mise en
place d'un modèle de prévision de récolte**

JURY

Président : M. KOUADIO Yatty Justin, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Co-Directeurs : M. SORO Dogniméton, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé
M. N'DA ADOPO Achille, Maître de recherche,
Centre National de Recherche Agronomique

Rapporteur : M. AYOLIE Koutoua, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé

Examineurs : Mme TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé

M. Emile FAYE, Chercheur, Centre de Coopération
Internationale en Recherche Agronomique pour le
Développement

Soutenu publiquement
le : 21 décembre 2021

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	vii
AVANT-PROPOS	viii
REMERCIEMENTS	ix
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	xii
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES ANNEXES	xvii
INTRODUCTION.....	1
Première partie : GENERALITES.....	5
Chapitre 1 : Généralité sur le manguiers	6
1.1. Origine et distribution géographique.....	6
1.1.1. Origine.....	6
1.1.2. Distribution géographique.....	6
1.2. Taxonomie.....	7
1.3. Description botanique	7
1.3.1. Appareil végétatif aérien	7
1.3.2. Appareil racinaire	10
1.3.3. Appareil reproducteur	10
1.3.4. Fruit	12
1.4. Ecologie.....	14
1.4.1. Climat	14
1.4.2. Sol.....	14
1.5. Cycle phénologique.....	15
1.6. Physiologie post-récolte de la mangue.....	15
1.7. Qualité nutritionnelle et chimique de la mangue.....	16
1.8. Marché de la mangue dans le monde	17
1.9. Filière mangue en Côte d'Ivoire.....	18

1.9.1. Zone de production.....	18
1.9.2. Variétés cultivées	18
1.9.2.1. Variété ‘Amélie’.....	18
1.9.2.2. Variété ‘Kent’.....	18
1.9.2.3. Variété ‘Keitt’	19
1.9.2.4. Autres variétés.....	19
1.9.3. Exportations	20
1.9.4. Caractéristiques des vergers de manguier	20
1.9.5. Importance économique de la mangue.....	22
Chapitre 2 : Généralité sur la maturité et le rendement en culture fruitière.....	23
2.1. Facteurs impliqués dans la maturité des fruits	23
2.2. Estimation de la maturité.....	24
2.2.1. Critères morphologique et physiologique de la maturité	24
2.2.2. Critères physico-chimiques de la maturité	24
2.2.3. Estimation non-destructive de la maturité de la mangue	25
2.2.3.1. Fluorescence chlorophyllienne.....	25
2.2.3.2. Spectrométrie proche infrarouge	25
2.2.3.3. Analyse d’image.....	26
2.3. Estimation du rendement des arbres fruitiers	27
2.3.1. Facteurs du rendement	27
2.3.1.1. Architecture de l’arbre	27
2.3.1.2. Irrégularité de production et Asynchronismes	29
2.3.1.3. Age des arbres	30
2.3.1.4. Densité de plantation	31
2.3.1.5. Conditions climatiques	31
2.3.1.6. Pratiques culturales	32
2.3.2. Méthodes d’estimation du rendement	33
2.3.2.1. Estimation empirique du rendement	33

2.3.2.2. Estimation du rendement par la modélisation	34
2.3.2.3. Estimation du rendement par analyse d'image	34
2.3.2.3.1. Détection des fruits dans des images d'arbres.....	34
2.3.2.3.2. Deep learning et analyse d'image	36
2.3.2.3.3. Mesure de la structure des arbres par drone	38
Deuxième partie : MATERIEL ET METHODES	39
Chapitre 3 : Zone d'étude.....	40
3.1. Situation géographique.....	40
3.2. Climat.....	41
3.3. Hydrographie.....	41
3.4. Végétation et relief.....	41
3.5. Sol.....	42
3.6. Population.....	42
3.7. Activités agricoles	42
Chapitre 4 : Matériel et méthodes	44
4.1. Matériel	44
4.1.1. Matériel végétal.....	44
4.1.2. Matériel technique.....	44
4.2. Méthodes	46
4.2.1. Détermination d'un intervalle de temps entre la floraison et la récolte pour estimer la maturité physiologique de la mangue de la variété 'Kent'.....	46
4.2.1.1. Echantillonnage des fruits	46
4.2.1.2. Mesures morpho-physiques effectuées sur les mangues.....	46
4.2.1.2.1. Evaluation de la couleur de l'épiderme de la mangue.....	46
4.2.1.2.2. Morphologie des mangues	47
4.2.1.2.3. Volume et masse volumique des mangues.....	47
4.2.1.2.4. Test de flottaison des mangues	48
4.2.1.2.5. Temps de mûrissement, taux de perte de masse et aspect de la peau des mangues.	49

4.2.1.3. Mesures physico-chimiques des mangues.....	50
4.2.1.3.1. Teneur en sucres solubles à la récolte et après le mûrissement.....	50
4.2.1.3.2. Taux de matière sèche à la récolte et après le mûrissement.....	50
4.2.2. Développement d'un outil d'estimation du rendement du manguier à l'échelle de l'arbre par analyse d'image assistée par modèle.....	51
4.2.2.1. Sélection des vergers de manguiers	51
4.2.2.2. Collecte de données.....	54
4.2.2.2.1. Prise d'image pour le dénombrement des fruits de l'arbre	54
4.2.2.2.2. Mesure des dimensions des arbres	54
4.2.2.3. Détection de mangues par le réseau de neurones (Faster R-CNN).....	56
4.2.2.3.1. Entraînement et paramétrage du réseau.....	56
4.2.2.3.2. Evaluation des performances du réseau de neurones	57
4.2.2.4. Facteurs susceptibles d'impacter les performances du réseau de neurones	58
4.2.2.4.1. Structure des arbres	58
4.2.2.4.2. Nombre de fruits annotés dans l'image.....	58
4.2.2.5. Calibration de modèles correctifs pour l'estimation de la production des arbres	59
4.2.2.5.1. Développement des modèles	59
4.2.2.5.2. Critères d'évaluation des modèles.....	60
4.2.3. Adaptation d'une stratégie d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger.....	61
4.2.3.1. Cartographie des vergers et détermination de la structure des arbres	61
4.2.3.2. Estimation de la production des vergers	62
4.2.3.3. Description et évaluation des stratégies d'échantillonnage d'arbres.....	62
4.2.3.3.1. Stratégies d'échantillonnage d'arbres	63
a. Echantillonnage aléatoire simple.....	63
b. Echantillonnage lié à la contrainte de distance	64
c. Echantillonnage régulier.....	64
d. Echantillonnage par groupe de production.....	64
4.2.3.3.2. Evaluation des méthodes d'échantillonnage	65

4.2.4. Analyses statistiques des données	66
Troisième partie : RESULTATS ET DISCUSSION.....	67
Chapitre 5 : Détermination d'un intervalle de temps entre la floraison et la récolte pour estimer la maturité physiologique de la mangue de la variété 'Kent'	68
Introduction	68
5.1. Résultats	68
5.1.1. Caractérisation morphologique et physique des mangues	68
5.1.2. Test de flottaison, densité et aspect des mangues.....	69
5.1.3. Temps de mûrissement et perte de masse des mangues	70
5.1.4. Caractérisation physico-chimique des mangues.....	72
5.2. Discussion	73
5.2.1. Caractéristiques morphologique et physique des mangues	73
5.2.2. Aspect de la peau, perte de masse et temps de mûrissement	73
5.2.3. Teneur en sucre et matière sèche au cours du mûrissement des mangues	74
Conclusion partielle.....	76
Chapitre 6 : Développement d'un outil d'estimation du rendement du manguier à l'échelle de l'arbre par analyse d'image assistée par modèle.....	77
Introduction	77
6.1. Résultats	77
6.1.1. Estimation de la production à l'échelle de l'arbre par analyse d'image	77
6.1.1.1. Description des performances du réseau Faster R-CNN.....	77
6.1.1.2. Effet de la structure de l'arbre et du nombre de fruits annotés par arbre sur la performance du réseau	79
6.1.2. Modèles correctifs pour l'estimation de la production des arbres	82
6.1.3. Production des arbres en nombre de fruits	83
6.1.4. Production de fruits par localité	85
6.1.5. Effet de la structure de l'arbre sur sa production	86
6.2. Discussion	87
6.2.1. Production du manguier selon l'analyse d'image	87

6.2.2. Facteurs susceptibles d'impacter les performances du Faster R-CNN	88
6.2.3. Modèle correctif pour l'estimation de la production de l'arbre	89
6.2.4. Facteurs de variabilité de la production individuelle des arbres	90
Conclusion partielle.....	92
Chapitre 7 : Adaptation d'une stratégie d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger	93
Introduction	93
7.1. Résultats	93
7.1.1. Rendement du verger	93
7.1.2. Efficacité des méthodes d'échantillonnage d'arbres	95
7.1.3. Méthodes d'échantillonnage retenues pour chaque verger	96
7.1.3.1. Verger V1	96
7.1.3.2. Verger V7	98
7.1.3.3. Verger V19	99
7.2. Discussion	101
7.2.1. Variabilité de production entre les vergers.....	101
7.2.2. Méthodes d'échantillonnage d'arbres	102
7.2.3. Méthode d'échantillonnage retenue pour les trois vergers.....	103
Conclusion partielle.....	104
DISCUSSION GENERALE.....	106
CONCLUSION GENERALE, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	109
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	112
ANNEXES	
PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES REALISEES PENDANT LA THESE	
RESUME	

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mon père, feu KONAN Koffi et à ma mère, feue KOUAKOU Akissi. Grâce à vous, je suis ce que je suis aujourd'hui. Malheureusement, le destin ne nous a pas laissé le temps pour profiter de ce bonheur ensemble ;

À mon grand-frère KOFFI Kouakou, mon conseiller et second père, qui m'a toujours dit de prioriser les études. Rien au monde ne vaut les efforts énormes que tu as consenti pour mon éducation et la réussite de ce travail ;

A mes frères, KOFFI Jean Baptiste, KOFFI Nestor ;

A mes sœurs KOFFI Pauline, KOFFI Florence et KOFFI Akissi ;

Vos prières et conseils m'ont été d'une grande utilité.

A ma très bien aimée KOUASSI Hadassa pour son soutien inestimable ;

A mon fils KOFFI Mienmo Christ Elysée ;

Je vous aime bien.

AVANT-PROPOS

Ce travail a été conduit à la Station de Recherche de Lataha, Korhogo, grâce au partenariat existant entre l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa (Côte d'Ivoire) et le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) d'une part et entre le CNRA et le Centre International en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad) d'autre part. Elle a été réalisée dans le cadre du Contrat de Désendettement et Développement (C2D), volet recherche scientifique, liant la Côte d'Ivoire et la France. Dans ce cadre, le CNRA et le Cirad sont impliqués en coopération, dans un projet de recherche intitulé « Projet C2D/Fruits et Maraîchages » dont le lancement a eu lieu en février 2018 à Korhogo. Ce projet vise l'amélioration de la productivité et de la qualité des productions fruitières et maraîchères en Côte d'Ivoire, sous des contraintes environnementales et commerciales. L'aspect mangue du volet Fruits porte sur des activités de mise au point de méthodes de lutte intégrée contre les mouches des fruits, l'antracnose et la bactériose et d'élaboration d'une méthode de prévision de sa récolte. Ce travail concerne le point « Prévision de récolte de la mangue ».

REMERCIEMENTS

Cette thèse de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) a été réalisée en cotutelle avec le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA). Elle a bénéficié du soutien du centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad). Mes premiers mots de remerciements sont adressés aux premiers responsables de ces trois institutions à savoir :

- Mme TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Professeur Titulaire, Présidente de l'UJLoG de Daloa, pour avoir autorisé l'exécution de ce travail ;
- M. YTE Wongbé, Directeur de Recherches, Directeur du CNRA, pour avoir permis que sa structure soit partie prenante de cette thèse ;
- M. Michel EDDI, Directeur Général du Cirad, pour avoir permis l'implication des chercheurs du Cirad dans la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de :

- M. KONE Tidiani, Professeur Titulaire, Vice-Président de l'UJLoG, Chargé de la Pédagogie, de la Vie universitaire, de la Recherche et de l'Innovation Technologique, pour avoir été toujours attentifs à nos préoccupations et pour ses conseils ;
- M. AKAFFOU Doffou Sélastique, Professeur Titulaire, Vice-Président de l'UJLoG, Chargé de la Planification, de la Programmation et des Relations Extérieures pour ses encouragements et pour son implication depuis 2017 dans la réalisation de ce travail ;
- Mme TONESSIA Dolou Charlotte, Maître de Conférences, Directrice de l'UFR Agroforesterie de l'UJLoG, pour ses conseils et encouragements et surtout, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire ;
- M. FONDIO Lassina, Maître de Recherche, Directeur Régional du CNRA de Korhogo, pour m'avoir accueilli dans les locaux de sa direction. Merci pour votre immense implication, votre suivi quotidien et vos remarques pertinentes qui ont permis le bon déroulement de ce travail ;
- Mme DJIDJI Andé Hortense, Directrice de la Station de recherche du CNRA de Lataha, pour avoir été toujours présente à mes côtés pour répondre à mes soucis et difficultés. Merci maman, du plus profond de mon cœur.

Ce mémoire n'aurait pu être réalisé sans le soutien moral, financier, matériel et la disponibilité de deux personnes de bonnes volontés. Ce sont :

- M. SORO Dogniméton, Maître de Conférences à l'UJLoG, et co-Directeur de cette thèse. Je vous remercie pour votre disponibilité. Vos conseils avisés, votre implication dans ce travail ainsi que vos remarques pertinentes ont permis d'enrichir mes compétences et d'approfondir mes recherches pour la réussite de ce travail ;

- M. N'DA ADOPO Achille, Maître de Recherche, ex. Chef du Programme Anacarde, Mangue, Papaye (AMP) du CNRA et co-Directeur de ce travail. Je vous suis reconnaissant pour tous les efforts que vous avez consentis pour me transmettre votre expérience et votre vécu du terrain, mais également votre capacité à surmonter les problèmes rencontrés sur le terrain. Merci pour votre disponibilité, vos conseils rédactionnels et méthodologiques et surtout, pour le « beurre » venant d'exportateurs et d'importateurs de mangue dont vous m'avez fait bénéficier durant ces travaux.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de M. KOUADIO Yatty Justin, Professeur Titulaire, pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury chargé d'évaluer ce travail.

Je remercie également M. AYOLIE Koutoua, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire d'Amélioration de la Production Agricole, pour avoir accepté d'être le rapporteur de cette thèse. Mes sincères remerciements à M. Emile FAYE, chercheur au Cirad, pour son soutien scientifique, technique et administratif qui m'a permis de bénéficier d'un ordinateur Cirad, d'un séjour scientifique au Cirad de Bassin Plat, à Saint Pierre sur l'Île de La Réunion et surtout, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je tiens à remercier M. KONATE Ibrahim, Maître de Conférences à l'UJLoG pour l'opportunité qu'il m'a donnée d'effectuer mon stage de Master au CNRA en 2017. Ses conseils et encouragements ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens également à remercier M. KOUAKOU Charles Konan, Chargé de recherche au CNRA, Chef du Programme Anacarde Mangue Papaye (AMP) du CNRA, pour son suivi et ses remarques pertinentes.

Je ne saurais oublier l'équipe de recherche du programme AMP de la station de Lataha, à savoir Mme KONAN Amenan Jacky, M. DJAHA Akadié Jean-Baptiste, M. DOGA Dabé, M. ADIKO Yves Olivier, M. MINHIBO Magloire Yves, M. COULIBALY Salam et M. DOSSO Moussa, pour leurs conseils et encouragement.

Je tiens à remercier sincèrement M. Julien SARRON, chercheur au Cirad, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et sa contribution à la réalisation des traitements et analyses de données.

Je remercie M. Philippe BORIANNE, chercheur au Cirad, qui a accepté de travailler sur la mise en place des réseaux de neurones pour la Côte d'Ivoire et pour sa grande contribution dans la construction des outils d'analyse d'images.

Je remercie également M. Éric MALEZIEUX, chercheur au Cirad, pour ses remarques pertinentes et ses orientations constructives qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Mes sincères remerciements à M. KOUAME Kan Benjamin, Maître de conférences à l'UJLoG, pour ses encouragements et conseils avisés.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de Mlle YAO Vanessa, M. OUATTARA Sinali, M. LEKI Konan Bertrand Antoine, M. N'Goran Claude François, M. KOFFI Patrick et M. COULIBALY Kolo, qui m'ont donné de « bons coups de mains ». Je vous remercie du fond du cœur pour votre appui technique inestimable sur le terrain.

Toute ma reconnaissance à M. COULIBALY Adama et M. DOBO Bi Zan Alexis, pour la bonne ambiance et les services rendus tout au long des travaux.

Je remercie également tous les producteurs de mangues qui ont mis leurs vergers à disposition pour la réalisation de cette étude.

J'exprime toute ma reconnaissance à M. KOUASSI Valentin et à sa famille pour m'avoir accueilli pendant mon stage à Korhogo.

Je remercie très chaleureusement Mlle N'GUESSAN Martine, M. AMANI Kouadio, M. KOUAME Alfred, M. KOUADIO Jean Olivier, M. M'BRA Hermann, M. BISSAHOUA Armel, M. KOUADIO Didier Marius, M. KONAN Yao Quevin, M. KOFFI Franck et M. KLA Fabrice Atchélo, pour leur amitié sincère.

Je tiens enfin à remercier toutes les personnes que je n'ai pas citées et qui m'ont soutenu durant la réalisation de ce travail.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AMP	: Anacarde Mangue Papaye
ANOVA	: Analyse de la variance
AT	: Acidité Totale
CBI	: Centre pour la Promotion des Importations
CHM	: Modèle de Hauteur de Canopée
Cirad	: Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
CNN	: Convolutional Neural Network (réseau de neurones convolutifs)
CNRA	: Centre National de Recherche Agronomique
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FAOSTAT	: Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (Base de données statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
Faster R-CNN	: Faster Region Based Convolutional Neural Networks (Réseau de neurones convolutifs à base de régions plus rapides)
Fm	: Fluorescence maximale
FN	: Faux Négatifs
Fo	: Fluorescence minimale
FP	: Faux Positifs
Fv	: Fluorescence variable
GPS	: Global Positioning System (Système de positionnement global)
Jaf	Jour après floraison
KNN	: k-nearest neighbours (K plus proches voisins)
LiDAR	: Light Detection And Ranging (Détection et estimation de la distance par la lumière)
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
MS	: Matière Sèche
Mt	: Millions de tonnes
PACIR	: Programme d'Appui au Commerce et à l'Intégration Régionale pour la Côte d'Ivoire
PIB	: Produit Intérieur Brut
R ²	: Coefficient de détermination
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat

RMSE	: Erreur Quadratique Moyenne
RVB	: Rouge-Vert-Bleu
SfM	: Structure-from-Motion (Structure acquise à partir d'un mouvement)
SIIM	: Société Internationale d'Importation
SPiR	: Spectroscopie Proche Infrarouge
SVM	: Support Vector Machine (Machines à vecteurs de support)
TE	: Taux d'erreur
TSS	: Teneur en Sucres Solubles
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle (Véhicule aérien sans humain à bord)
UC	: Unité de Croissance
UE	: Union Européenne
UJLoG	: Université Jean Lorougnon Guédé
VP	: Vrais Positifs

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	: Composition chimique et valeur nutritionnelle de la pulpe de mangue mûre.....	17
Tableau II	: Description des vergers sélectionnés.....	53
Tableau III	: Caractéristiques morphologiques et physiques des mangues.....	69
Tableau IV	: Caractéristiques physicochimiques de la pulpe de mangue.....	72
Tableau V	: Détections et performances du réseau sur un total de 29 000 fruits repérés et annotés.....	78
Tableau VI	: Comparaison des méthodes de comptage de mangue dans l'arbre....	82
Tableau VII	: Comparaison des trois modèles correctifs développés pour estimer le nombre de fruits.....	83
Tableau VIII	: Statistique descriptive de la production des arbres en nombre de fruits.....	84
Tableau IX	: Statistique descriptive du taux de charge en fruits des arbres.....	85
Tableau X	: Statistique descriptive de la production de fruits par arbre et par localité.....	86
Tableau XI	: Caractéristiques de la production estimée en nombre de fruits dans les trois vergers.....	94
Tableau XII	: Taux d'erreur (TE) et production estimée de chaque méthode d'échantillonnage dans les trois vergers.....	96
Tableau XIII	: Taux d'erreur (TE) et production estimée selon la méthode et l'intensité d'échantillonnage dans le verger V1.....	97
Tableau XIV	: Taux d'erreur (TE) et production estimée selon la méthode et l'intensité d'échantillonnage dans le verger V7.....	99
Tableau XV	: Taux d'erreur (TE) et production estimée selon la méthode et l'intensité d'échantillonnage dans le verger V19.....	100

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Manguier, variété ‘Kent’ en pleine fructification.....	8
Figure 2	: Modèle architectural chez le manguier.....	9
Figure 3	: Unité de croissance avec le détail de la position des feuilles adultes.....	9
Figure 4	: Inflorescence de manguier, variété ‘Kent’.....	11
Figure 5	: Fleurs de manguier, variété ‘Irwin’.....	11
Figure 6	: Coupe longitudinale montrant les différentes parties de la mangue.....	12
Figure 7	: Croissance des mangues au cours du temps.....	13
Figure 8	: Principales variétés de mangues exportées par la Côte d’Ivoire.....	20
Figure 9	: Verger de manguier de la variété ‘Kent’.....	21
Figure 10	: Variabilité interspécifique de l’architecture du pommier.....	28
Figure 11	: Phénomènes d’asynchronisme et d’alternance chez le manguier, variété ‘Kent’.....	30
Figure 12	: Architecture simplifiée des réseaux de neurones convolutifs	35
Figure 13	: Comparaison entre un neurone artificiel et un neurone biologique.....	37
Figure 14	: Structure schématique des neurones artificiels	37
Figure 15	: Localisation des vergers sélectionnés pour l’étude dans la région du Poro.....	40
Figure 16	: Matériel végétal utilisé.....	44
Figure 17	: Mangues étiquetées et conservées pour le mûrissement	47
Figure 18	: Grille d’évaluation de la couleur de l’épiderme de la mangue ‘Kent’.....	47
Figure 19	: Mesures morpho-physiques des mangues	48
Figure 20	: Test de flottaison des mangues.....	49
Figure 21	: Mangues mûres, variété ‘Kent’.....	49
Figure 22	: Mangue sectionnée et pulpe découpée, variété ‘Kent’.....	51
Figure 23	: Répartition des vergers sélectionnés dans la région du Poro.....	52
Figure 24	: Vue aérienne d’un verger avec les arbres échantillonnés.....	55
Figure 25	: Prise d’images pour le suivi de la production des arbres	55
Figure 26	: Annotations des mangues et sortie des coordonnées et des dimensions des boîtes englobantes.....	57
Figure 27	: Comptage visuel des mangues dans l’arbre avant la récolte.....	60
Figure 28	: Drone et commande de pilotage.....	62
Figure 29	: Echantillonnage aléatoire simple d’arbres dans un verger.....	63
Figure 30	: Echantillonnage aléatoire d’arbres lié à une distance de 15 m.....	64

Figure 31	: Echantillonnage d'arbres par groupe de production	64
Figure 32	: Pourcentage de mangues flottantes et à épiderme ridé en fonction des quatre dates de récolte.....	70
Figure 33	: Temps moyen de mûrissement des mangues en fonction des quatre dates de récolte.....	71
Figure 34	: Perte moyenne de masse des mangues en fonction des quatre dates de récolte.....	71
Figure 35	: Quelques erreurs de détection du réseau sur les images de manguiers.....	78
Figure 36	: Détection de mangues dans une image de manguiers par le réseau.....	78
Figure 37	: F1-score du réseau de neurones Faster R-CNN obtenus pour les 21 vergers de l'étude	79
Figure 38	: Corrélations entre les performances du réseau et les variables de structure des arbres.....	80
Figure 39	: Performances du réseau en fonction du nombre de fruits annotés dans l'arbre..	81
Figure 40	: Arbre de gros volume avec peu de fruits annotés.....	81
Figure 41	: Régression linéaire entre le nombre réel de fruits comptés et le nombre de fruits détectés.....	83
Figure 42	: Distribution de la production des 230 arbres en 2019 et 2020.....	84
Figure 43	: Corrélations entre la structure de l'arbre et sa production.....	87
Figure 44	: Distribution de la production des arbres par verger.....	94
Figure 45	: Taux d'erreur (TE) en fonction de l'intensité et de la méthode d'échantillonnage pour les trois vergers.....	95
Figure 46	: Taux d'erreur (TE) en fonction de l'intensité d'échantillonnage dans le verger V1.....	97
Figure 47	: Taux d'erreur (TE) en fonction de l'intensité d'échantillonnage dans le verger V7.....	98
Figure 48	: Taux d'erreur (TE) en fonction de l'intensité d'échantillonnage dans le verger V19.....	100

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fonctionnement simplifié de l’outil SoYield mangue

Annexe 2 : Enquête sur les besoins des futurs utilisateurs de l’application numérique
SoYield mangue

Annexe 3 : Quelques variétés de la collection manguier de la Station de Recherche
CNRA de Lataha

Annexe 4 : Vue aérienne de la collection manguier de la Station de recherche fruitière
du CNRA de Lataha

INTRODUCTION

Le manguiier (*Mangifera indica* L.) est l'une des principales cultures fruitières au monde. Il occupe le 6^{ème} rang des fruits produits dans le monde avec 56 millions de tonnes derrière les agrumes, les bananes, les pastèques, les pommes et le raisin (Gerbaud, 2021 ; FAO, 2019). En Afrique de l'Ouest, la mangue offre de nombreux atouts nutritifs et représente une source de revenus essentiel (Gerbaud, 2018). La mangue tient une place importante dans le développement économique des zones de production. La Côte d'Ivoire est l'un des principaux pays producteurs de mangues en Afrique de l'Ouest. La production nationale est estimée à 150 000 tonnes (t) et est concentrée dans le nord du pays. Le pays exporte actuellement environ 30 000 t de mangues par an, faisant de lui le 1^{er} pays ouest africain exportateur, suivi du Mali et du Sénégal et le 3^{ème} fournisseur mondial sur le marché européen après le Brésil et le Pérou (Galán, 2013 ; Mieu, 2017). Cette spéculation représente le 2^{ème} fruit exporté par le pays après la banane et contribue à 4 % du Produit Intérieur Brut (PIB) national. La banane, la mangue et l'ananas contribuent à hauteur de 8 à 10 % du PIB agricole. Chaque année, la campagne d'exportation de mangues rapporte environ 7 milliards de franc CFA aux producteurs ivoiriens (Mieu, 2017). L'exportation ivoirienne concerne essentiellement les mangues des variétés 'Kent', 'Keitt' et 'Amélie' (Touré, 2012). La variété 'Kent' est la plus privilégiée pour l'exportation grâce à ses qualités organoleptiques et physicochimiques, en particulier sa faible teneur en eau qui lui confère une durée de vie commerciale conséquente.

Malgré l'importante place qu'occupe la filière mangue dans l'économie ivoirienne, sa performance est entravée par des problèmes majeurs tels que les pertes de production dues à la mouche des fruits, la méconnaissance voire l'absence d'outils fiables d'estimation du rendement du verger et de la période de maturité physiologique du fruit pour la récolte. Si de nombreux travaux ont été réalisés sur la lutte contre la mouche des fruits (N'dépo *et al.*, 2009 ; Minhibo *et al.*, 2019 ; Coulibaly, 2021), peu d'études ont été consacrées à la maturité du fruit et au rendement de l'arbre et du verger (Carletto *et al.*, 2015). La connaissance de la période de maturité physiologique du fruit pourrait permettre de récolter les mangues au bon moment, de réduire le nombre de fruits rejetés à la récolte par les opérateurs économiques (pour immaturité ou sur-maturité), de mieux les conserver et de maintenir leurs propriétés organoleptiques et nutritionnelles (Nordey *et al.*, 2019 ; Abu *et al.*, 2021 ; Diop *et al.*, 2021). Les mangues récoltées précocement, avec une durée insuffisante entre la floraison et la récolte, n'atteignent pas un mûrissement complet avec un goût approprié, même avec un traitement à l'éthylène. Par contre, les fruits récoltés tardivement, avec une plus longue durée floraison-récolte, présentent un

temps de conservation réduit et une plus grande sensibilité aux maladies et ravageurs (Vannière *et al.*, 2013 ; Nordey, 2014).

Aussi, l'absence d'outils fiables de mesure du rendement, exacerbée par les variations climatiques, constitue-t-elle une faiblesse de la culture. L'estimation du rendement avant la récolte pourrait permettre au producteur de planifier la gestion des récoltes et de mettre en œuvre des pratiques culturales qui répondent aux besoins physiologiques de chaque arbre. Au-delà des producteurs, la prévision des rendements pourrait également permettre aux agences gouvernementales, aux entreprises, aux instituts techniques et de recherche en agronomie, d'anticiper leurs actions. Les informations précoces sur les rendements et les volumes de production, peuvent aider ces institutions dans la planification des activités de transport, le marketing des produits agricoles et aider à conseiller les politiques agricoles régionales (Mackels, 2008 ; Carletto *et al.*, 2015). Aujourd'hui, l'estimation du rendement du verger repose sur l'inspection visuelle d'un nombre limité d'arbres sur lesquels les fruits sont comptés par les producteurs (Gongal *et al.*, 2015). Cette estimation est basée sur le produit du nombre moyen de fruits par arbre échantillonné par la densité du verger. Or, en Côte d'Ivoire, de nombreux producteurs ne connaissent pas certaines caractéristiques de leurs vergers, notamment la superficie et la densité de plantation. Cette méthode d'estimation du rendement s'avère ainsi fastidieuse et souvent peu fiable (Gongal *et al.*, 2015).

A l'heure actuelle, de nombreux outils tels que la photographie au sol, l'imagerie par drone, les capteurs rouge-vert-bleu (RVB), l'analyse d'images avec des réseaux de neurones et la modélisation sont utilisées dans la recherche agronomique pour caractériser les arbres fruitiers (Qureshi *et al.*, 2017 ; Koirala *et al.*, 2019). Par exemple, les capteurs LiDAR (Light Détection And Ranging) et/ou RVB (Rouge Vert Bleu) portés par des robots ou des véhicules, permettent d'estimer le rendement et la structure des arbres dans les vergers (Stein *et al.*, 2016). L'imagerie drone associée à des modèles correctifs permettent aussi d'améliorer l'estimation du rendement (Sarron *et al.*, 2018). Ces outils ont atteint des niveaux de précision élevés pour l'estimation et la cartographie de la production d'arbres. Cependant, ils sont coûteux et/ou difficiles à transporter dans les vergers de manguiers et sont inaccessibles pour la très grande majorité des producteurs.

Disposer d'outils fiables, peu coûteux et accessibles aux producteurs pour estimer le rendement du manguiers et connaître la période de maturité physiologique de récolte de la mangue constituent un enjeu majeur dans la mise en place d'un modèle de prévision de récolte pour une production durable en Côte d'Ivoire.

La mise en œuvre de tels travaux suscite quelques questions de recherche.

Existe-t-il un indicateur pour déterminer la maturité physiologique du fruit avant la récolte ? Comment adapter les nouvelles technologies pour estimer la maturité physiologique du fruit et le rendement du manguier à l'échelle de l'arbre et du verger ? Quels sont les facteurs qui déterminent le rendement du manguier et sa variabilité ?

L'objectif général de cette étude est de contribuer à l'amélioration de la production du manguier et de la qualité de la mangue de la variété 'Kent' en Côte d'Ivoire.

De façon spécifique, il s'agira de :

- déterminer un intervalle de temps entre la floraison et la récolte pour estimer la maturité physiologique de la mangue de la variété 'Kent' ;
- développer un outil d'estimation du rendement du manguier à l'échelle de l'arbre par une analyse d'image assistée par modèle ;
- adapter une stratégie d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger.

Le présent document est organisé en trois parties :

La première partie, relative à la généralité, fait une synthèse de la littérature sur le manguier, les méthodes d'estimation de la maturité et du rendement de la mangue et des facteurs qui impactent le rendement de l'arbre et du verger. La deuxième partie est consacrée à la présentation de la zone d'étude, du matériel utilisé et des méthodes adoptées pour la mise en œuvre du travail. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans la troisième partie.

Première partie :
GENERALITES

Chapitre 1 : Généralité sur le manguiers

1.1. Origine et distribution géographique

1.1.1. Origine

Le manguiers, *Mangifera indica* L., serait originaire du Nord-Est de la région Indo-Birmane où il a été domestiqué il y a environ 4 000 ans (Bompard, 2009). Toutefois, on lui reconnaît deux centres de domestication selon le mode de reproduction. Un premier groupe est originaire des régions subtropicales de l'Inde, avec des variétés à graine monoembryonnaire. Chez ces variétés, la graine contient un embryon zygotique unique issu d'une fécondation croisée et dont le patrimoine génétique est différent de celui de la plante mère (Tonelli & Gallouin, 2013). Ces variétés se prêtent à la réalisation de croisements. Le second groupe est originaire des régions tropicales chaudes et humides d'Asie du Sud-Est (Vietnam, Indonésie, Philippines) avec des variétés à graine polyembryonnaire. Chez ces variétés, la graine contient un embryon zygotique, dont le patrimoine génétique est différent de celui de la plante mère, et un ou plusieurs embryons nucellaires dont le patrimoine génétique est identique à celui de la plante mère. Ces variétés présentent une tolérance aux fortes humidités et se multiplient fidèlement à la plante mère par semis grâce aux embryons nucellaires et servent souvent de porte-greffe, notamment pour les variétés monoembryonniques (Amouroux *et al.*, 2009).

1.1.2. Distribution géographique

La mangue a d'abord été introduite en Afrique de l'Est par les Arabes (XIII^e siècle) puis en Afrique de l'Ouest (XIX^e siècle) et en Amérique du Sud par les Portugais et les Espagnols, à partir de leurs établissements coloniaux situés en Inde et en Asie du Sud-Est (Rey *et al.*, 2004a). Aujourd'hui, le manguiers est cultivé dans une centaine de pays, dans les zones tropicales et dans de nombreuses zones subtropicales, ainsi que dans le Sud de l'Espagne (Malaga) et en Israël. Vers 1860, la mangue a été introduite en Floride qui constitue un second centre de diversité où ont été créées de nombreuses variétés appelées « floridiennes » comprenant les variétés 'Tommy', 'Atkins', 'Kent', 'Keitt', etc.... Les variétés floridiennes sont adaptées à différentes zones agroécologiques, contrairement aux variétés indiennes souvent improductives en dehors de leur centre de domestication (Mukherjee & Litz, 2009).

Le manguiers a été introduit en Côte d'Ivoire à la fin du XIX^e siècle. Il a été signalé pour la première fois en 1892 dans le jardin du poste militaire de Dabou, en bordure de la lagune Ebrié. Ces arbres auraient été plantés entre 1855 et 1872 (Rey *et al.*, 2004a).

Les premiers vergers de mangues ont été créés dans le pays entre 1865 et 1910, avec les variétés antillaises dont l'Amélie' (PACIR, 2013).

1.2. Taxonomie

Plante à fleurs et à fruits (spermaphyte), le manguier est un arbre de la classe des dicotylédones, de l'ordre des Sapindales et de la famille des Anacardiacees. Cette famille comporte environ 600 espèces réparties en 73 genres. Le genre *Mangifera* comporte 69 espèces dont l'espèce *M. indica* est la plus cultivée dans le monde, avec plus de 1 000 variétés réparties dans les deux groupes suscités (Bompard, 2009). La classification du manguier est la suivante (Kasse, 2015) :

Règne	:	Végétal
Embranchement	:	Angiospermes
Classe	:	Dicotylédones
Sous-classe	:	Archichlamydées
Ordre	:	Sapindales
Sous-ordre	:	Anacardiinées
Famille	:	Anacardiacees
Genre	:	<i>Mangifera</i>
Espèce	:	<i>Mangifera indica</i> L.

1.3. Description botanique

1.3.1. Appareil végétatif aérien

Le manguier (Figure 1) est un grand arbre sempervirent dont le port est érigé et plus ou moins étalé. Sa taille peut atteindre 30 m de haut et sa longévité plus de 100 ans. Il suit le modèle architectural de Scarrone défini par un tronc monopodial qui porte des étages de branches sympodiales (Hallé *et al.*, 1978 ; Normand *et al.*, 2009 ; Normand & Lauri, 2018). Le modèle architectural (Figure 2) représente le mode de croissance de base d'une plante. La croissance monopodiale correspond à la croissance d'un axe par l'activité du bourgeon terminal. A l'inverse, la croissance sympodiale correspond à la croissance des bourgeons latéraux suite à l'avortement ou à la transformation en organe reproducteur du bourgeon terminal. Dans le cas du manguier, le fonctionnement sympodial est dû à la transformation du bourgeon terminal en inflorescence (Goguey, 1995 ; Barthélémy & Caraglio, 2007).

La croissance du manguier est rythmique. Elle correspond à l'augmentation continue de la taille de nouvelles unités de croissance (UCs) qui se mettent en place au cours d'une période de croissance végétative (Dambreville *et al.*, 2013). Ainsi, trois ou quatre poussées de croissance se développent sur des branches individuelles par an, en fonction de la variété et des conditions de croissance (Davenport, 2003). Ces poussées de croissance (Figure 3), appelées unité de croissance ou « flushs », sont généralement courtes. La durée d'élongation de l'axe d'une UC dure approximativement 7 à 12 jours et celle des feuilles 11 à 13 jours. Le développement de l'UC entre le débourrement du bourgeon et l'élongation complète est de 3 à 6 semaines selon les variétés et les conditions climatiques. Pendant cette période, 10 à 20 nouvelles feuilles sont produites par unité de croissance. Ces feuilles peuvent rester entre 3 et 4 ans sur l'arbre. Leur forme varie selon les variétés. La couleur des jeunes feuilles est d'abord rouge (feuilles anthocyanées) puis jaune et/ou vert clair suivant les variétés. Elles deviennent vertes foncées au stade adulte (Dambreville *et al.*, 2013).



Figure 1 : Manguier, variété 'Kent' en pleine fructification (Diatta, 2018)

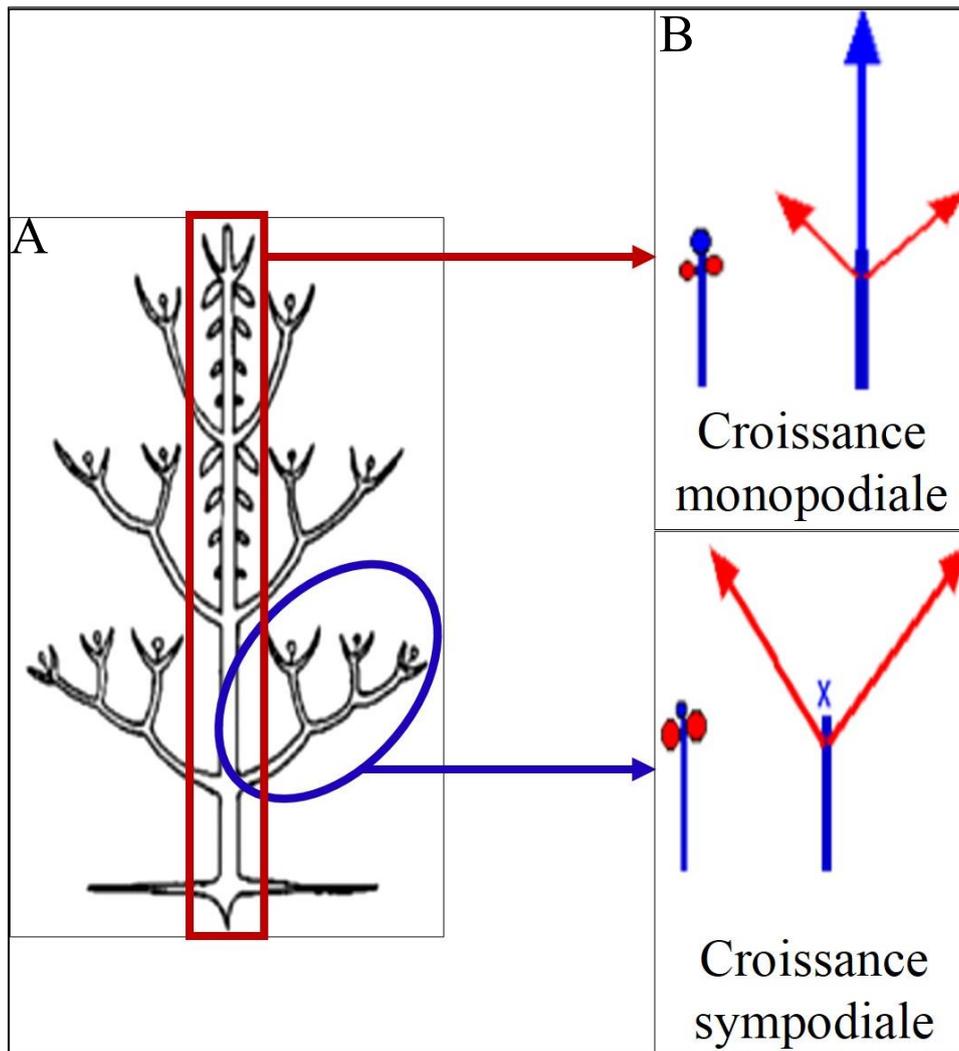


Figure 2 : Modèle architectural chez le manguier

(A) modèle de Scarrone, (B) schémas explicatifs de la croissance monopodiale et sympodiale (Edelin, 1984 ; Capelli, 2017)

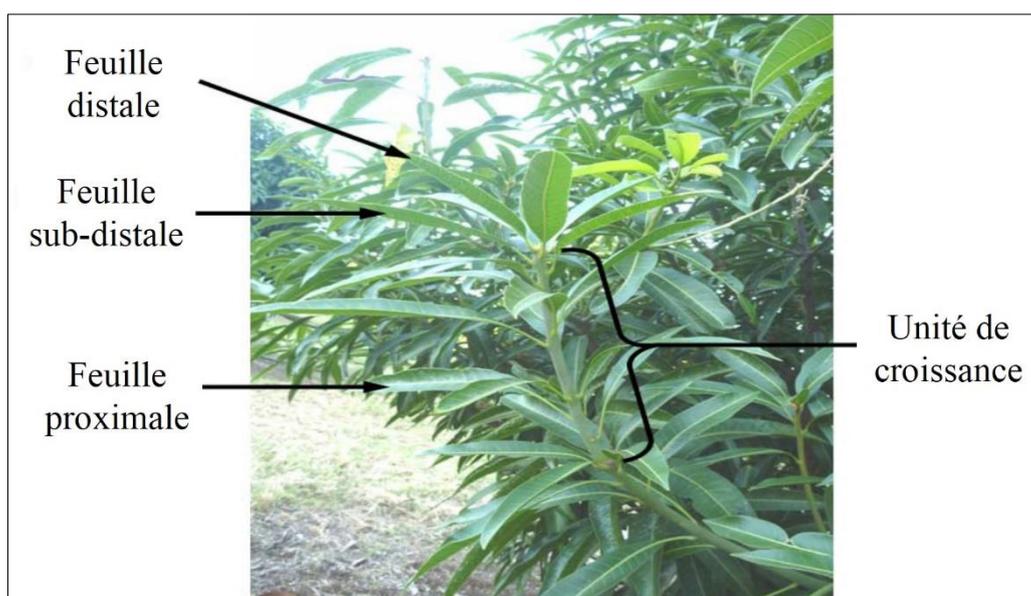


Figure 3 : Unité de croissance avec le détail de la position des feuilles adultes (Dambreville, 2012)

1.3.2. Appareil racinaire

Le système racinaire du manguiier est composé d'une racine principale pivotante profonde et vigoureuse et des racines latérales proches de la surface (Crane *et al.*, 2009). La racine pivotante, de forme conique, a une fonction d'ancrage de la plante dans le sol et d'alimentation en eau prélevée en profondeur. Elle permet à l'arbre de résister aux vents cycloniques et à la sécheresse.

Les racines latérales, très nombreuses, se développent sur une surface importante mais peu profonde. Elles assurent la nutrition minérale et hydrique de la plante (Normand, 2009).

1.3.3. Appareil reproducteur

Les fleurs du manguiier sont réunies sur des inflorescences pyramidales de taille variable. Les inflorescences (Figure 4) ont une couleur variable et peuvent mesurer jusqu'à 30 cm de longueur et contenir plusieurs milliers de fleurs selon la variété. Les fleurs (Figure 5) peuvent être mâles, au pistil avorté et qui portent une seule étamine fonctionnelle, ou hermaphrodites, au pistil fonctionnel. La proportion de ces deux types de fleur sur l'inflorescence dépend des conditions environnementales et de la variété (Iyer & Schnell, 2009). En général, une minorité (1 à 30 %) de fleurs sont hermaphrodites et sont les seules à produire des fruits, ce qui laisse penser que leur nombre peut être un facteur limitant la nouaison et la production de l'arbre (Bally, 2006). La floraison est terminale, c'est-à-dire qu'elle apparaît sur les unités de croissance (UC) en position terminale. Parfois plusieurs inflorescences peuvent être présentes sur une UC (Goguet, 1995). Ces inflorescences peuvent être soit pures soit mixtes.

Les inflorescences pures ne contiennent que des fleurs alors que sur les inflorescences mixtes, moins nombreuses, on trouve à la fois des fleurs et des feuilles plus ou moins développées (Mukherjee & Litz, 2009). La floraison du manguiier se déroule en deux étapes : l'initiation de la pousse et l'induction florale. Ces deux étapes se déroulent pratiquement au même moment (Davenport, 2009 ; Ramirez & Davenport, 2010).

- L'initiation de la pousse se déroule au cours du repos végétatif et est sous l'influence des basses températures (< 18 °C). Les facteurs exogènes tels que les pratiques culturales, le stress hydrique, mais aussi des facteurs endogènes comme les hormones, l'âge de l'unité de croissance (UC) déclenchent l'initiation de la pousse. Pendant cette phase, le devenir de l'UC terminale est déterminé par les événements qui surviennent suite au développement des bourgeons (Ramirez *et al.*, 2010).

• L'induction florale se produit entre le débourrement des bourgeons et l'apparition des inflorescences. Elle est stimulée de la même manière que l'initiation de la pousse, mais également par la structure de l'unité de croissance (diamètre et nombre de feuilles de l'unité de croissance) et les flush végétatifs précédents. Après l'induction florale, se produit le développement des pièces florales, qui correspond à la floraison au sens large. Entre l'ouverture du bourgeon et la fin de la croissance de l'inflorescence, se passe approximativement 10 à 25 jours suivant la température (Dambreville *et al.*, 2015).



Figure 4 : Inflorescence de manguiier, variété 'Kent'

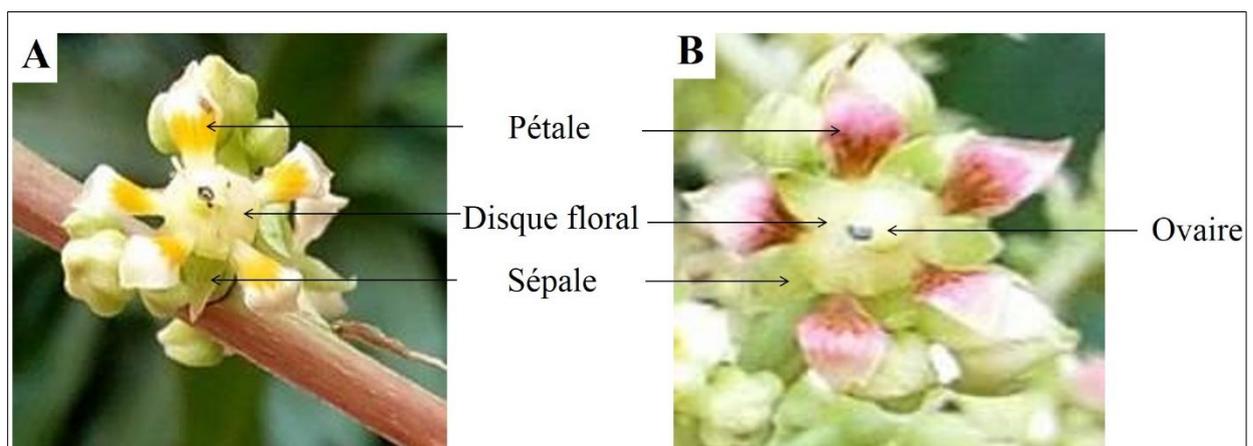


Figure 5 : Fleurs de manguiier, variété 'Irwin'

A) fleur mâle, B) fleur hermaphrodite (Sitbon, 2004)

1.3.4. Fruit

La mangue est une drupe, un fruit charnu indéhiscent à noyau plus ou moins aplati latéralement suivant les variétés. La forme et la couleur du fruit sont très variables et fonction de la variété. Le fruit peut être allongé ou ovale et se terminer par un bec ou non. La couleur de l'épiderme (ou épicarpe) varie également du vert au rouge/jaune en passant par l'orange selon la variété, mais également de la période de récolte et de l'exposition du fruit à la lumière (Nordey *et al.*, 2014a). Les fruits peuvent avoir une taille qui varie entre 2,5 cm à plus de 45 cm de long et peser jusqu'à 1 500 g suivant les variétés (Normand, 2009). Une coupe longitudinale du fruit (Figure 6) présente trois parties de l'extérieur vers l'intérieur :

- La peau (ou épicarpe) fine, lisse et résistante est d'aspect brillant à maturité ;
- La pulpe (ou mésocarpe) d'épaisseur variable est à maturité de couleur jaune-orangée, juteuse, très parfumée, d'une saveur agréable. Elle a un aspect plus ou moins fibreux et constitue la partie consommée contenant les matières nutritives ;
- Le noyau (ou endocarpe), très aplati, est entouré par la pulpe. En forme d'amande, il est couvert de fibres plus ou moins longues et nombreuses qui peuvent pénétrer dans la chair sans en gêner la consommation (De Laroussilhe, 1980).

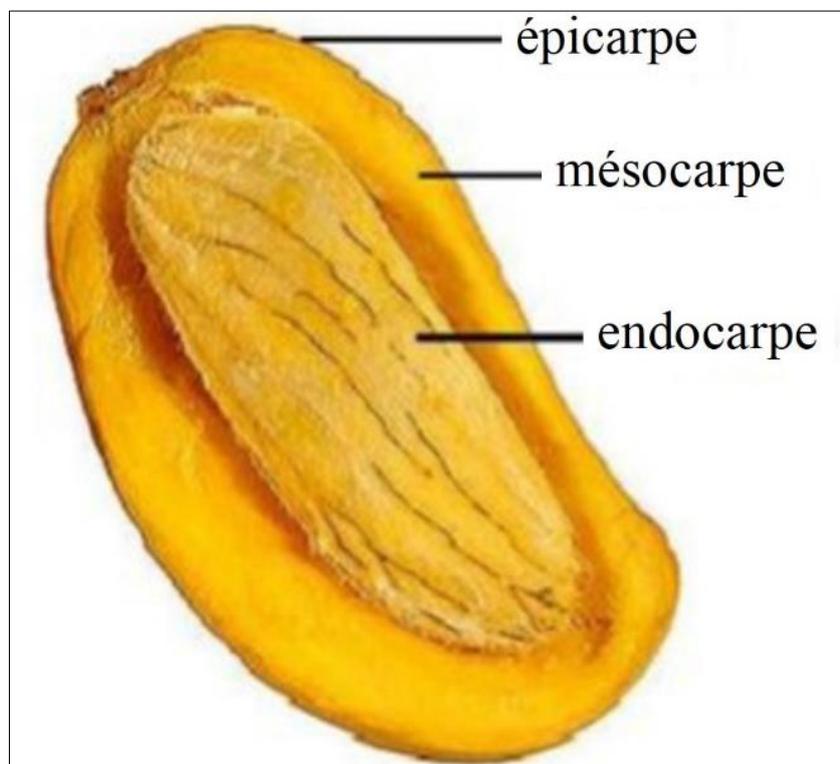


Figure 6 : Coupe longitudinale montrant les différentes parties de la mangue (Kagy, 2010)

Après la nouaison, la transformation de l’ovaire en fruit et le début de la croissance du fruit (Figure 7), il faut compter entre 90 et 180 jours jusqu’à la maturation des mangues. La croissance du fruit se traduit par l’élargissement du fruit et son augmentation en volume après une période de division cellulaire. Cet élargissement, de type sigmoïdal, est caractérisé par une accumulation d’eau et de carbone. Le fruit atteint sa taille définitive environ 2 à 3 semaines avant la maturité (Léchaudel *et al.*, 2007). Le développement du fruit après la fin de la floraison peut être divisé en quatre stades (De Laroussilhe, 1980) :

- le stade juvénile s’étend sur environ 21 jours et débute à la fécondation. Ce stade est caractérisé par la formation du jeune fruit.
- la croissance du fruit dure environ 28 jours et est caractérisée par l’allongement des cellules et l’expression des facteurs physiologiques.
- le stade climactérique ou stade critique dure 77 à 80 jours. Ce stade permet à la mangue d’accumuler tous les constituants qui lui seront nécessaires lors de l’élaboration de sa composition physico-chimique finale.
- le stade mature commence à la fin du stade climactérique et est caractérisé par la transformation de l’amidon en sucre, la diminution de l’acidité, la disparition des pigments verts et l’apparition de la couleur du fruit mûr.

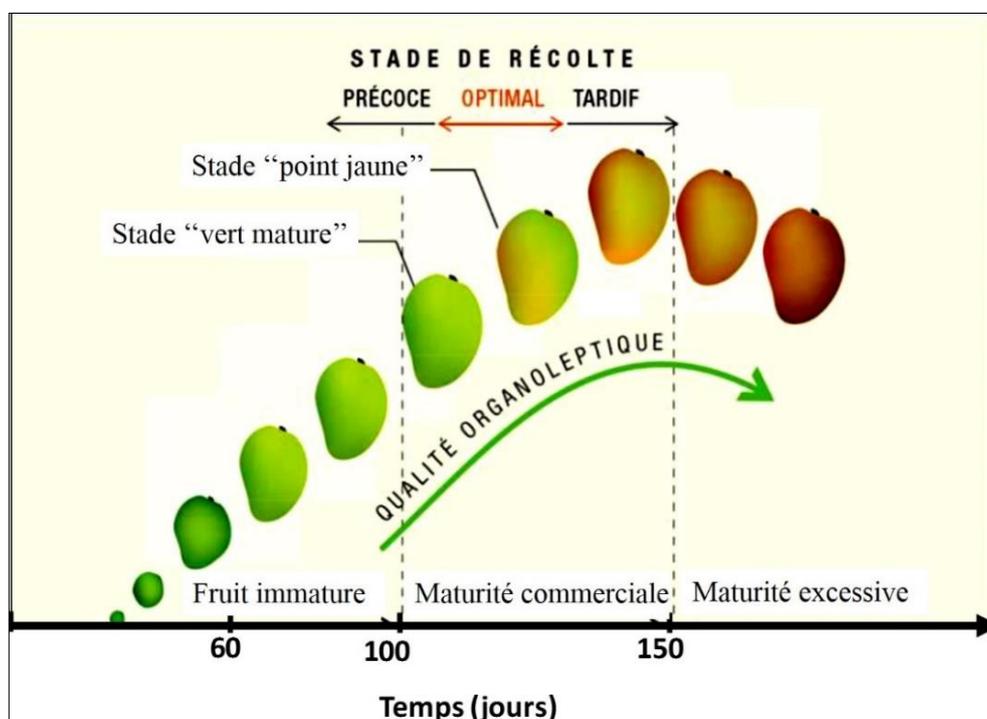


Figure 7 : Croissance des mangues au cours du temps (Joas & Léchaudel, 2009)

1.4. Ecologie

Le manguiier s'adapte à des climats et à des sols très divers. Cependant, il présente certaines exigences pour optimiser les rendements et la qualité des fruits.

1.4.1. Climat

Le climat favorable à la culture du manguiier est celui des zones tropicales et subtropicales semi-arides. La température et la pluviométrie sont les deux principaux facteurs climatiques qui affectent le développement du manguiier (Schaffer *et al.*, 2009). Le manguiier préfère, pour sa croissance, un climat tropical avec une saison fraîche et/ou sèche bien marquée. Les températures comprises entre 24 °C et 27 °C sont optimales pour le développement de l'arbre et la croissance des fruits (Crane *et al.*, 2009). Les températures inférieures à 10 °C peuvent provoquer des dégâts physiologiques et des températures négatives (-4 à -6 °C) sont mortelles pour l'arbre (Vannière *et al.*, 2013).

Du fait de sa racine principale pivotante profonde et de ses feuilles coriaces, le manguiier est assez tolérant au stress hydrique. Toutefois, un stress hydrique pendant la nouaison et le développement des fruits réduit leur rendement et leur taille. L'alimentation en eau des arbres doit être optimale, entre 200 à 250 mm mensuel pendant la saison la plus chaude et/ou la plus sèche (Vannière *et al.*, 2013). Cependant, des précipitations annuelles supérieures à 1 500 mm entraînent des problèmes sanitaires pour la plupart des variétés commerciales (Normand, 2009).

Outre la température et la pluviométrie, le manguiier est sensible au vent. Le vent a un effet direct et indirect sur le rendement à travers la chute des fruits, les lésions sur les feuilles et le développement de la bactériose. Il a un impact sur la qualité visuelle du fruit du fait de la présence de cicatrices provoquées par l'abrasion du vent sur les fruits (Schaffer *et al.*, 2009).

1.4.2. Sol

Le manguiier peut se développer sur des sols à pH qui varie de 5,5 à 7,5 (Normand, 2009). Il s'adapte à des sols variés à condition qu'ils soient bien drainés. Un sol suffisamment meuble, profond, filtrant, sans problème d'hydromorphie, est nécessaire pour le développement et l'installation de ses racines. Sur des sols sableux ou caillouteux, le manguiier peut souffrir de stress hydrique et produire des fruits de petit calibre, sauf si l'irrigation est maîtrisée (Gerbaud, 2015). Le manguiier est sensible au stress salin. En effet, la salinité peut provoquer des nécroses au niveau des feuilles, diminuer la surface foliaire et impacter l'architecture de l'arbre en diminuant l'élongation des cellules des feuilles tout en affectant l'activité du méristème terminal. Le taux de matière organique des sols en zone tropical doit être compris entre 4 et 5

% en surface et de 1 à 2 % en profondeur pour un rapport carbone/azote compris entre 9 et 10 (Schaffer *et al.*, 2009 ; Vannière *et al.*, 2013).

1.5. Cycle phénologique

La phénologie est l'étude de l'apparition d'événements périodiques, le plus souvent annuels, dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat (Amouroux *et al.*, 2009). En milieu tropical et subtropical, le cycle de production du manguière dure 18 mois et est composé de quatre phases phénologiques distinctes que sont (i) la croissance végétative, (ii) le repos végétatif, (iii) la floraison et (iv) la fructification. Le cycle phénologique du manguière dépend de nombreux facteurs, tels que la situation géographique, l'environnement, la variation de températures, l'âge de l'arbre, de la pousse terminale et encore de la variété (Dambreville *et al.*, 2013).

Les phases phénologiques peuvent donc être décalées de plusieurs semaines entre deux cycles de production selon les conditions climatiques, entraînant des asynchronismes phénologiques.

Les asynchronismes se traduisent par un étalement dans le temps des phases phénologiques végétatifs et reproducteurs au sein d'un verger ou au sein d'un même arbre. (Normand & Lauri, 2018). Ils correspondent à des débourrements des bourgeons décalés au cours du temps. Ces asynchronismes entraînent un étalement dans le temps des stades phénologiques, comme la floraison, la fructification et la croissance végétative (Dambreville *et al.*, 2013). Ce phénomène rend difficile l'estimation du rendement mais surtout la détermination de la période de maturité physiologique de récolte du fruit.

1.6. Physiologie post-récolte de la mangue

Un fruit peut atteindre la maturité sans présenter les qualités organoleptiques pour être consommé du fait qu'il n'est pas mûr. La maturité est l'étape dans laquelle se trouve un organisme qui a atteint son plein développement. Le mûrissement est un ensemble de changements biochimiques et physiologiques irréversibles et inévitables, qui transforment la composition du fruit et lui confèrent ses caractéristiques nutritionnelles (Artés, 2004). Les principaux changements sont entre autres, une augmentation de la production d'éthylène et de la respiration, une hydrolyse de l'amidon, une diminution des acides organiques, une synthèse de pigments, une régression des chlorophylles, etc. Le mûrissement commence à la fin de la maturité, se poursuit après la récolte du fruit et est modifié et accéléré par de nombreuses manipulations en rapport avec les besoins de manutention, de transport et de transformation (Artés, 2004). Ainsi, la maîtrise des dates de récolte par rapport à la maturité physiologique

permet une conservation prolongée de ces produits, mais peut être au détriment de leurs qualités organoleptiques et nutritionnelles (Combris *et al.*, 2008).

Pour la mangue, les différents facteurs (température, conditions lumineuses, humidité, charge en fruit) qui interviennent pendant sa croissance et son développement, déterminent sa qualité finale. Sur l'arbre, les fruits arrivent à maturité de manière variable. Il est donc difficile de déterminer le niveau optimal de maturité du fait de l'inexistence de paramètres visuels simples. A titre d'exemple, la couleur du fruit varie à la fois avec le niveau de maturité et les conditions de lumière (Nordey *et al.*, 2014b).

Au cours de son processus de mûrissement post-récolte, la mangue est affectée par son activité respiratoire. Cette activité se manifeste par une absorption de l'oxygène (O₂), un rejet de dioxyde de carbone (CO₂) et une émission d'éthylène (C₂H₄), sa principale hormone de mûrissement (Delroise, 2003). Lors de cette activité physiologique, une accumulation de composés d'intérêt nutritif comme les sucres, synthétisés à partir de l'amidon, les acides, les arômes et les vitamines est observée (Kasse, 2015). Toutefois, pour les mangues immatures, l'accumulation de réserves sous forme d'amidon sera insuffisante. Ainsi, les fruits récoltés avant leur maturité physiologique se rident souvent avant mûrissement, leur chair peut rester blanche et ferme, acidulée, mais sans aucun goût. Le choix de la date de récolte est donc décisif (Ducamp, 2002).

1.7. Qualité nutritionnelle et chimique de la mangue

La mangue est un fruit qui contient assez d'eau et de glucides et dont la composition (Tableau I) varie selon son niveau de maturité à la récolte. La mangue mature est riche en vitamine A (béta-carotène), en vitamine C (acide ascorbique), en sucres (fructose, glucose et saccharose) avec une dominance de saccharose. L'acidité du fruit dépend de la variété, et est principalement due aux acides citrique et malique (Lalel *et al.*, 2003). La mangue est très énergétique (65 kcal/100 g) et contient également des protéines, des lipides et des minéraux (calcium et potassium). Les protéines de la mangue sont constituées par 17 acides aminés et les lipides par les acides gras saturés, mono-insaturés et poly-insaturés (Mukherjee & Litz, 2009).

Tableau I : Composition chimique et valeur nutritionnelle de la pulpe de mangue mûre (Kasse, 2015)

Constituants	Quantité (en g) dans 100 g
Eau	81,7
Protéines	0,51
Lipides	0,27
Glucides	17,00
Fibres alimentaires	1,8
Sels Minéraux (en mg)	
Calcium	10
Fer	0,13
Magnésium	9,0
Phosphore	11
Potassium	156
Vitamines (en mg)	
Vitamine C	27,2
Thiamine	0,056
Riboflavine	0,57
Niacine	0,584
Vitamine B ₆	0,160
Vitamine A, IU	3894
Vitamine E, ATE	1,120

1.8. Marché de la mangue dans le monde

La mangue est la 6^{ème} production fruitière mondiale avec 56 millions de tonnes (Mt) derrière les agrumes, les bananes, les pastèques, les pommes et le raisin. Elle représente 5 et 1 % respectivement pour la production et pour les exportations mondiales de fruits (Gerbaud, 2021 ; FAO, 2019). En 2019, l'Asie détenait 71 % de la production mondiale. Seulement, 10 et 17 % proviennent respectivement des continents Américain (Amérique latine) et Africain. Les cinq principaux pays producteurs de mangues sont l'Inde, l'Indonésie, la Chine, le Pakistan et le Mexique. Les Etats-Unis et l'Europe en sont les principaux importateurs alors que le Mexique, la Thaïlande, le Brésil, le Pérou et le Vietnam sont, dans l'ordre décroissant, les plus gros exportateurs de mangues (Mitra, 2016 ; FAO, 2019).

La Côte d'Ivoire est le 1^{er} pays africain exportateur de mangue et le 3^{ème} fournisseur mondiale sur le marché européen après le Brésil et le Pérou (Mieu, 2017 ; Gerbaud, 2021). Le pays est le 10^{ème} exportateur mondiale de mangues (FAO, 2019). Parmi les variétés destinées à l'exportation, la 'Kent' est la plus privilégiée sur le marché international à cause de son goût agréable, sa faible teneur en eau et son temps de conservation élevé (Rey *et al.*, 2004b).

En 2019, plus de 49 000 t de mangues ont été importées dans l'Union Européenne par les pays d'Afrique de l'Ouest, hors le Sénégal (Gerbaud, 2020).

1.9. Filière mangue en Côte d'Ivoire

1.9.1. Zone de production

La Côte d'Ivoire dispose d'un nombre important de vergers de manguiers traditionnels et de quelques plantations de type moderne (Touré, 2012). Les vergers traditionnels sont caractérisés par de petites superficies (2 à 3 ha) et sont plus ou moins bien structurés. Quant aux vergers modernes, ils sont assez bien structurés avec des superficies pouvant atteindre 200 ha. La production est concentrée dans la zone nord du pays, notamment dans les régions de Korhogo, Sinématiali, Boundiali, Odienné et Ferkessédougou, avec une superficie totale d'environ 4 000 ha (Touré, 2012). Ces zones sont très favorables à la culture de la mangue en raison de la bonne alternance entre les saisons sèches et les saisons humides. En raison de ses exigences climatiques, les mangues destinées à l'exportation sont produites principalement dans la moitié nord du pays, dans les localités suscitées. La région de Bouaké, au centre du pays avec environ 1 500 ha, produit des variétés traditionnelles (PACIR, 2013).

1.9.2. Variétés cultivées

Trois variétés dominent sur les marchés locaux et occidentaux.

1.9.2.1. Variété 'Amélie'

La variété 'Amélie' (Figure 8) est d'origine antillaise introduite au Mali au XIX^e siècle puis diffusée dans toute l'Afrique de l'Ouest. Le fruit, de forme arrondie, avec un bec plus ou moins marqué, pèse entre 300 et 600 g. Sa pulpe est orange foncé, sans fibre avec un goût agréable après mûrissement. Les circuits de la grande distribution lui reprochent une absence de coloration rouge de l'épiderme et sa faible aptitude à la conservation. Les mangues sont souvent récoltées précocement avec un épiderme vert. 'Amélie' occupe un créneau commercial limité, en tout début de saison de fin mars à mi-avril, lorsque le marché est déficitaire en mangues et que les variétés colorées sont quasiment absentes (CBI, 2019 ; Vannière *et al.*, 2013).

1.9.2.2. Variété 'Kent'

La 'Kent' (Figure 8), variété sur laquelle est focalisé ce travail, est d'origine floridienne, introduite en Afrique sur la station de Foulaya, en Guinée, en 1949 (Rey *et al.*, 2004b). Elle a été par la suite diffusée vers d'autres stations d'Afrique. 'Kent' est de forme ovale à base

arrondie, sans bec et mesure entre 11 à 13 cm de longueur sur 8 à 11 cm de largeur. A maturité, son poids est compris entre 300 et 900 g (Rey *et al.*, 2004b). Le noyau est épais et constitue 9 % du poids total du fruit à maturité. Elle contient une graine monoembryonnée qui le remplit entre 70 à 90 % en volume (Campbell & Campbell, 1994 ; Gerbaud, 2015). En plus de ses excellentes qualités organoleptiques, c'est la fermeté de la chair, de couleur jaune-orange et son mûrissement progressif qui la rendent particulièrement attractive pour l'exportation. Cette mangue constitue la référence en terme de qualité pour les marchés d'exportation et sa période de récolte est compris entre Avril et Mai, au nord de la Côte d'Ivoire. Les fruits, à l'épiderme coloré de rouge et aux arômes bien développés sont obtenus sur sol latéritique en condition sèche, sur des arbres bien exposés à l'ensoleillement. En situation humide et ombragée, les fruits restent verts à maturité (Vannière *et al.*, 2013).

1.9.2.3. Variété 'Keitt'

La variété 'Keitt' (Figure 8), d'origine floridienne a été introduite, comme 'Kent', à Foulaya, en 1949. Elle a connu la même diffusion que 'Kent' en Afrique et est la plus tardive des variétés d'exportation. Sa période de récolte s'étale de mai à juillet dans le nord de la Côte d'Ivoire (Rey *et al.*, 2004b). Le fruit, ovale et allongé, est aplati latéralement. Son poids est compris entre 500 g et 1 kg. Sa pulpe jaune orangée contient de fines fibres facilement consommées. Son noyau représente 7 à 8 % du poids total du fruit. De maturité tardive, les fruits possèdent une belle coloration externe allant du rose foncé au rouge vif. Les situations humides et peu ensoleillées sont défavorables à l'obtention d'une bonne coloration de l'épiderme. Elle est parfois sujette à des désordres physiologiques internes. Sa production tardive, qui était considérée autrefois comme un avantage permettant d'étaler la période de récolte, devient un handicap en raison des attaques parasitaires sur les fruits (Vannière *et al.*, 2013).

1.9.2.4. Autres variétés

En dehors de ces trois principales variétés d'exportation, plusieurs autres variétés existent dans les zones de production de la Côte d'Ivoire. Il s'agit des variétés : 'Brooks', 'Tommy Atkins', 'Palmer', 'Valencia', 'Améliorée du Cameroun', 'Smith', 'Zill', 'Irwin', 'Haden', 'Davis Haden', 'Beverly', 'Galerie', 'Ruby', etc. Ces variétés, peu connues et donc moins valorisées, représentent 10 % des vergers en production. Aujourd'hui, les variétés les plus courantes sont : 'Kent' (80 %), 'Keitt' (7 %), et Amélie' (3 %). La récolte débute en mars avec la variété 'Amélie' et se termine en juin-juillet avec les variétés 'Keitt' et 'Brooks' (CBI, 2019).

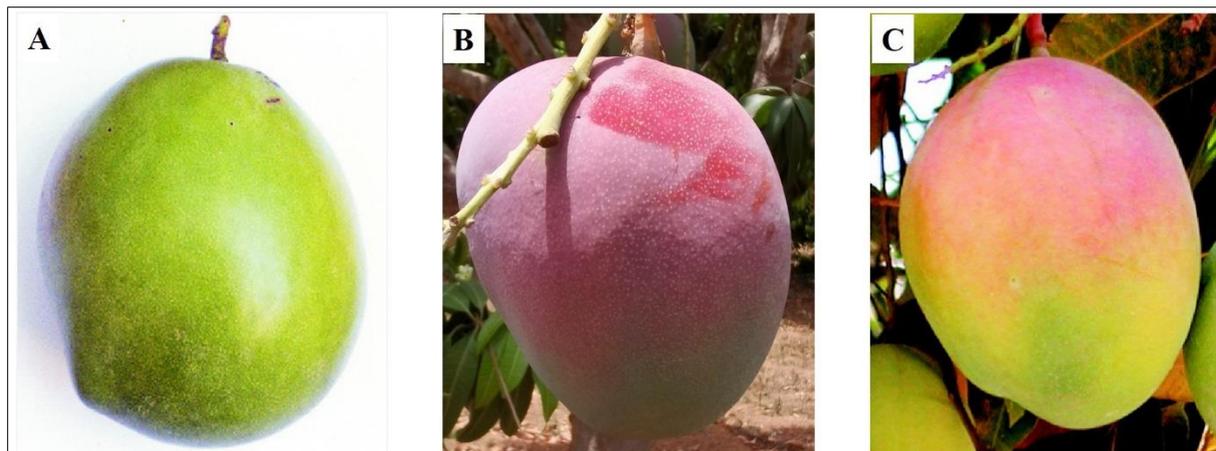


Figure 8 : Principales variétés de mangues exportées par la Côte d'Ivoire

A) 'Amélie', B) 'Kent' et C) 'Keitt'

1.9.3. Exportations

En Côte d'Ivoire, les exportations débutées à la fin des années 1970, ont augmenté à partir de 1983. Depuis cette date, en faisant abstraction des irrégularités de production dues au climat, les quantités exportées ont constamment augmenté et ont atteint une quantité de 14 706 t en 2007. Une forte diminution des exportations a été enregistré entre 2008 à 2011 (N'Guettia *et al.*, 2013). Avec 18 000 t de mangues exportées en 2013, la Côte d'Ivoire est le 1^{er} exportateur Africain de mangues suivie du Mali et du Sénégal et le 3^e fournisseur du marché européen après le Brésil et le Pérou. En 2020, la Côte d'Ivoire a également exporté 26 000 t de mangues. L'exportation ivoirienne concerne les variétés de mangues 'Kent', 'Keitt' et 'Amélie' (Kouamé *et al.*, 2011). La variété 'Kent' est la plus privilégiée pour l'export, car elle a une faible teneur en eau qui lui confère une durée de vie commerciale conséquente et des qualités recherchées par les exportateurs (Rey *et al.*, 2004b).

1.9.4. Caractéristiques des vergers de manguier

Les vergers ivoiriens sont caractérisés par les variétés cultivées et par la taille des exploitations (Touré, 2012).

Selon les variétés cultivées, il existe :

- les vergers de manguiers non greffés. Ces vergers sont issus de semis direct sans itinéraire technique. Ils sont situés principalement dans la région de Bouaké.
- les vergers de manguiers greffés sur des porte-greffes traditionnels. En général, bien structurés, alignés et respectant les distances de plantation, ces vergers bénéficient généralement de soins et d'entretiens de la part des propriétaires. Ces manguiers offrent de hauts rendements estimés entre 10 et 12 t.ha⁻¹ et des fruits de qualités gustatives plus appréciées.

Selon la taille des exploitations, on distingue :

➤ les petites plantations villageoises. Elles ont en moyenne des superficies comprises entre 2 et 20 ha et représenteraient à elles seules, plus de la moitié l'offre locale. Ces plantations appartiennent en majorité à de petits producteurs, villageois dont l'activité principale est centrée sur l'agriculture (Touré, 2012) ;

➤ les exploitations allant de 20 à 350 ha. Ces exploitations sont considérées comme des exploitations industrielles avec des rendements pouvant dépasser les 20 t.ha⁻¹ (Touré, 2012). Ces vergers dont les fruits sont essentiellement destinés à l'exportation sont détenus par les sociétés exportatrices de mangues et les grands producteurs. Ils bénéficient d'un encadrement technique tel que les traitements phytosanitaires, la taille des arbres, le désherbage, le labour, etc. (Vannière *et al.*, 2004 ; Konan *et al.*, 2017). Dans ces vergers, le manguier est cultivé en monoculture pure de 'Kent' (Figure 9). Toutefois, quelques pieds d'autres variétés destinées à la consommation locale sont associés à la 'Kent' dans certains vergers de grands producteurs. Le verger ivoirien est estimé aujourd'hui à environ 24 000 ha et est essentiellement dominée par les plantations villageoises qui représentent 90 % de la production (CBI, 2019).



Figure 9 : Verger de manguier de la variété 'Kent'

1.9.5. Importance économique de la mangue

Naguère production villageoise de cueillette, la mangue est devenue depuis 1981, le troisième produit de rente de la région des savanes, après le coton et l'anacarde (N'Dépo *et al.*, 2009). La production de mangues est estimée 150 000 t, dont 92 % sont cultivés par des producteurs individuels et leurs coopératives et 8 % par des producteurs commerciaux (N'Guettia *et al.*, 2013 ; Van den Broek *et al.*, 2016). Elle joue un rôle stratégique pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle des producteurs et des populations.

L'autoconsommation de mangues apporte une source nutritive complémentaire aux populations vulnérables et marginales en période de soudure, c'est-à-dire à la fin de la saison sèche et en début de la saison des pluies, lorsque que les stocks de céréales manquent (Fifanou *et al.*, 2011 ; Parrot *et al.*, 2018). La mangue, 2^{ème} fruit exporté par la Côte d'Ivoire après la banane joue un rôle important dans le développement économique des zones productrices. La banane, la mangue et l'ananas contribuent à hauteur de 3 à 4 % du Produit Intérieur Brut (PIB) national et de 8 à 10 % du PIB agricole (Mieu, 2017). Les revenus de la mangue contribuent à l'amélioration du cadre de vie des populations (Monteiro *et al.*, 2017).

Le secteur de la transformation, du conditionnement et de l'exportation en frais à destination de l'Union Européen (UE) emploie une main d'œuvre féminine saisonnière importante d'environ 4 000 personnes, rémunérée en moyenne à 2 500 F CFA par jour, pour environ 2 mois de travail par an. La campagne d'exportation 2016 a rapporté 6,5 milliards de F CFA (près de 10 millions d'euros) aux producteurs ivoiriens (Mieu, 2017).

Chapitre 2 : Généralité sur la maturité et le rendement en culture fruitière

2.1. Facteurs impliqués dans la maturité des fruits

La maturité est l'étape dans laquelle se trouve un organisme qui a atteint son plein développement. La qualité organoleptique et nutritionnelle regroupe un ensemble de caractéristiques externes, comme la forme, la taille et la couleur et interne au fruit, comme la saveur sucrée ou acide, etc. (Schreiner *et al.*, 2013). Le développement, la maturité et la qualité de la mangue sont affectés par de nombreux facteurs tels que les conditions climatiques, la position du fruit, la charge en fruits de l'arbre, les pratiques culturales etc.

La lumière contribue au développement et à la croissance du fruit en améliorant sa qualité. Raffo *et al.* (2011) ont montré que l'exposition des poires à la lumière, rend les fruits récoltés à maturité plus fermes que ceux à l'ombre. Léchaudel *et al.* (2012) ont souligné qu'un fruit à l'extérieur de la canopée reçoit 6 à 10 fois plus d'énergie lumineuse qu'un fruit positionné à l'intérieur de celle-ci. La température étant indispensable dans les réactions chimiques, elle affecte de nombreux processus physiologiques et biochimiques dans le fruit tels que la respiration, la croissance et le mûrissement (Ravindra & Goswami, 2008). Les variations de température observées entre les fruits, pourraient ainsi expliquer les différences de maturité et de qualité mesurées entre les fruits d'un même arbre (Bonora *et al.*, 2013).

L'alimentation en eau a un effet majeur sur la croissance et la qualité des fruits charnus. En effet, plusieurs paramètres physiologiques tels que la conductance, la respiration, la photosynthèse, la transpiration et la croissance peuvent être affectés par le stress hydrique. Ces modifications qui sont à l'origine de la réduction de la masse du fruit, agissent aussi sur les teneurs en composés primaires et secondaires qui définissent la qualité du fruit (Montanaro *et al.*, 2010). Sur la mangue, des études ont montré que les différences de charge en fruit sur l'arbre causent d'importantes variations de croissance en matière sèche. Les manguiers, avec une forte charge en fruits, sont récoltés plus tardivement suite au ralentissement de la maturité de leur fruit due à la compétition pour les assimilats tels que le carbone et l'azote (Ngao *et al.*, 2021). Le volume et la masse du fruit augmentent avec la quantité d'assimilats disponibles. La charge en fruits pourrait donc avoir un impact sur la maturité du fruit qui dépend de la disponibilité en carbone et en azote. Selon Léchaudel & Joas (2006), la forte charge en fruits entraîne une diminution de la masse et de la teneur en matière sèche des fruits.

Pour homogénéiser la qualité et la maturité des mangues sur l'arbre, il est important de maîtriser la charge en fruits, car la disponibilité carbonée des fruits a un impact sur leur teneur en matière sèche et leur vitesse de mûrissement (Nordey, 2014).

2.2. Estimation de la maturité

En Côte d'Ivoire, la récolte de la mangue repose sur des aspects morphologiques et/ou physico-chimiques du fruit. La prise en compte de ces facteurs ne permet pas une bonne détermination de la période de maturité physiologique de récolte de la mangue pour l'exportation surtout.

2.2.1. Critères morphologique et physiologique de la maturité

En général, les critères morphologiques externes tels que, la couleur de la peau, la croissance des épaules, le dégagement du bec, la formation de cavité à la base du pédoncule et la forme du fruit, aident à estimer le niveau de maturité de la mangue à la récolte (Dick *et al.*, 2009). Ces critères d'évaluation de la maturité dépendent des facteurs tels la variété, la position du fruit dans l'arbre et le rapport fruit / feuille (Léchaudel & Joas, 2007). L'utilisation de ces critères suppose une expérience acquise sur le terrain pour une bonne récolte (Jorge *et al.*, 2013). En plus des critères visuels, certaines mangues peuvent être coupées dans le sens parallèle du noyau pour apprécier la couleur de la pulpe. Lorsque la moitié de la pulpe est de couleur jaune, cela signifie que le fruit est prêt pour la récolte. Toutefois, ces critères quoique visuels, ne peuvent être systématiquement utilisés comme indicateurs de maturité pour la récolte à cause de l'hétérogénéité de maturité entre les fruits.

L'âge physiologique du fruit est aussi un indicateur qui permet de déterminer la période de maturité physiologique de récolte. Cet indicateur est matérialisé par l'intervalle de jours entre la floraison et la récolte du fruit. Selon Ambuko *et al.* (2017), l'intervalle de jours entre la floraison et la récolte est utile pour connaître la période de récolte du fruit selon la variété, la région géographique et les conditions de culture. Cet indicateur simple est important pour l'utilisation efficace de la main-d'œuvre à la récolte, la stratégie de commercialisation, mais aussi pour réduire le nombre de fruits immatures rejetés à la récolte.

2.2.2. Critères physico-chimiques de la maturité

Les indices de maturité physico-chimiques comme les taux de sucres, l'acidité, la matière sèche, l'amidon et la fermeté, permettent d'apprécier la maturité du fruit (Valente *et al.*, 2004). Par exemple, une teneur en sucres solubles supérieure à 8 % et une acidité d'environ 1 % sont des indices permettant d'évaluer la maturité de la mangue (Subedi *et al.*, 2007). Cependant, ces méthodes demeurent destructives et peu efficaces, car ne s'appliquant pas à toutes les variétés. De plus, leur application demande un laboratoire technique, ce qui limite leur utilisation. Pour une meilleure maîtrise de la maturité et de la qualité des mangues, d'autres méthodes non

destructives doivent être mise en œuvre (Léchaudel *et al.*, 2010), surtout en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire, où les moyens de suivi de la maturité du fruit au champ restent précaires voire inexistant.

2.2.3. Estimation non-destructive de la maturité de la mangue

2.2.3.1. Fluorescence chlorophyllienne

La mesure de la fluorescence de la chlorophylle est un moyen simple, non destructif qui permet d'évaluer le stade de maturité du fruit encore dans l'arbre à l'aide d'un fluorimètre. Cet outil évalue la maturité du fruit à travers trois paramètres : la fluorescence minimale (F_o), la fluorescence maximale (F_m) et la fluorescence variable (F_v). Ce dernier paramètre est la différence entre la F_m et la F_o . Les paramètres de fluorescence (F_o , F_m et F_v) commencent à diminuer avant le changement visible de couleur de l'épiderme du fruit et donc avant l'entrée en maturation du fruit. L'évolution de ces paramètres de fluorescence reflète bien l'évolution du stade de maturité de la mangue sur l'arbre (Léchaudel *et al.*, 2010). Cette technique a l'avantage par rapport aux autres de détecter des changements au niveau cellulaire bien avant leur apparition visible. Elle a déjà été utilisée sur la variété 'Cogshall' à l'île de La Réunion et a permis de montrer que les paramètres mesurés par cet appareil évoluent avant l'entrée en maturation du fruit. Cette méthode a le potentiel de devenir un indicateur non destructif de détermination du stade de récolte de la mangue et pourrait être utilisée, pour d'autres espèces de fruits (Léchaudel *et al.*, 2010). Toutefois, cet appareil est coûteux et inaccessible sous les tropiques. L'efficacité de la mesure de la fluorescence chlorophyllienne dans l'évaluation du stade de maturation des mangues a été aussi mise en exergue sur la variété 'Langra' (Ullah *et al.*, 2016).

2.2.3.2. Spectrométrie proche infrarouge

La Spectrométrie Proche Infrarouge (SPIR) est une technique analytique basée sur le principe d'absorption des rayonnements par la matière organique. Au cours des dernières décennies, les techniques d'imagerie se sont rapidement développées et ont été largement appliquées pour l'évaluation non destructive de la qualité des fruits et légumes. La SPIR a permis d'établir des relations entre certains paramètres physico-chimiques du fruit (fermeté, extrait sec soluble et acidité) et son état physiologique en termes de maturité (Jha *et al.*, 2014). Pour assurer l'approvisionnement du marché en fruits de bonne qualité, il est important de trier et de classer les mangues en fonction de leur qualité. A titre d'exemple, Assoi *et al.* (2019) ont évalué avec précision les paramètres de qualité de la mangue tels que les taux de sucre, le pH

et la teneur en eau, de manière non destructive avec la SPIR. La SPIR pourrait de plus en plus être utilisée avec succès dans les chaînes de conditionnement de fruits, pour l'évaluation non destructive de la qualité interne des fruits, afin d'homogénéiser les lots mis en carton pour l'exportation. Toutefois, cette technique, complexe nécessite un laboratoire équipé.

2.2.3.3. Analyse d'image

Les techniques d'imagerie sont utilisées pour classer ou trier des produits agricoles, selon le niveau de maturité et qualité sur la base de leur forme, leur taille, leurs défauts, leurs couleurs etc. (Shaib *et al.*, 2017 ; Sultana *et al.*, 2017). L'imagerie est basée sur l'analyse de l'image acquise par un dispositif d'imagerie numérique. Celle-ci est efficace lorsque les caractéristiques de l'image capturée sont corrélées aux attributs de qualité du produit. Récemment, des techniques d'imagerie visible, multispectrale et hyperspectrale, ont été utilisées pour évaluer la qualité des produits horticoles et alimentaires.

L'imagerie visible ou Rouge, Vert, Bleu (RVB) consiste à mesurer les objets tels que perçus par l'œil humain. Un capteur RVB mesure la lumière réfléchiée par un objet dans trois gammes de longueurs d'onde du domaine visible correspondant au rouge, au vert et au bleu. Les traitements de ces images peuvent aller de méthodes très simples comme des filtres couleur à des méthodes de détection plus sophistiquées couvrant entre autres l'analyse de textures, l'utilisation des réseaux convolutifs issus du « deep learning » (machine learning), qui sont des outils d'analyse d'image. Ces traitements d'image permettent d'avoir des informations sur l'objet d'intérêt.

L'imagerie multispectrale génère un ensemble d'images acquises pour moins de 10 longueurs d'onde (Peng & Lu, 2006). L'imagerie hyperspectrale combine les techniques de spectroscopie et d'imagerie visible pour acquérir d'une façon synchrone des informations spectrales et spatiales d'un objet. La technique peut être mise en œuvre par l'acquisition d'une séquence d'images spectrales à bande étroite ou par la capture d'images dans une bande spectrale complète. De nombreuses études sur l'imagerie multi- et hyper-spectrale ont été rapportées sur l'inspection de la qualité et le contrôle des produits alimentaires et agricoles (El Masry *et al.*, 2007 ; Blasco *et al.*, 2009). Les travaux de Nandi *et al.* (2012) ont montré les performances de ces systèmes dans l'évaluation du niveau de maturité des mangues selon la couleur de l'épiderme, la fermeté, la forme etc. Rajkumar *et al.* (2012) ont utilisé l'imagerie hyperspectrale dans les régions du visible et du proche infrarouge pour déterminer les paramètres de qualité et les stades de maturité des bananes à trois températures différentes.

Par ailleurs, Garridonovell *et al.* (2012) ont distingué le niveau de maturité des pommes à l'aide de l'imagerie RVB et de l'imagerie hyperspectrale. Herrero-langreo *et al.* (2011) ont développé une procédure automatique capable de classer les pêches commerciales selon leur stade de maturité grâce à des techniques d'imagerie multispectrale. Ils ont proposé et validé le processus d'évaluation de la maturité des pêches par imagerie multispectrale, ce qui est très important pour garantir la qualité et la maturité optimum des pêches. Des applications de l'imagerie hyperspectrale pour mesurer les stades de maturité des fruits et légumes ont également été trouvées pour les papayes, les tomates et les raisins (Lorente *et al.*, 2012 ; Julio *et al.*, 2014).

L'imagerie visible seule, est dans les faits peu utilisée pour la raison que des capteurs multispectraux et hyperspectraux de tailles similaires existent et apportent plus d'informations que la simple information couleur (RVB). Elle peut cependant, être utilisée pour des applications en agriculture de précision ou la reconstitution 3D du couvert par structure-from-motion (Puletti *et al.*, 2014 ; Castro *et al.*, 2018). Ces applications ont l'avantage de nécessiter du matériel peu coûteux comme des smartphones équipés d'une caméra RVB qui fournissent des images à haute résolution. En résumé, les méthodes non destructives d'évaluation de la maturité présentent de nombreux atouts en comparaison aux méthodes destructives. Leur mise en œuvre est rapide et non destructive sur les échantillons de fruits et permettent une analyse globale de la qualité des fruits. Cependant, l'efficacité des modèles d'estimation qui en résultent demande encore à être améliorés pour se rapprocher de ceux issus d'analyses d'images multi- et hyper-spectrales.

2.3. Estimation du rendement des arbres fruitiers

2.3.1. Facteurs du rendement

2.3.1.1. Architecture de l'arbre

Le rendement d'une culture fruitière est défini comme la quantité ou le poids de fruits récoltés par unité de surface. La productivité des arbres qui composent le verger est dépendante de leur architecture et de leurs précédents cycles de production (Sarron, 2019).

L'architecture (Figure 10) correspond à la forme et à l'agencement dans l'espace des composantes de l'arbre tels que les feuilles, les UCs, les racines, les branches, etc. Elle varie en fonction des caractères génétiques (espèce végétale, porte greffe), des conditions climatiques, de l'âge de l'arbre et des pratiques culturales.

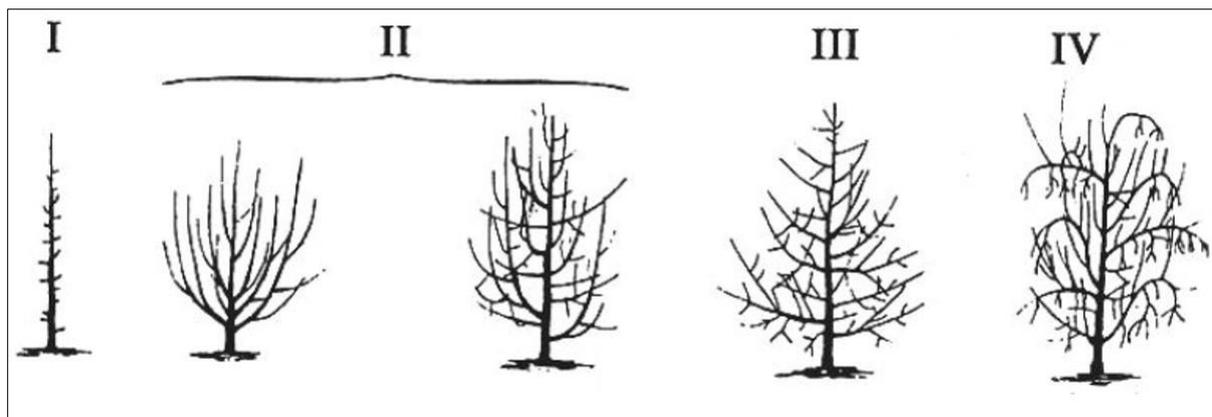


Figure 10 : Variabilité interspécifique de l'architecture du pommier (Lespinasse & Delort, 1986 ; Costes *et al.*, 2010)

Le **type I** est caractérisé par un axe principal unique dépourvu de ramifications longues, portant des rameaux courts sur toute sa longueur. Les fruits sont portés par ces petits axes courts.

Le **type II** comprend des arbres avec des charpentières de forte conicité, à angles d'insertion ouverts et à tendance basitone. Les ramifications fruitières sont situées sur des branches âgées proches du centre de l'arbre.

Le **type III** présente une intensité de ramification importante. Il est également caractérisé par une mise à fruits qui s'éloigne progressivement du centre de l'arbre. Les ramifications fruitières sont situées sur des branches âgées de 1 à 3 ans, et non sur les charpentières, ce qui entraîne un affaissement important des extrémités.

Le **type IV** est caractérisé par une ramification importante sur le tiers supérieur des branches, qui sont très acrotones. Les ramifications fruitières sont situées en position terminale ou latérale sur des branches âgées de 1 à 2 ans, entraînant une évolution très rapide de la zone fructifère vers la périphérie de la couronne (Lespinasse & Delort, 1986 ; Massonnet, 2004).

L'architecture de l'arbre joue un rôle important dans l'interception de la lumière, sur le nombre de branche qui peuvent fleurir et sur les composantes du rendement (Normand *et al.*, 2009 ; Costes *et al.*, 2010). La structure et le nombre de feuilles portées par la branche ont un impact direct sur la floraison, le nombre de fruits produits et leur qualité (Lauri & Trottier, 2004 ; Ramírez *et al.*, 2010). Aussi, à l'échelle de l'arbre, la structure du houppier et certaines variables environnementales et génétiques déterminent la production potentielle de l'arbre (Menzel & Le Lagadec, 2017). Chez la plupart des espèces, la production de l'arbre est fonction du développement du houppier. En effet, lorsque ce dernier se développe, la surface foliaire augmente et favorise l'interception de la lumière. L'augmentation de l'interception lumineuse a un effet bénéfique sur le fonctionnement des feuilles, la floraison, la nouaison, la croissance, la qualité et la couleur des fruits, à condition que les niveaux de radiation ne soient pas trop

élevés (Singh et al., 2010). L'architecture du houppier est l'élément central qui détermine la production individuelle de chaque arbre en permettant l'interception de la lumière (Stephan et al., 2008).

2.3.1.2. Irrégularité de production et Asynchronismes

L'irrégularité interannuelle de production correspond au fait qu'une année de forte production est suivie d'une, parfois de deux, années de production plus faible, voire nulle. Elle est caractérisée par des années de forte production de fruits, dites années « on » alternant plus ou moins avec des années de faible production, dites années « off ». C'est un phénomène répandu chez plusieurs espèces fruitières tempérées et tropicales tels que le pommier, le manguier, l'avocatier, etc. (Monselise et Goldschmidt, 1982). Ses conséquences sont à la fois quantitatives en termes de volume de production et qualitatives en termes de qualité des fruits. Chez le manguier, les fruits sont de petits calibres et de faible qualité en années « on » et plus gros et de meilleure qualité en années « off » (Monselise & Goldschmidt, 1982).

En plus des facteurs climatiques, l'irrégularité de production serait liée aux facteurs hormonaux, aux ressources carbonées de l'arbre, à des facteurs architecturaux, etc.

Une forte production de fruits une année peut entraîner, via les facteurs cités ci-dessus, une floraison et/ou une fructification réduite(s) l'année suivante à travers une réduction du nombre de sites potentiellement florifères et une croissance végétative faible (Dambreville *et al.*, 2013).

Les efforts fournis pour la reproduction lors d'une année de forte récolte, conduisent à un épuisement des réserves carbonées et des éléments minéraux, qui deviennent insuffisants pour la prochaine floraison, diminuant ainsi la production une année. Ces facteurs endogènes et exogènes peuvent affecter la floraison et la production individuelle des arbres, à travers des interactions marquées entre croissance végétative et reproduction (Normand *et al.*, 2009 ; Smith & Samach, 2013). Ils peuvent avoir un effet sur la production des arbres en affectant la croissance végétative, potentiellement porteuse de la future floraison et fructification.

Les asynchronismes (Figure 11) provoquent une hétérogénéité de maturité des fruits aux échelles de l'arbre et du verger conduisant à une récolte étalée (Normand & Lauri, 2018). La charge en fruits est en partie responsable des asynchronismes entre les arbres. Des arbres peu chargés débiteront leur croissance végétative plus précocement que des arbres fortement chargés où la compétition entre la croissance des fruits et la croissance végétative est importante. Les asynchronismes au sein d'un arbre sont principalement déterminés par la nature de l'UC, les UCs fructifères ayant une croissance végétative retardée par rapport aux UCs

végétatives (Dambreville, 2012). Le manguiier est caractérisé par des asynchronismes à l'échelle de l'arbre et du verger qui posent différents problèmes liés à la protection phytosanitaire des arbres, à la qualité des fruits et à la main d'œuvre nécessaire pour la récolte. Les variations de maturité, de calibre et de qualité organoleptique provoquées par ces phénomènes rendent difficile la gestion de la qualité des fruits et l'estimation à l'avance du rendement du manguiier.

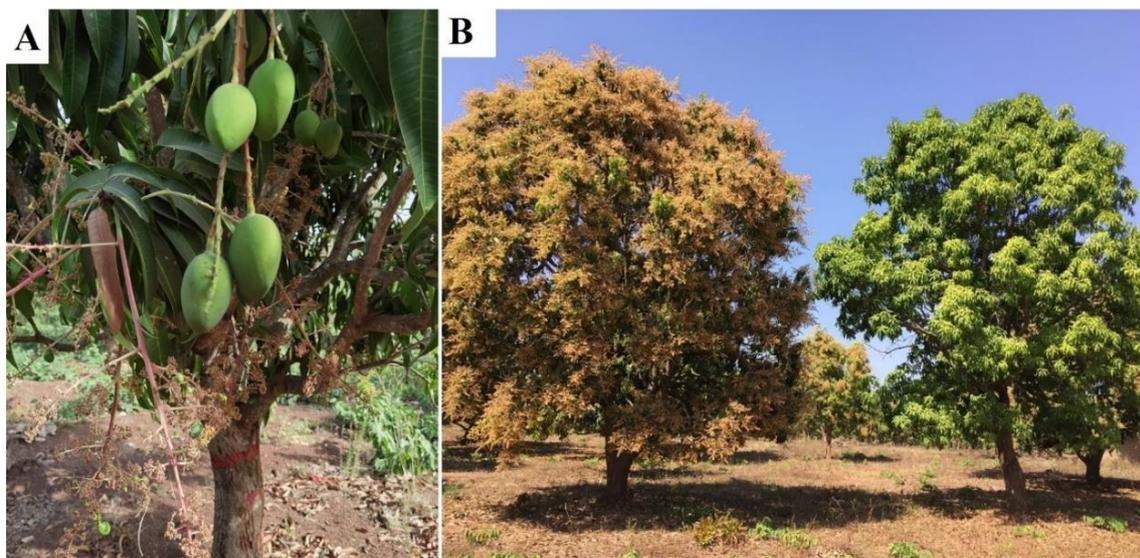


Figure 11 : Phénomènes d'asynchronisme et d'alternance chez le manguiier, variété 'Kent'
(A) asynchronisme, (B) alternance sur le manguiier

2.3.1.3. Age des arbres

Chez la plupart des espèces pérennes, la production des arbres est faible pendant les premières années suivant la plantation et continue d'augmenter jusqu'à ce que les arbres commencent à se faire de l'ombre (Menzel & Le Lagadec, 2017). Cette période peut durer dix à vingt ans, selon les espèces végétales et la densité de plantation (Bally & Ibell, 2015 ; Kumar, 2015). Une étude menée par Singh *et al.* (2010) a montré que les rendements commencent généralement à diminuer après dix ou douze ans dans les vergers de manguiiers à haute densité, comme dans les vergers traditionnels, en raison du surpeuplement et de l'ombrage. Reddy *et al.* (2003) ont indiqué une fluctuation du rendement du manguiier 'Alphonso' sur dix-sept saisons de culture avec onze années de rendements peu élevés, une année de rendements moyens et cinq années de rendements élevés. Les rendements des meilleures années ont eu tendance à augmenter au fur et à mesure de la croissance des arbres, avec une diminution au cours de la dernière année. La production des arbres augmente donc plus ou moins avec leur âge, ce qui

rend difficile une estimation à l'avance du rendement du verger compte tenu de l'alternance de production des arbres.

2.3.1.4. Densité de plantation

Le nombre d'arbres par unité de surface a un impact sur le rendement du verger. Une densité correcte permet d'optimiser le niveau de production grâce à un bon éclaircissement et une bonne aération des arbres à l'âge adulte. Dans le cas du manguier, la densité de plantation peut avoir un impact sur l'interception lumineuse, sur le volume de la canopée des arbres du verger et le nombre de fruits produits. Elle doit donc être maîtrisée pour obtenir un meilleur rendement à l'échelle du verger (Menzel & Le Lagadec, 2017). En effet, une densité trop élevée peut augmenter la compétition entre les arbres pour la lumière et peut être contre-productif. Dans les vergers de manguiers de forte densité, de 800 à 1 600 arbres.ha⁻¹, le rendement est faible du fait de la réduction de la production individuelle des arbres provoquée par une compétition entre les arbres pour les éléments minéraux et la lumière. A cela s'ajoute les coûts engendrés pour l'implantation et le maintien des arbres à travers une taille régulière pour réduire la compétition entre les arbres (Connor *et al.*, 2014). Les densités de plantation très faibles (inférieure à 100 arbres par ha) et faible d'environ 100-200 arbres par ha, sont rencontrés dans les vergers traditionnels. Les fortes densités de plantation de l'ordre de 200 à 4000 arbres par ha sont en général observées dans les vergers commerciaux (Menzel & Le Lagadec, 2017). La densité de plantation est un facteur important à prendre en compte dans la production individuelle des arbres et dans l'estimation du rendement du verger.

2.3.1.5. Conditions climatiques

Parmi les facteurs environnementaux, la température et la disponibilité en eau restent les plus importants dans le développement des plantes. Ces facteurs conditionnent l'activité photosynthétique, la croissance végétative et la production de biomasse (Schaffer *et al.*, 2009). Une température trop élevée pendant la saison fraîche peut diminuer la floraison et le rendement de l'arbre en année de faible production (année « off »). Chez les espèces tropicales comme le manguier, des températures supérieures à 15 °C la nuit et supérieures à 20 °C la journée induisent une initiation de la croissance végétative, empêchant alors l'initiation florale (Ramirez & Davenport, 2010). Les températures basses (20/10 °C jour/nuit) mais positives, peuvent diminuer la floraison en abimant l'inflorescence et la fructification et affecter ainsi l'activité des abeilles lors du processus de pollinisation (Sukhvibul *et al.*, 2005).

La disponibilité en eau influe aussi sur la croissance du fruit et le rendement. En effet, lorsqu'un stress hydrique intervient durant les premiers stades du développement des fruits, l'intensité de la chute des jeunes fruits est plus marquée et affecte le rendement (Spreer *et al.*, 2007). Une irrigation durant cette période augmente le nombre final de fruits par inflorescence (Roemer, 2011). Aussi, un stress hydrique qui intervient à partir de la fin de la 1^{ère} moitié de la période de croissance du fruit, se manifeste par une diminution de la taille finale du fruit à travers un effet sur le nombre et la taille des cellules (Léchaudel & Joas, 2007). Une humidité relative entre 60 et 70 % au début de la croissance des fruits augmente leur chute prématurée, affectant ainsi la production de l'arbre (Roemer *et al.*, 2008).

2.3.1.6. Pratiques culturales

Différentes pratiques culturales telles que la taille, l'irrigation et la fertilisation, visent à augmenter le nombre et la qualité des fruits produits et à réduire aussi les phénomènes d'irrégularité de production d'alternance et d'asynchronisme.

La taille permet d'améliorer la capture de la lumière par les feuilles, notamment dans le centre et les parties basses de la canopée, ce qui a pour conséquence d'augmenter la photosynthèse (Costes *et al.*, 2010 ; Asrey *et al.*, 2013). Dans les premières années de plantation, le producteur peut réaliser une taille de formation sur les jeunes arbres afin de leur donner une forme adéquate qui favorise le développement végétatif. Ensuite, une taille de renouvellement peut être réalisée pour maintenir l'arbre en bon état (Connor *et al.*, 2014 ; Normand & Lauri, 2018). Chez le manguiier, une taille annuelle est souvent pratiquée, après le cycle de production, pour réduire les variabilités de production intra et inter-arbre, la compétition entre les arbres et maintenir les dimensions de l'arbre adulte (Crane *et al.*, 2009).

Bien que le manguiier possède un enracinement profond et puissant, il est indispensable d'irriguer les jeunes plants en absence de pluie pendant les premières années de plantation, pour favoriser leur croissance et l'absorption des nutriments qui leur sont régulièrement apportés. Un déficit en eau peut conduire à une réduction du nombre de fleurs, à une chute physiologique des fruits et à une réduction de la taille des fruits pendant la production. Chez le manguiier en production, le pic de demande en eau se situe entre la nouaison et la récolte (Spreer *et al.*, 2007 ; Diatta, 2018).

La fertilisation chimique ou organique permet un apport en éléments minéraux aux arbres. Pour un bon ajustement de cet apport, un bilan de l'état nutritionnel par une analyse de sol ou foliaire est nécessaire tous les 3 ans dans le cas du manguiier. La fertilisation organique assure

l'apport des oligo-éléments nécessaires à l'équilibre nutritionnel des arbres et améliore la structure du sol. En cas d'apport trop tardif, la qualité de la production risque d'être fortement compromise avec des fruits peu sucrés et peu colorés avec un développement accru des cochenilles affectant ainsi le rendement (Amouroux *et al.*, 2009).

2.3.2. Méthodes d'estimation du rendement

2.3.2.1. Estimation empirique du rendement

Les données de rendement sont primordiales à la fois pour le producteur, les acteurs des filières et la recherche. Le problème pour les cultures pérennes réside dans l'intégration des variabilités entre les arbres pour estimer le rendement à l'échelle du verger.

Ainsi, la production de tous les arbres est difficilement mesurable en pratique, car il n'existe pas d'outils fiables pour le faire. La production individuelle d'un arbre varie à la fois en fonction de facteurs endogènes et exogènes. Cette variabilité de production entre les arbres impacte le rendement brut du verger qui est défini comme la somme de la production de tous les arbres qui le compose. Il se calcule selon la formule suivante (Sarron, 2019) :

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^N P_j}{A} \times 10^{-3} \quad (1)$$

où : Y est le rendement du verger (en t.ha⁻¹) ; N est le nombre d'arbres dans le verger ; P_j est la production de l'arbre j en kg et A est la surface productive du verger en ha.

Une autre façon d'estimer le rendement consiste à dénombrer tous les fruits dans l'arbre par un comptage visuel des fruits sur un pourcentage d'arbres sélectionnés aléatoirement (autour de 5 % des arbres sur des parcelles de 1 à 2 ha), suivi d'une extrapolation en multipliant le nombre moyen de fruits par arbre échantillonné par la densité de plantation d . Cette estimation est calculée selon la formule suivante :

$$\hat{Y} = \bar{P} \times d \times 10^{-3} \quad (2)$$

où \hat{Y} est le rendement estimé (en t.ha⁻¹) ; \bar{P} la production moyenne (en kg) et d la densité de plantation (en arbres.ha⁻¹).

Cette estimation réalisée par les producteurs est à la fois fastidieuse, peu fiable et repose sur la précision de l'observateur (Gongal *et al.*, 2015). De plus, elle ne prend pas en compte l'hétérogénéité structurale des arbres, la diversité des variétés observées, ainsi que les caractéristiques des vergers qui induisent la variabilité de production. À l'heure actuelle, très peu d'études se sont penchées sur les moyens statistiques ou les modèles fiables pour extrapoler

la production de l'échelle de l'arbre à l'échelle du verger. L'applicabilité de ces approches est particulièrement difficile en Afrique de l'Ouest où la qualité des statistiques agricoles est hétérogène et où les bases de données d'enquêtes terrain sont rarement disponibles (Anderson *et al.*, 2019).

2.3.2.2. Estimation du rendement par la modélisation

La modélisation qui est la conception d'un modèle, est couramment utilisée dans le domaine agricole pour mieux comprendre les liens complexes entre les actions humaines, le contexte pédoclimatique et les réponses de l'agroécosystème. Un modèle est une représentation ou une simplification du fonctionnement réel d'un système (Jeuffroy *et al.*, 2014).

Dans un objectif d'aide à la décision, les modèles permettent d'analyser de manière systémique les conséquences d'une modification de la conduite d'une culture et d'évaluer les risques associés à de telles modifications (Leroux, 2015). Au niveau, des arbres fruitiers, les modèles existants se focalisent sur une fonction particulière qui peut être soit l'interception de la lumière, soit le fonctionnement d'un organe (Stephan *et al.*, 2008 ; Nordey *et al.*, 2014b). Il existe peu de modèles intégratifs pour étudier la variabilité de rendements en fonction des pratiques et des conditions environnementales. Chez le manguier, un modèle de simulation de la croissance et du développement du manguier sur des cycles successifs et sur la croissance du fruit et du rendement est en cours de développement. Mais, à l'heure actuelle, ce modèle n'est pas utilisable car il a été calibré sur une seule variété de mangue. De plus, il nécessite la connaissance de l'architecture de l'arbre et ne permet pas d'avoir des données sur le rendement potentiel de l'arbre (Boudon *et al.*, 2020).

2.3.2.3. Estimation du rendement par analyse d'image

Ces dernières années, l'amélioration des algorithmes d'analyse d'image a permis le développement d'outils décrivant par exemple, le nombre de fruits, la structure des arbres et celles des vergers. Ces outils permettent d'améliorer grandement l'estimation empirique des rendements (Usha & Singh, 2013).

2.3.2.3.1. Détection des fruits dans des images d'arbres

Au cours de la dernière décennie, de nombreux outils ont été développés pour faciliter la détection, le dénombrement des fruits et l'estimation de la production, par analyse d'image à l'échelle des arbres (Gongal *et al.*, 2015). Parmi ces outils, différents systèmes de vision par ordinateur, caractérisés par un ou plusieurs capteurs, ont été associés à des algorithmes de traitement d'image (Stein *et al.*, 2016). Les capteurs couramment utilisés sont les caméras RVB

(Rouge, Vert, Bleu), multispectrales, hyperspectrales, et les LiDAR (Light Détection And Ranging). Certains systèmes basés sur des images RVB prises avec un appareil numérique permettent de détecter des mangues dans le houppier de l'arbre (Payne *et al.*, 2013).

D'autres systèmes de vision sont plus complexes et couplent des images avec des algorithmes de « machine learning » de type k-nearest neighbours (KNN) ou support vector machine (SVM) (Linker *et al.*, 2012 ; Qureshi *et al.*, 2017). Le « machine learning » se base sur l'apprentissage à partir de données d'entraînement. La phase d'apprentissage repose sur un algorithme d'apprentissage qui permet à une machine de recevoir des données d'entrée et d'effectuer une série de traitements. Une fois l'apprentissage terminé, la « machine » peut produire le résultat de façon autonome sur des données d'entrée qu'elle n'a encore jamais rencontrées (Toulon, 2018).

L'essor du « deep learning » en 2012 et le développement progressif de machines de calcul plus performantes, ont permis d'améliorer certaines techniques et de les rendre plus rapides et fiables (Toulon, 2018 ; Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Parmi ces techniques, les réseaux de neurones convolutifs (CNN, Figure 12) sont sans doute les plus utilisés pour l'analyse d'image, car ils permettent de traiter rapidement l'image par région et d'y détecter les objets d'intérêts. Ces dernières années, l'analyse d'image utilisant des CNN a prouvé son efficacité dans la détection, le comptage de fruits et l'estimation du rendement des arbres fruitiers (Ren *et al.*, 2015).

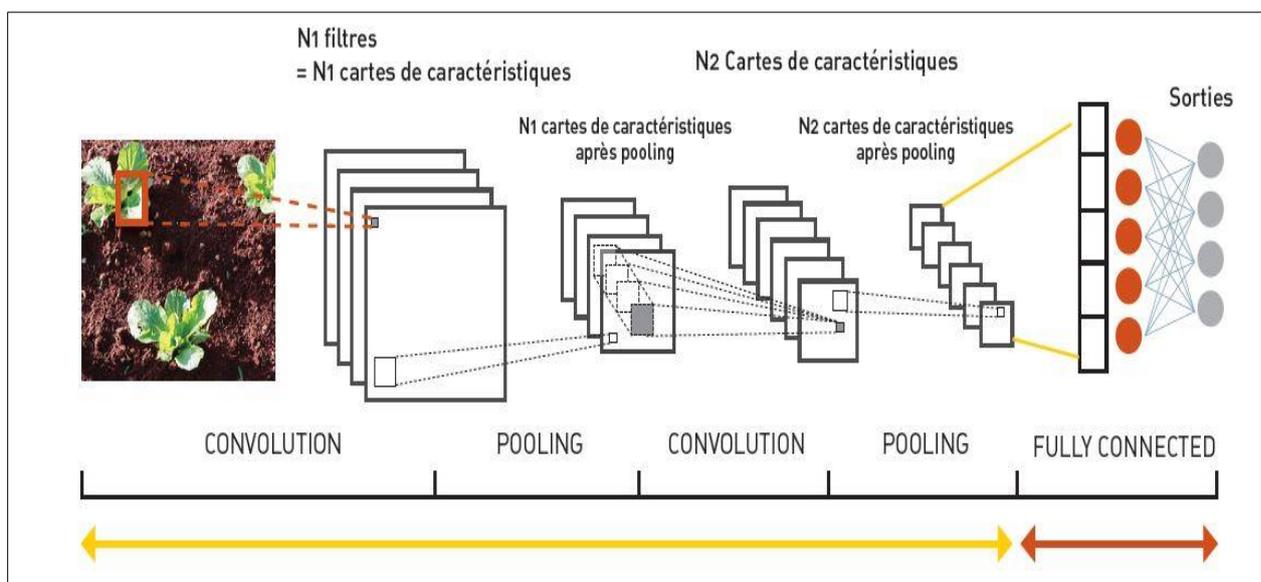


Figure 12 : Architecture simplifiée des réseaux de neurones convolutifs (Toulon, 2018)

2.3.2.3.2. Deep learning et analyse d'image

Le « deep learning » ou apprentissage profond est un sous-ensemble de l'apprentissage automatique en intelligence artificielle (IA) qui permet le traitement de données massives ou des images. Le « deep learning » est également connu sous le nom d'apprentissage neuronal profond ou de réseau neuronal profond. Il est conçu sur la base d'algorithmes, appelés réseaux de « neurones artificiels » à plusieurs couches (ou « convolutifs »). Les mots « deep » ou « profond » sont utilisés en référence au nombre de couches de neurones qui constituent ces réseaux. Plus le nombre de couches est grand, plus profond est le réseau qui permettra de traiter des problèmes complexes (Lecun, 2016).

Le « deep learning » est un assemblage de « neurones artificiels » qui s'inspirent du fonctionnement du neurone humain (Ghannay, 2017 ; Figure 13). Un neurone biologique est une cellule du système nerveux spécialisée dans la communication et le traitement d'informations. Il a pour rôle de faire circuler l'information entre l'environnement et l'organisme ou au sein de l'organisme (Panzoli, 2008).

Un neurone artificiel est une approximation mathématique et informatique d'un neurone biologique. Un réseau de neurones est l'association de plusieurs « neurones artificiels ». Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont l'un des algorithmes les plus utilisés pour l'apprentissage profond. Cet apprentissage consiste à effectuer des tâches de classification directement à partir d'images, de vidéos, de textes ou de sons. Les CNN sont utiles pour trouver des caractéristiques dans les images, afin de reconnaître des objets, des visages et des scènes en éliminant la nécessité d'une extraction manuelle des caractéristiques (Ghannay, 2017 ; Abu *et al.*, 2019). Un CNN peut comporter des dizaines ou des centaines de couches qui apprennent chacune à détecter différentes caractéristiques d'une image (Figure 14). La convolution consiste à faire glisser des filtres, qui sont des fenêtres sur les images pour faire ressortir de façon marquée certaines caractéristiques telles que la luminosité, le contour, la forme etc. (Toulon, 2018).

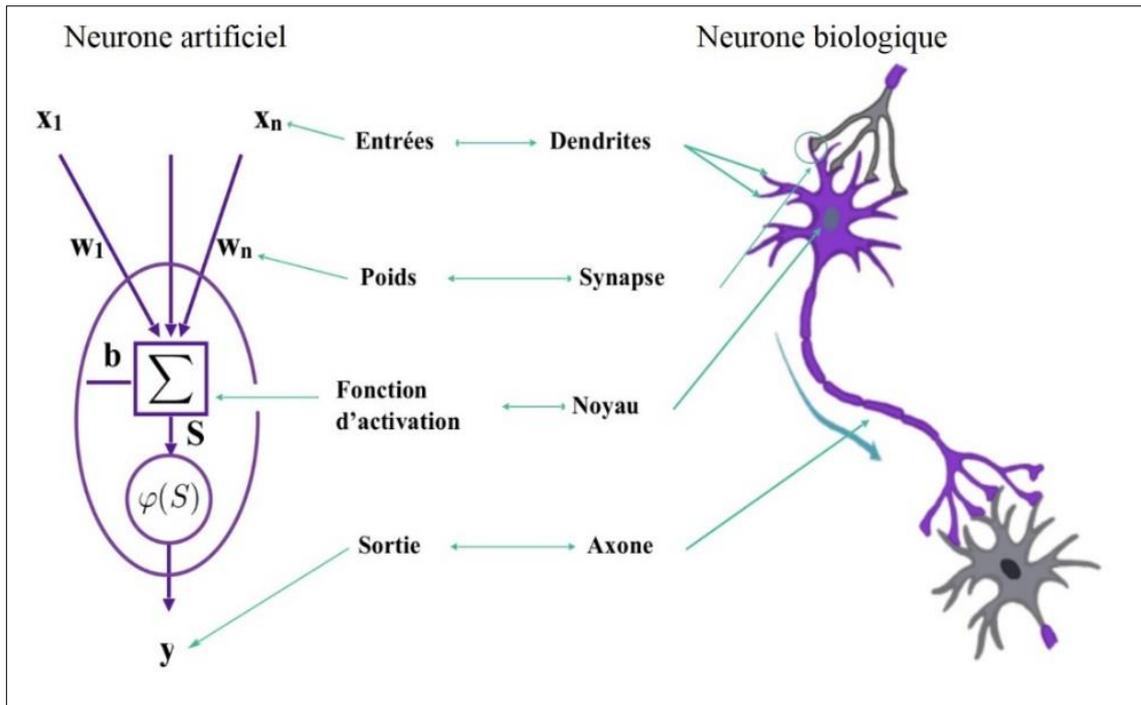


Figure 13 : Comparaison entre un neurone artificiel et un neurone biologique (Ghannay, 2017)

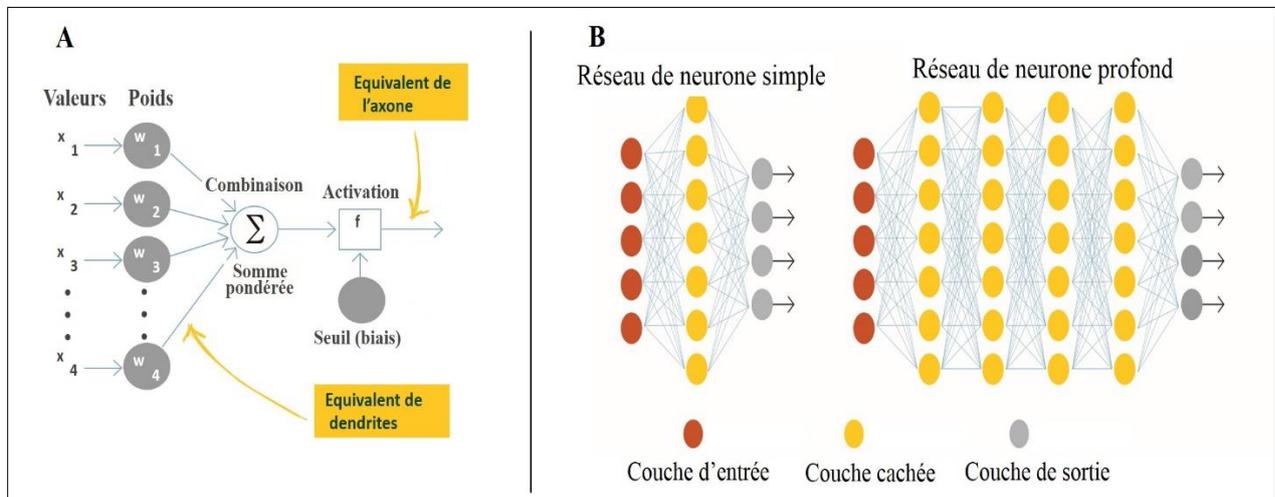


Figure 14 : Structure schématique des neurones artificiels
 (A) neurone artificiel simple ; (B) réseau de neurones (Toulon, 2018)

2.3.2.3.3. Mesure de la structure des arbres par drone

De nombreuses études ont montré la capacité du drone et des capteurs RVB à mesurer la structure des arbres (Lisein *et al.*, 2015 ; Birdal *et al.*, 2017 ; Nevalainen *et al.*, 2017). Cette mesure est permise par le développement de la photogrammétrie. La photogrammétrie est une technique qui permet de déterminer les dimensions et le volume des objets à partir de mesures effectuées sur des photographies. Elle est basée sur des algorithmes de structure-from-motion (SfM) à partir de collections d'images non ordonnées. Ainsi, l'analyse d'images drone permet de construire un nuage de points 3D et de calculer par extrapolation des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Les MNT sont ensuite utilisés pour extraire des informations sur la structure des arbres comme la hauteur, le volume ou la surface projetée du houppier (Díaz-Varela *et al.*, 2015 ; Birdal *et al.*, 2017). Plusieurs études ont démontré que la précision d'un drone avec un capteur RVB et des algorithmes de structure-from-motion, se rapprochent de la précision d'un LiDAR (Wallace *et al.*, 2016). La précision de ces données permet d'estimer le rendement des arbres (Jiménez-Brenes *et al.*, 2017 ; Sarron *et al.*, 2018). L'analyse d'images drone permet aussi d'étudier les variations de volume de la canopée avant et après les pratiques de taille. L'outil drone reste un moyen très précis pour caractériser la structure des arbres du verger et leur rendement, mais nécessite un traitement long et coûteux en ressources informatiques. Aussi, le drone est encore peu utilisé et accessible pour la majorité des producteurs, ce qui restreint son utilisation.

Deuxième partie :
MATERIEL ET METHODES

Chapitre 3 : Zone d'étude

3.1. Situation géographique

Le district des savanes (entre $8^{\circ}30'$ - $10^{\circ}30'$ N et 4° - 7° O) est situé au Nord de la Côte d'Ivoire, avec pour capitale régionale la ville de Korhogo, distant d'environ 648 km d'Abidjan. Le district a été divisé en trois régions (Poro, Bagoué et Tchologo) et dix départements (Korhogo, M'bengué, Sinématiali, Dikodougou, Ferkessédougou, Kong, Ouangolodougou, Boundiali, Kouto et Tengrela). Il dispose d'un important réservoir de main d'œuvre qui est un atout au service de son développement (Sib, 2013 ; Aiwa, 2015). A l'image de l'ensemble des régions de la Côte d'Ivoire, son économie est basée essentiellement sur l'agriculture (Dro *et al.*, 2013 ; Konan *et al.*, 2017). Dans ce district, seule la région du Poro (entre 8° - 10° N et 4° - 6° O), la plus grande zone de production de mangues du pays, a été retenue pour la conduite de l'étude. Les départements de Korhogo et Sinématiali, les plus représentatifs en production de mangues dans cette région, ont été retenus pour abriter les vergers qui ont été suivis. Quinze et six vergers ont été suivis respectivement dans les départements de Korhogo et de Sinématiali (Figure 15).

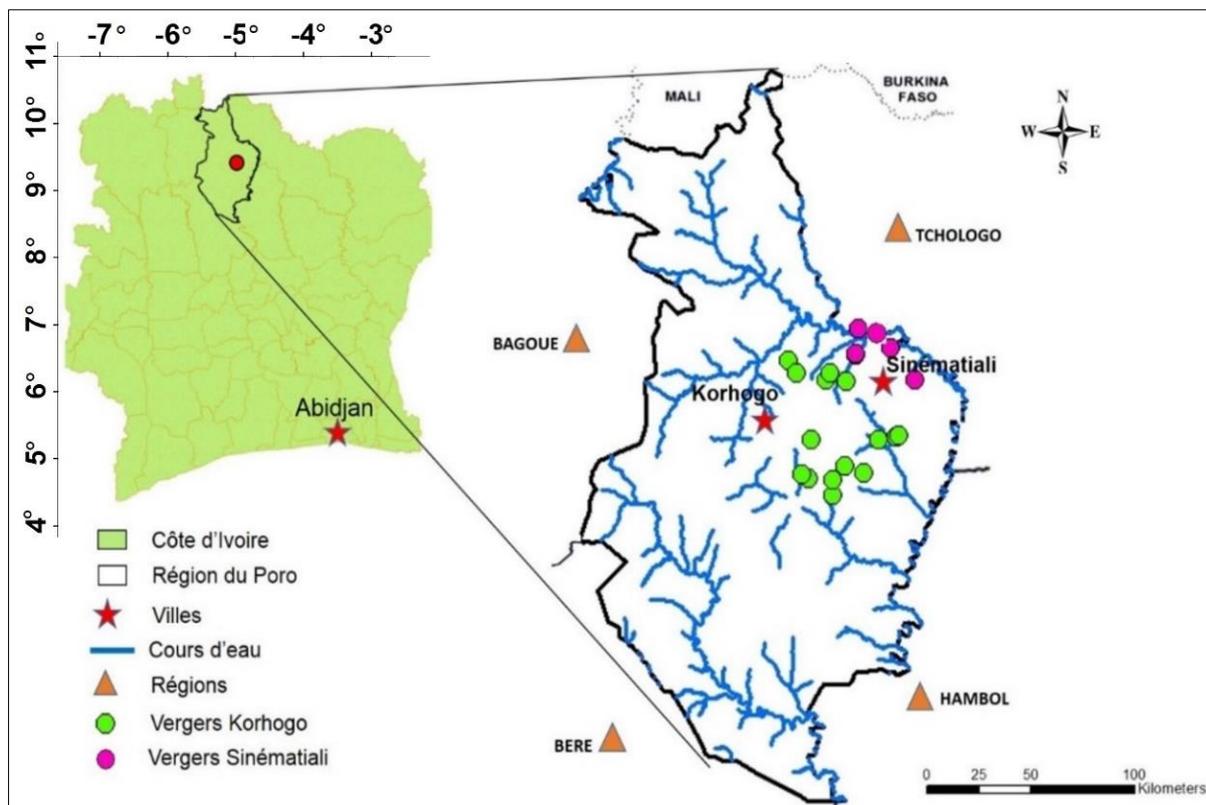


Figure 15 : Localisation des vergers sélectionnés pour l'étude dans la région du Poro

3.2. Climat

La région du Poro a un climat tropical soudanais avec deux saisons : une saison sèche de Novembre à Avril et ponctuée par l'harmattan, et une saison pluvieuse, de Mai à Octobre. La pluviométrie annuelle moyenne est de 1 400 mm en année humide et de 1 000 mm en année sèche (Djaha *et al.*, 2014 ; Aïwa, 2015). La température moyenne annuelle varie entre 24 °C et 31 °C. Les amplitudes thermiques quotidiennes et annuelles y sont relativement importantes, de l'ordre de 20 °C. Le taux d'humidité, inférieur à celui du sud du pays est d'environ 40 %. Le climat dont jouit cette région est propice à la culture du manguier (Aïwa, 2015).

3.3. Hydrographie

Au plan hydrographique, la région est traversée par un important fleuve, le Bandama Blanc, le principal cours d'eau, avec ses affluents que sont la Bou, le Badenou, le Solomougou, le Lokpoho, etc. (Zagbaï *et al.*, 2006). Ces différents affluents ont un fonctionnement permanent et sont alimentés par de nombreuses petites rivières qui coulent de temps à. Ces nombreux cours d'eaux servent à l'irrigation des cultures maraichères et contribuent au développement agricole de la région autre (Diarrassouba *et al.*, 2014).

3.4. Végétation et relief

La région du Poro est située dans une zone de savanes et de forêts claires qui permettent à la culture du manguier de tirer profit d'une zone chaude et sèche (Konan *et al.*, 2017). Elle se caractérise par des arbres et arbustes d'une hauteur comprise entre 8 et 12 m et disséminés avec une densité de couvert de l'ordre de 25 à 35 %. Une zone moins dense en végétation s'étend au Nord de l'axe Korhogo-Ferkessédougou avec comme limite le fleuve Bandama blanc. Le paysage végétal, parsemé de périmètres agricoles de coton, de vivriers, d'arboriculture et de jachères, est rarissime à certains endroits, compte tenu de l'importance de la transhumance du bétail (Koné *et al.*, 2007).

La région se présente comme un vaste plateau avec des altitudes comprises entre 300 et 400 m. Ce plateau est assez monotone dans l'ensemble, sauf à certains endroits où cette monotonie est rompue par des inselbergs dont le plus connu est le mont Korhogo qui culmine à 567 m d'altitude (Dro *et al.*, 2013).

3.5. Sol

La région du Poro est caractérisée par une association de sols ferrallitiques, formés sur des roches basiques moyennement à fortement désaturés (Djaha *et al.*, 2014). Le granite et les schistes sont les roches mères caractéristiques du substrat de la région. Les sols sont en général peu humifères et de fertilité moyenne (Zagbaï *et al.*, 2006). En s'altérant, la roche mère a donné naissance à différents types de sols (Kouakou, 1995) :

- des sols à texture argilo-sableuse, de couleur rouge où affleurent souvent des gravillons et des cuirasses sur les plateaux et les hauts de pentes ;
- des sols de couleur jaune-ocre qui présentent des carapaces au niveau inférieur sur les pentes ;
- des sols argilo-sableux alluvionnaires ou hydromorphes sont de couleur beige dans les vallées. Il existe également des sols gris pseudogley (sol temporairement gorgé d'eau) et gley (sol plus ou moins compact et gorgé d'eau).

3.6. Population

La région du Poro occupe une superficie de 13 400 km² pour une population de 763 852 habitants (RGPH, 2014). La population est constituée par les groupes socioculturels Voltaïque (Gour) et les Mandés. Le premier est représenté par les Sénoufo, essentiellement cultivateurs et le second par les Malinké, des commerçants. La région est aussi habitée de personnes issues de divers autres groupes socioculturels du pays et de la sous-région (Zagbaï *et al.*, 2006). Cette région possède un capital humain important, fondé sur la réputation du peuple Senoufo présenté comme un peuple « courageux, laborieux, amoureux et passionné de la terre ». Ce qui constitue un atout indéniable pour le développement de toute activité agricole en général. La culture de la mangue y était une activité des citoyens aisés, des cadres, des fonctionnaires et des responsables politiques, pour approvisionner le marché abidjanais. Elle s'est répandue chez les populations rurales au début des années 1990 (Konan *et al.*, 2017).

L'analyse des atouts naturels et humains dénote que la région du Poro bénéficie de conditions favorables aux activités agricoles, qui constituent la principale activité de la région.

3.7. Activités agricoles

Plusieurs cultures autres que celle de la mangue constituent une source de revenus non négligeable pour les populations de la région du Poro. On y trouve les cultures de rente comme le coton et l'anacarde. Ces deux cultures représentent les principales sources de revenus des populations de la région (Kouamé & Sinan, 2016 ; Doukouré & Kodjo, 2018).

Leur culture contribue à la réduction de la pauvreté, à la création d'emplois et à l'amélioration de la santé des populations (Aïwa, 2015). Le maïs et le riz constituent les principales cultures familiales de la région. L'arachide prend une place de plus en plus importante dans la région. L'igname est peu cultivée dans la région pour des raisons d'infertilité des sols. Le maraîchage est cultivé dans les bas-fonds périurbains de la région. Cette activité est le plus souvent celle des femmes, mais aussi des jeunes hommes des villages proches des barrages. Il s'agit de cultures de contre-saison avec l'oignon, la tomate, le piment, le gombo, les aubergines etc. (Sib, 2013 ; De Bon *et al.*, 2019).

Chapitre 4 : Matériel et méthodes

4.1. Matériel

4.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est le manguier (*Mangifera indica* L.), de la variété 'Kent' (Figure 16). Cette variété est la plus demandée parmi celles destinées à l'exportation en raison de sa belle coloration, sa durée de conservation élevée, ses bonnes qualités nutritionnelles et organoleptiques.



Figure 16 : Matériel végétal utilisé
A) Manguier, variété 'Kent' ; B) fruit

4.1.2. Matériel technique

Le matériel technique est constitué essentiellement de :

- pied à coulisse (Modèle Vernier Caliper, précision 0,02 mm) pour mesurer les dimensions du fruit (longueur, la largeur) ;
- balance de précision (Modèle PPS2102C, précision 0,01g) pour les opérations de peser;
- échelle de couleur pour évaluer la couleur de l'épiderme de la mangue Kent ;
- réfractomètre de paillasse (Modèle Atago RX-5000, précision 0,01 %) pour déterminer la teneur en sucre de la pulpe de mangue ;
- étuve (Binder, modèle E 115 Germany ; Tension : 220V 50/60Hz ; Courant : 7, 27A ; Puissance : 1,6 kw) pour secher la pulpe de mangue ;

- appareil photo numérique (Sony Nex-7 RGB Sony Corporation, New York, États-Unis) pour les prises de vue des fruits sur le terrain et au laboratoire ;
- smartphone (Techno camon 12 Air, modèle CC6, 16 mégapixels, Chine) pour les prises de vue des manguiers sur le terrain
- G.P.S (Global Positioning System) pour géoréférencer les vergers et les arbres sélectionnés ;
- drone commercial (quadricoptère, drone Mavic Pro de DJI, DJI Inc., Shenzhen, Chine) pour cartographier les vergers ;
- bombes de peinture pour marquer le tronc des manguiers choisis ;
- décamètre pour mesurer les dimensions des manguiers ;
- règle en bois gradué pour déterminer la hauteur des manguiers
- ardoise plastique pour inscrire le numéro du verger, de l'arbre et un identifiant de la face pour identifier chaque manguiers ;
- marqueurs pour écrire sur l'ardoise plastique ;
- compteurs manuels pour compter les fruits dans chaque manguiers.

4.2. Méthodes

4.2.1. Détermination d'un intervalle de temps entre la floraison et la récolte pour estimer la maturité physiologique de la mangue de la variété 'Kent'

4.2.1.1. Echantillonnage des fruits

Dans le but de déterminer un intervalle de temps entre la floraison et la récolte qui garantit un bon mûrissement des mangues de la variété 'Kent', des échantillonnages ont été effectués à différentes périodes du développement des fruits, dans un verger situé à Lavononkaha (09°38'N et 5°56'O), à 8 km de Korhogo. Le verger a une superficie de 10 ha, sa densité est de 100 arbres.ha⁻¹. Dans ce verger, une parcelle de 2 ha a été délimitée et 15 arbres ont été choisis aléatoirement. Mille six cents quarante-cinq (1 645) inflorescences ont été sélectionnées et étiquetées dans le houppier de ces 15 manguiers, entre 1,5 et 2 m du sol, lors de l'apparition de la fleur terminale. Deux cent quarante (240) mangues issues de ces inflorescences ont été récoltées en Avril 2019, aux 90^{ème}, 95^{ème}, 100^{ème} et 105^{ème} jours après l'ouverture de la fleur terminale, à raison de 60 mangues par période de récolte. Selon Mukherjee et Litz (2009), les mangues récoltées à moins de 90 jours après la floraison sont en générale immatures et la durée floraison-récolte est comprise entre 3 et 6 mois selon la variété et les conditions climatiques. A chaque récolte, ces mangues ont été acheminées au laboratoire de la Station du Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Lataha pour des analyses morphologiques et physico-chimiques.

4.2.1.2. Mesures morpho-physiques effectuées sur les mangues

4.2.1.2.1. Evaluation de la couleur de l'épiderme de la mangue

Des mesures morphologiques, physico-chimiques et des observations ont été effectuées à la récolte, sur la moitié des mangues. La seconde moitié a été conservée (Figure 17) dans une salle bien aérée à $28,8 \pm 1,2$ °C, jusqu'à ce que leurs épidermes atteignent une couleur jaune rougeâtre notée selon l'échelle de la Société Internationale d'Importation de Mangue, SIIM (Figure 18).



Figure 17 : Mangues étiquetées et conservées pour le mûrissement

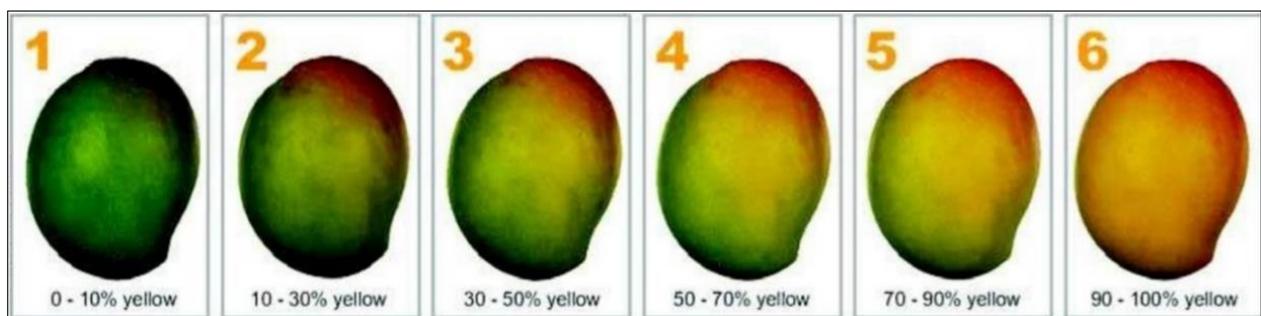


Figure 18 : Grille d'évaluation de la couleur de l'épiderme de la mangue 'Kent' (Echelle SIIM)

4.4.1.2.2. Morphologie des mangues

Les variables considérées dans l'appréciation de la morphologie de la mangue ont été la longueur, la largeur, la circonférence et la masse de la mangue (Figure 19). Les mesures de la longueur, de la largeur et de la circonférence ont été effectuées au moyen d'un pied à coulisse et d'un ruban mètre. La masse de la mangue a été pesée avec une balance de précision.

4.2.1.2.3. Volume et masse volumique des mangues

La méthode d'approche des volumes des cylindres a été utilisée pour estimer le volume de 30 mangues à chaque intervalle de temps, entre la floraison et la récolte. Le fruit est assimilé à un cylindre comme le montre la Figure 19 (Sa'ad *et al.*, 2015). Le volume et la masse volumique de la mangue ont été évalués en utilisant les formules ci-dessous :

$$V (cm^3) = \pi r^2 h \quad (3)$$

Avec :

V = volume de mangue estimé

r = rayon

h = hauteur

$$\rho (g/cm^3) = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Avec :

ρ = masse volumique

V = volume de mangue estimé

m = masse de la masse

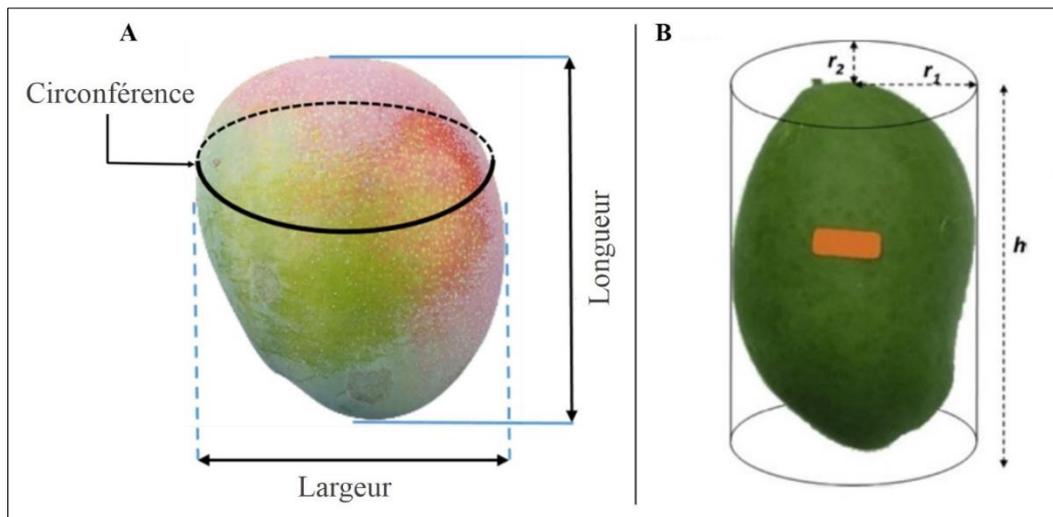


Figure 19 : Mesures morpho-physiques des mangues
A) Mesure des dimensions, B) mesure du volume des mangues

4.2.1.2.4. Test de flottaison des mangues

Un test de flottaison a été effectué sur chaque mangue dans un récipient (Figure 20). Ce test a consisté à plonger chaque mangue dans le récipient et à noter si la mangue flotte ou coule. A l'issue de ce test, le taux de flottaison des mangues de chaque récolte a été calculé.

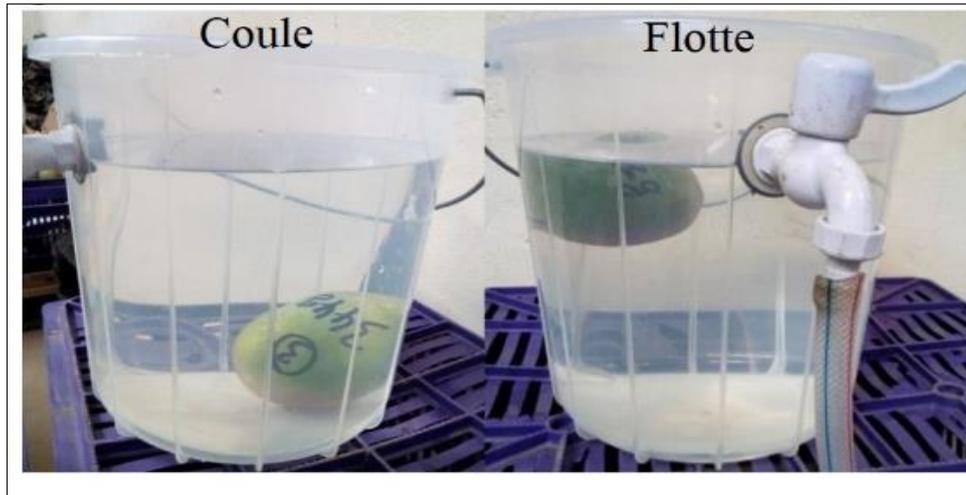


Figure 20 : Test de flottaison des mangues

4.2.1.2.5. Temps de mûrissement, taux de perte de masse et aspect de la peau des mangues

Le temps de mûrissement (en jours) a été déterminé sur chaque lot de mangues stocké à la température ambiante ($28,8 \pm 1,2$ °C) depuis la récolte jusqu'à ce que les mangues aient une couleur jaune à jaune orangée, avec un ramollissement de la pulpe (Figure 21). La durée moyenne de mûrissement de chaque récolte a été calculée à partir des durées de mûrissement de la première à la dernière mangue mûre. La masse de chaque mangue a été déterminée à la récolte et après mûrissement à l'aide d'une balance de précision. Le taux de perte de masse a été calculé selon la formule 5. L'aspect ridé ou non ridé de l'épiderme des mangues a été noté par observation à la fin du mûrissement (Vannière *et al.*, 2013).



Figure 21 : Mangues mûres, variété 'Kent'

$$Pm (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (5)$$

Avec :

Pm = perte de masse

m_i = masse de la mangue à la récolte, avant mûrissement

m_f = masse de la mangue après mûrissement

4.2.1.3. Mesures physico-chimiques des mangues

4.2.1.3.1. Teneur en sucres solubles à la récolte et après le mûrissement

La teneur en sucres solubles a été évaluée sur chacune des 30 mangues à chaque récolte (Brix 1) et lorsque celles-ci atteignaient le mûrissement (Brix 2) après la conservation à température ambiante. Cette teneur en sucres de la pulpe a été déterminée par un réfractomètre de paillasse exprimée en degré Brix (Diakabana *et al.*, 2013). Chaque mangue a été placée, épaule dorsale vers le manipulateur et une section longitudinale effleurant le noyau a été faite sur le côté droit du pédoncule à l'apex (Figure 22). A l'aide d'un petit couteau, toute la surface de la pulpe des deux tranches de mangue a été raclée délicatement, de façon à obtenir une pâte de mélange représentative de toute la pulpe. La pâte obtenue a été pressée dans un morceau de tissu blanc et le degré Brix a été mesuré directement sur 2 à 3 gouttes du jus déposées sur le prisme du réfractomètre (Tasie *et al.*, 2020). Trois mesures sont effectuées pour chaque mangue.

4.2.1.3.2. Taux de matière sèche à la récolte et après le mûrissement

Pour déterminer la matière sèche, les pulpes des mangues utilisées pour la détermination du taux de sucres solubles ont été épluchées, fendues en tranches sur toute la longueur de la mangue, de façon à représenter l'ensemble de celle-ci. Ces tranches ont été découpées en petits cubes (Figure 22) et mélangées harmonieusement. Vingt (20) à 30 g de ce mélange ont été prélevés puis séchés à l'étuve à 75° C, dans du papier aluminium pendant 3 jours. Le taux de matière sèche a été obtenu en appliquant la formule ci-dessous (Saranwong *et al.*, 2004) :

$$MS (\%) = \frac{m_f - m_a}{m_e} \times 100 \quad (6)$$

Avec :

MS = taux de matière sèche de la mangue

m_f = masse finale obtenue après séchage, c'est-à-dire la masse du papier aluminium et la masse de l'échantillon mis à l'étuve (en g)

m_a = masse du papier aluminium (en g)

m_e = masse de l'échantillon frais placé dans du papier aluminium avant étuvage (en g)

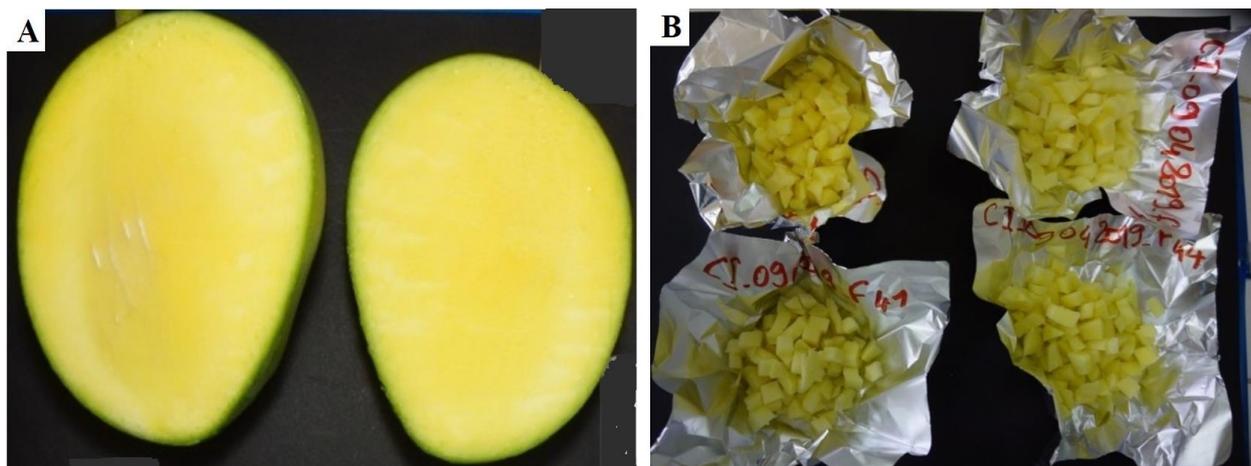


Figure 22 : Mangue sectionnée et pulpe découpée, variété ‘Kent’
 A) Section longitudinale d’une mangue, B) pulpe découpée pour le séchage à l’étude

4.2.2. Développement d’un outil d’estimation du rendement du manguiier à l’échelle de l’arbre par analyse d’image assistée par modèle

4.2.2.1. Sélection des vergers de manguiiers

Dans le but de mettre au point des méthodes précises et fiables pour estimer le rendement des vergers de manguiier par analyse d’image, une étude a été réalisée dans 21 vergers (Figure 23 et Tableau II) de manguiiers, variété ‘Kent’ dans les départements de Korhogo et de Sinématiali. Ces départements sont les plus représentatifs du système de production de la région du Poro. Les vergers choisis sont âgés de 11 à 43 ans. Pour des raisons pratiques, les vergers ont été sélectionnés au bord des pistes afin d’en faciliter l’accès. Les 21 vergers ont été choisis selon les critères ci-dessous:

- être situé dans une zone de production importante de mangue ;
- posséder des manguiiers en âge de produire ;
- être accessible en toute saison ;
- avoir une superficie de 2 ha minimum ;
- être distant d’au moins 500 m à 1 km d’un autre verger suivi.

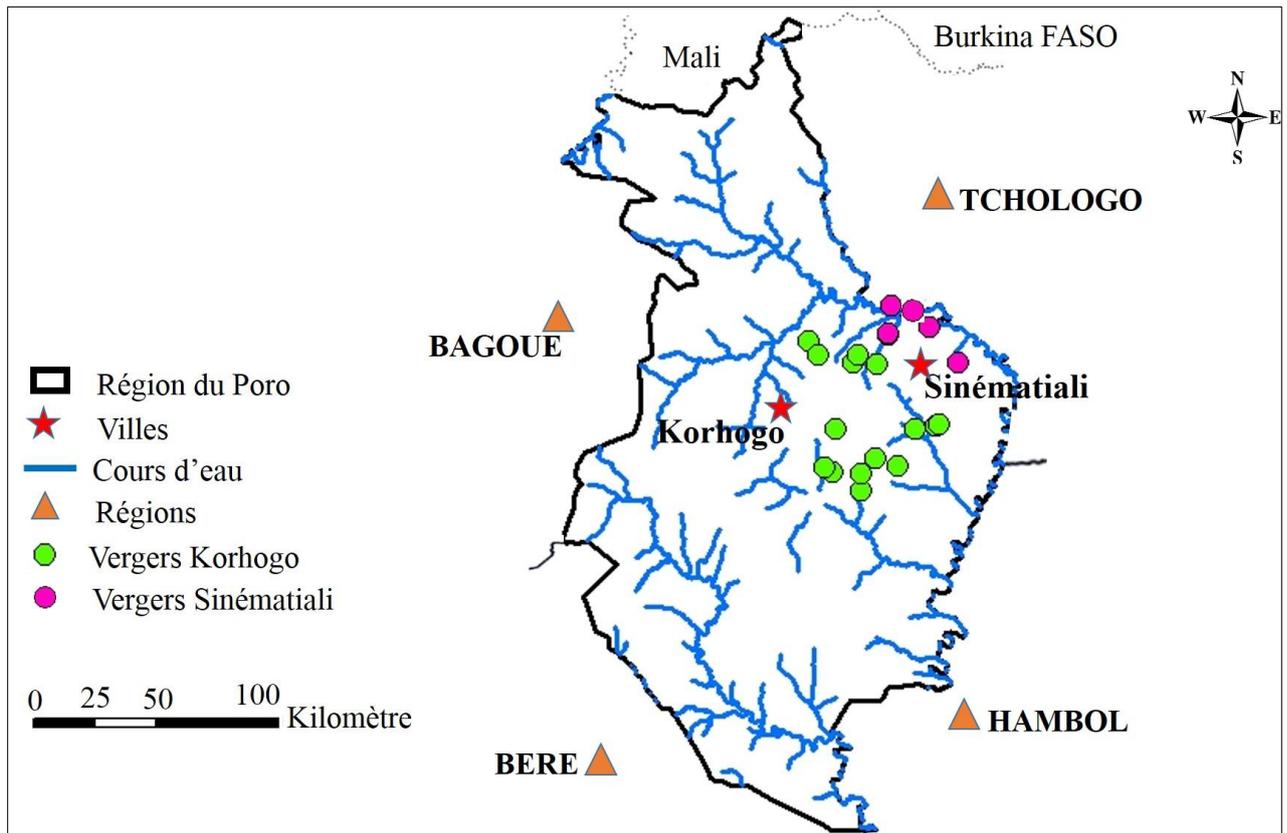


Figure 23 : Répartition des vergers sélectionnés dans la région du Poro

Tableau II : Description des vergers sélectionnés

Département	Verger	Localité/Village	Superficie (ha)	Densité/ha (nombre d'arbres)	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Variétés cultivées
Korhogo	V1	Kohotiéri	7	98	05°60.930'	09°61.736'	283	Kent
	V2	Lavononkaha	10	98	05°56.140'	09°38.218'	310	Kent, Amélie
	V3	Olleo	5	99	05°76.447'	09°66.938'	303	Kent, Mangos
	V4	Sohouo	10	80	05°66.172'	09°61.886'	267	Kent, Amélie, Mangos
	V5	Tawara	7	97	05°65.230'	09°63.728'	295	Kent
	V6	Kokaha	10	100	05°74.025'	09°63.629'	307	Kent
	V7	Nahoualakaha	7	87	05°64.506'	09°32.241'	266	Kent
	V8	Tioro	5	98	05°64.350'	09°36.411'	273	Kent
	V9	Dierissonkaha	5	98	05°52.332'	09°46.678'	257	Kent, Amélie
	V10	Dandjokaha	10	81	05°61.454'	09°39.999'	300	Kent
	V11	Sissian	10	99	05°70.883'	09°36.748'	304	Kent, Mangos
	V12	Sissian	27	91	05°72.817'	09°37.739'	299	Kent
	V13	Kassounavogo	5	99	05°70.297'	09°46.732'	302	Kent
	V14	Latiéné	35	98	05°47.561'	09°47.168'	283	Kent
	V15	Zimékaha	8	100	05°46.859'	09°47.850'	293	Kent
Sinématiali	V16	Sinématiali	6,5	97	05°20.816'	09°36.445'	336	Kent
	V17	Sinématiali	8	90	05°26.426'	09°36.286'	359	Kent
	V18	Sinématiali	10,5	98	05°21.016'	09°35.286'	374	Kent
	V19	Danankaha	6,6	153	05°28.078'	09°37.536'	345	Kent
	V20	Sinématiali	16	99	05°24.142'	09°35.853'	353	Kent
	V21	Sinématiali	3,5	99	05°20.568'	09°36.367'	357	Kent

4.2.2.2. Collecte de données

4.2.2.2.1. Prise d'image pour le dénombrement des fruits de l'arbre

Dans chaque verger, 10 arbres de taille variable (petits, moyens et grands) ont été choisis dans des parcelles de 2 ha bien délimitées. Ces arbres (Figure 24) ont été répartis dans la parcelle de sorte à être représentatifs de la structure des arbres observés dans la zone. Lorsqu'une grande variabilité structurale est observée dans un verger, la taille de l'échantillon a été doublée et 20 arbres sont retenus pour mieux capter l'hétérogénéité de ces vergers au niveau des arbres suivis. Un total de 230 arbres a été ainsi choisi des 21 vergers sélectionnés. Pour estimer le nombre de fruits par arbre, un dispositif de prise d'images a été mis en place (Sarron, 2019). Les arbres ont été photographiés sur deux faces opposées, à une distance fixe (2, 5, 10 ou 15 m selon les dimensions de l'arbre) afin de capter l'intégralité du houppier. La prise de vue (Figure 25) a été réalisée avec un appareil photo numérique classique de résolution 24 mégapixels, en 2019 et avec un smartphone de résolution 16 mégapixels, en 2020. Une ardoise plastique comportant le numéro du verger et de l'arbre a été posée de part et d'autre de chaque manguier, pendant les prises de vue, pour l'identification des faces du manguier. Cet identifiant unique pour chaque image a permis de faire la jointure avec les autres données disponibles (verger, rendement, structure, etc.). Sur les 230 arbres, les deux images ont été prises au stade fruit mature, soit 1 à 2 semaines avant les récoltes de 2019 et de 2020. Un total de 920 images a donc été pris. L'orientation des faces à photographier a été choisie de manière à correspondre à l'angle où l'arbre était le moins mêlé aux branches des arbres voisins. Pour les deux années, le même angle de prise de vue et la même distance arbre/opérateur ont été maintenus.

4.2.2.2.2. Mesure des dimensions des arbres

Des mesures de la structure des 230 arbres ont été réalisées en 2019. La hauteur de l'arbre (du sol à la dernière feuille), la hauteur du tronc (du sol à la première branche/ramification), la circonférence du tronc (à 30 cm du sol) et les envergures des houppiers (direction Nord-Sud et Est-Ouest) ont été déterminés en mètre (m). Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un mètre ruban, d'un décamètre et d'une règle en bois graduée. Ainsi, l'effet des variables de structure de l'arbre sur la production de chaque arbre a été analysé en calculant les corrélations entre chaque paire de variables. Aussi, la charge en fruits (en nombre de fruits.m⁻³) de l'arbre a été calculée en divisant la production de l'arbre par le volume de sa canopée.

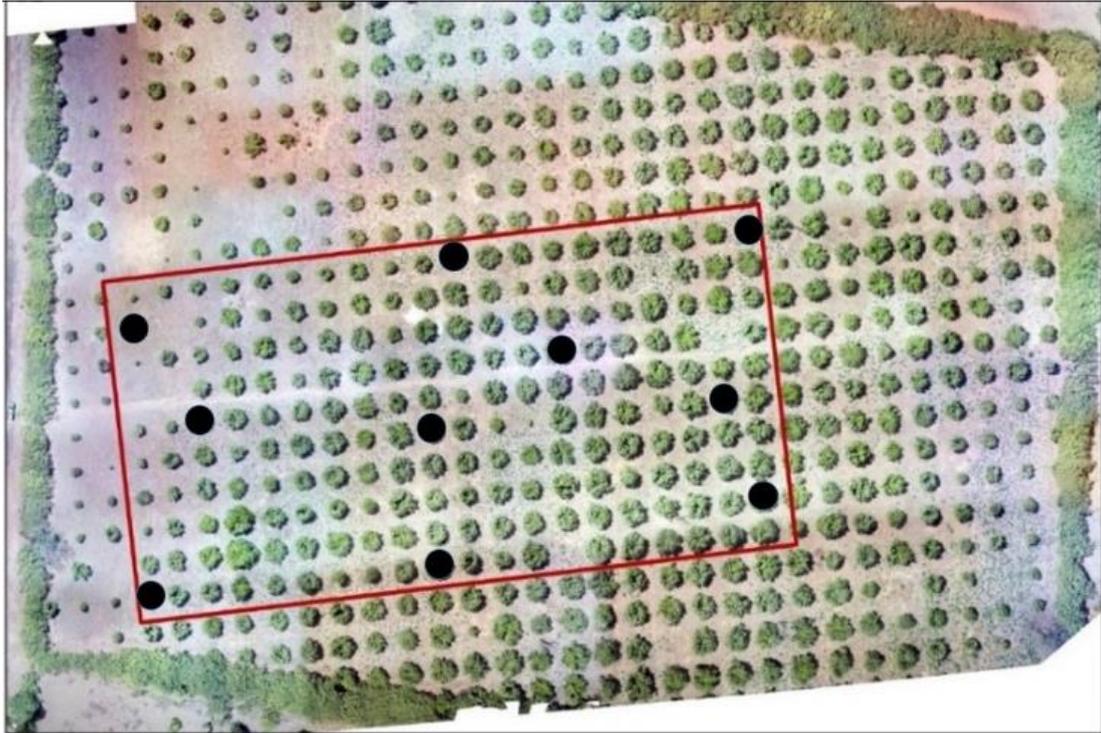


Figure 24 : Vue aérienne d'un verger avec les arbres échantillonnés
L'encadré rouge représente la parcelle délimitée et les ronds noirs, les arbres échantillonnés

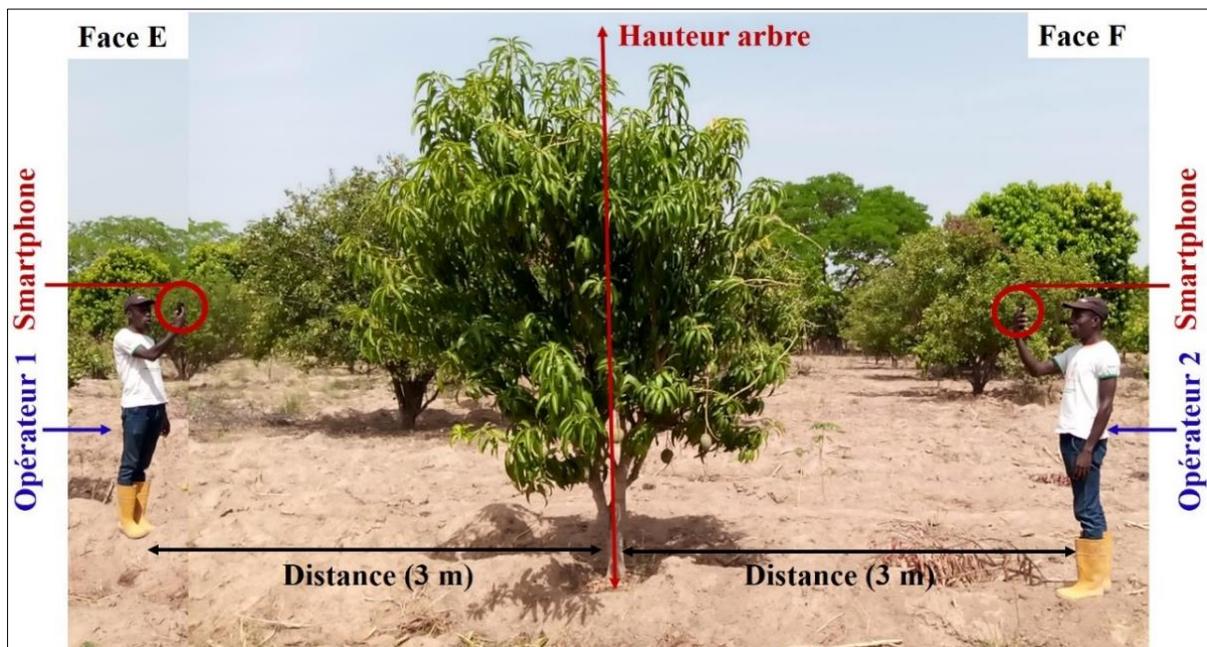


Figure 25 : Prise d'images pour le suivi de la production des arbres

4.2.2.3. Détection de mangues par le réseau de neurones (Faster R-CNN)

4.2.2.3.1. Entraînement et paramétrage du réseau

Pour détecter les fruits dans l'arbre sur chaque image précédemment prise, un réseau de neurones de convolution appelé Faster R-CNN a été utilisé (Ren *et al.*, 2015). Ce réseau nécessite la construction d'une base de données labellisée (fruits détectés dans des boîtes englobantes) utilisée dans une phase d'entraînement. Le Faster R-CNN est un réseau qui détecte des régions d'intérêt sur l'image, il apprend à partir d'annotations sous forme de boîtes englobantes (Figure 26). Les boîtes englobantes sont créées manuellement par des annotateurs experts. Les annotateurs repèrent chaque fruit sur l'image, l'entourent et exportent un fichier .txt contenant les coordonnées des boîtes de l'image et leur taille (Borianne *et al.*, 2019).

Le réseau de neurones a été spécifiquement entraîné pour reconnaître les fruits dans les images des manguiers dans la région du Poro, à partir de 29 000 annotations réalisées par un annotateur sur un lot de 426 images de manguiers prises en 2019. L'entraînement a consisté à spécialiser le réseau pré-entraîné à la détection d'objets divers et variés tels que les chiens, les chats, les voitures, etc. à la détection des mangues. Cette technique est appelée le fine-tuning d'un réseau pré-entraîné. Il s'agit d'optimiser par itérations successives, le paramétrage interne du réseau à partir des données d'entraînement pour qu'il se spécialise à la reconnaissance des mangues. Pour choisir le meilleur paramétrage, l'indicateur statistique appelé F1-score ou F-mesure a été utilisé (Simonnet, 2019). La variable F1-score exprime la capacité du réseau à détecter les mangues dans l'image. Elle détermine l'efficacité globale du réseau et permet d'estimer la contribution des Faux Positifs (FP) et des Faux Négatifs (FN) dans l'erreur globale du réseau. Les FP correspondent soit à des objets qui ne sont pas des mangues mais qui sont détectés comme des mangues (erreur du réseau), soit à des mangues détectées par le réseau mais non annotées par l'annotateur (erreur d'annotation). Les FN sont des mangues annotées par l'expert et non détectées par le réseau (Borianne *et al.*, 2019).

Le comportement du réseau entraîné avec 60 000 itérations sur son propre jeu d'entraînement a été évalué. L'idée était d'identifier le moment où le réseau n'apprend plus, c'est-à-dire lorsqu'on observe une stabilité des indicateurs. Une étape de validation a été réalisée pour évaluer la stabilité du réseau entraîné. Une fois le réseau entraîné et validé, toutes les images (un total de 920 pour les années 2019 et 2020) ont été analysées par le Faster R-CNN permettant de détecter les mangues présentes dans les images avec une marge d'erreur connue.

Du fait de la structure spatiale du houppier, il est souvent impossible de photographier tous les fruits de l'arbre avec deux images (fruits non visibles sur l'image). De plus, les deux images peuvent parfois contenir le même fruit (petits arbres) ou des fruits d'arbres voisins, non voulus car n'appartenant pas à l'arbre ciblé. Ces fruits peuvent venir d'autres arbres d'arrière-plan ou être des fruits tombés par terre. Pour limiter les erreurs de détection, l'arbre d'intérêt a été recadré et des masques ont été appliqués sur toutes les images pour retirer les fruits exogènes (Figure 26). Un modèle correctif a été utilisé par la suite pour corriger le nombre de fruits détectés par le réseau de neurones (comptage automatique) et estimer le nombre de fruits réellement contenu dans l'arbre (Linker, 2017).

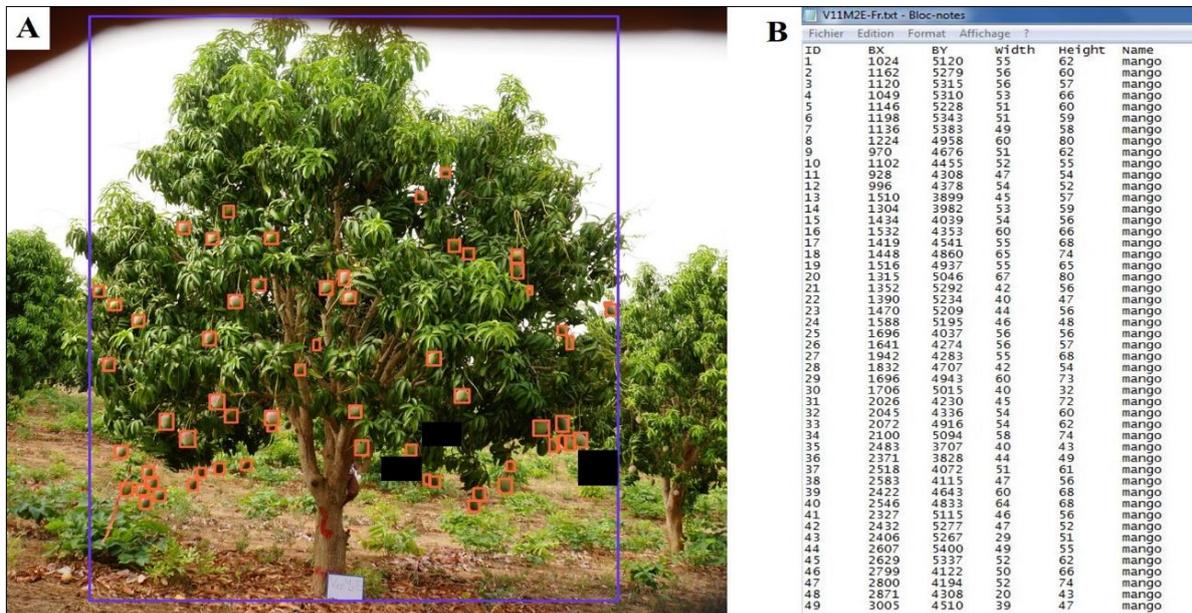


Figure 26 : Annotations des mangues et sortie des coordonnées et des dimensions des boîtes englobantes

(A) Annotations manuelles des mangues, (B) coordonnées et dimensions des boîtes englobantes

L'encadré bleu représente l'arbre d'intérêt, les encadrés orange ou boîtes englobantes représentent les fruits annotés et les encadrés noir représentent les fruits exogènes

4.2.2.3.2. Evaluation des performances du réseau de neurones

La capacité du réseau à détecter avec précision tous les fruits présents sur l'image tout en limitant les erreurs, a été évaluée. Les détections du réseau ont été comparées aux annotations réalisées sur 426 images prises en 2019. Ces comparaisons ont permis de déterminer le nombre de Vrai Positif (VP), de Faux Positif (FP) et de Faux Négatif (FN). Les VP sont des mangues annotées par l'expert et correctement détectées par le réseau. A partir des valeurs des VP, FP et FN calculées sur chaque image annotée en 2019, les indicateurs statistiques tels que les variables 'précision, rappel et F1-score' ont été déterminées selon les formules 7, 8 et 9 pour

évaluer les performances du réseau (Qureshi *et al.*, 2017 ; Borianne *et al.*, 2019 ; Sarron *et al.*, 2020) :

$$\text{précision} = \frac{VP}{VP+FP} \quad (7)$$

$$\text{rappel} = \frac{VP}{VP+FN} \quad (8)$$

$$\text{F1 - score} = 2 \times \frac{\text{précision} \times \text{rappel}}{\text{précision} + \text{rappel}} \quad (9)$$

VP : Vrai Positif ; FP : Faux Positif ; FN : Faux Négatif

- La variable « précision » exprime les détections correctes de fruits par le réseau sur la totalité des annotations.
- La variable « rappel » exprime les détections correctes de fruits par le réseau sur la totalité des détections.
- La variable « F1-score » détermine la précision entre la "vérité de l'image" (images annotées) et les prédictions du réseau. Il est défini comme le meilleur compromis entre la précision et le rappel (Simonnet, 2019).

4.2.2.4. Facteurs susceptibles d'impacter les performances du réseau de neurones

4.2.2.4.1. Structure des arbres

Une fois les performances du réseau de neurone (précision, rappel et le F1-score) calculées, l'effet de la structure des arbres sur ces composantes a été analysé en calculant les corrélations entre chaque paire de variables. En effet, la structure de l'arbre peut influencer l'occlusion des fruits du fait de certains composants de l'arbre (branche, feuille, autre fruit) et impacter les performances de détection du réseau (Borianne *et al.*, 2019 ; Sarron, 2019).

4.2.2.4.2. Nombre de fruits annotés dans l'image

Un autre facteur pouvant impacter les performances du réseau est le nombre de fruits annotés dans l'image. En effet, si le nombre de fruits réellement présents sur l'image et annotés est faible, le nombre de VP (vrais fruits détectés) se trouvera réduit. Or, les nombres de FP et FN peuvent, quant à eux, rester constants ou être plus élevés que VP, ce qui dégrade mécaniquement les performances du réseau. L'effet du nombre d'annotation sur les trois variables de performance du réseau (précision, rappel et F1-score) a été ainsi analysé.

4.2.2.5. Calibration de modèles correctifs pour l'estimation de la production des arbres

4.2.2.5.1. Développement des modèles

Le nombre de fruits détectés pouvant être inférieur au nombre réel de fruits contenus dans l'arbre, il a été nécessaire de calibrer des modèles correctifs pour estimer le nombre réel de fruits à partir des détections réalisées par le réseau de neurone (Qureshi *et al.*, 2017 ; Linker, 2017). Pour développer les modèles correctifs, le nombre de fruits réellement comptés dans 230 arbres a été utilisé. En effet, le nombre de fruits dans les arbres de calibration a été déterminé par un comptage visuel au champ en 2019 par la moyenne de trois experts (Figure 27). Le comptage pour un arbre est validé lorsque l'écart du nombre de fruits entre les trois experts n'excède pas 10 %. A défaut, les fruits étaient systématiquement recomptés pour cet arbre par tous les experts. Les fruits réellement comptés ont été partagés en deux lot d'arbres dont un lot de calibration de 184 arbres (80 %) servant à construire le modèle et un lot de validation de 46 arbres (20 %) servant à valider le modèle. Trois modèles ont été développés par régression linéaire pour estimer la production de chaque arbre (Sarron, 2019) :

- le modèle 1 a été construit avec les valeurs brutes obtenues des comptages.
- le modèle 2 a été obtenu en retirant 4 arbres qui comportent des valeurs aberrantes, arbres dont le nombre de fruits détectés est très différent du nombre réel de fruits comptés.
- le modèle 3 a été obtenu en retirant 4 arbres qui comportent des valeurs aberrantes et en forçant l'intercept de la régression à la valeur 0, afin d'éviter d'avoir des estimations négatives du nombre de fruits.



Figure 27 : Comptage visuel des mangues dans l'arbre avant la récolte

4.2.2.5.2. Critères d'évaluation des modèles

Les critères d'évaluation des modèles ont été l'erreur quadratique moyenne (RMSE) normalisé (NRMSE) et le coefficient de détermination (R^2).

- **RMSE**

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est un indice qui fournit une indication par rapport à la dispersion ou la variabilité de la qualité de la prédiction.

Le RMSE permet de déterminer le taux d'erreur entre la valeur prédite et la valeur réelle. Il est donné par la formule suivante.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{P}_i - P_i)^2}{n}} \quad (10)$$

où \hat{P}_i et P_i sont respectivement la production estimée et la production réelle de l'arbre i ; n est le nombre total d'arbres du sous-échantillon.

- **Coefficient de détermination (R^2)**

Le coefficient de détermination est un indice de la précision des calibrations et de l'ajustement des données. Il permet de mesurer la qualité de la prédiction d'une régression linéaire et l'adéquation entre le modèle et les données observées. Ce coefficient varie entre 0 et 1, entre un pouvoir de prédiction faible et un pouvoir de prédiction fort.

4.2.3. Adaptation d'une stratégie d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger

4.2.3.1. Cartographie des vergers et détermination de la structure des arbres

L'estimation du rendement du verger doit tenir compte de la variabilité de production individuelle des arbres. Dans le but d'estimer le rendement du verger avec la marge d'erreur la plus faible, une stratégie d'échantillonnage d'arbres à photographier a été élaborée. Les vergers V1, V7 et V19 ont servi à la réalisation de cette activité. Pour atteindre cet objectif, la cartographie par drone et des méthodes d'analyse d'image ont été utilisées (Sarron *et al.*, 2018). Chaque verger a été survolé en Mars 2020 à l'aide d'un drone Mavic Pro de DJI équipé d'un capteur visuel RVB (rouge, vert et bleu) de 12 mégapixels avec une focale de 35 mm (Figure 28). Les grilles de vol ont pris en compte l'ensemble des 2 ha délimités dans chaque verger. Les missions de vol ont été planifiées à l'aide de l'application Pix4Dcapture qui a piloté automatiquement le drone et a déclenché la caméra pour maintenir un chevauchement avant et latéral de 80 % et 70 % entre les images, respectivement. Les images acquises pendant les vols ont été automatiquement géolocalisées à l'aide du récepteur GPS (Global Positioning System) intégré (Faye *et al.*, 2016). Ces vols de drone ont permis d'établir une orthophoto RVB, un modèle numérique de terrain (MNT) et un modèle numérique d'élévation (MNE) pour chaque verger. Les modèles numériques ont été utilisés pour calculer avec précision la hauteur des arbres (CHM pour modèle de hauteur de canopée, MNE - MNT).

Le CHM (modèle de hauteur de canopée) a été importé dans le logiciel R pour réaliser la segmentation des arbres avec le package rLiDAR (Carlos *et al.*, 2015) et produire le fichier image (polygone géolocalisé) des arbres délimités. Sur un logiciel SIG (QGIS), le fichier image de chaque verger a été retraité pour corriger les erreurs et délimiter à la main les arbres trop petits pour être visibles dans le CHM.



Figure 28 : Drone et commande de pilotage

4.2.3.2. Estimation de la production des vergers

Les vergers V1, V7 et V19 contiennent respectivement 196, 174 et 305 arbres. L'estimation de la production de ces vergers a été réalisée en utilisant l'outil d'estimation de la production par analyse d'image assistée par modèle. Avant la récolte, tous les arbres des 3 vergers ont été photographiés à l'aide d'un smartphone de résolution 16 mégapixels. Deux images de faces opposées de l'arbre ont été acquises, soit un total de 1350 images pour 675 arbres. Les images ont été ensuite analysées par le réseau de neurones Faster R-CNN entraîné préalablement (Ren *et al.*, 2015). La détection de fruits sur les deux images de chaque arbre a donné un nombre de fruits qui a été corrigé par le modèle linéaire. Ce modèle a permis de déterminer le nombre réel de fruits présents dans chacun des arbres des trois vergers. Une base de données des 675 arbres avec leur production estimée pour l'année 2020 a été produite. Le coefficient de variation pour la production des arbres a été ainsi calculé. Afin de convertir le nombre de fruits estimé en production (exprimée en tonne), la masse des fruits de la variété 'Kent' a été mesurée sur 300 fruits en 2020.

4.2.3.3. Description et évaluation des stratégies d'échantillonnage d'arbres

L'estimation exacte de la production d'un arbre demeure pratiquement impossible. A cet effet, une formule simplifiée permet d'obtenir une estimation plus exacte du rendement à partir d'un échantillon d'arbres :

$$\hat{Y} = \frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^n p_j \times d \quad (11)$$

où \hat{Y} est le rendement estimé du verger ($t.ha^{-1}$); n est le nombre d'arbres échantillonnés dans le verger; p_j est la production de l'arbre j avec (kg par arbre); et d la densité de plantation du verger (en arbres. ha^{-1}).

4.2.3.3.1. Stratégies d'échantillonnage d'arbres

Une stratégie d'échantillonnage d'arbre est la combinaison d'une intensité et d'une méthode d'échantillonnage. L'intensité d'échantillonnage correspond au nombre d'arbres à échantillonner relativement au nombre total d'arbres auquel on associe une méthode pour le choix des arbres (aléatoire, orientée, par groupe, etc.). Il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage d'arbres (Anderson *et al.*, 2019 ; Peeters *et al.*, 2015). Dans cette étude, quatre méthodes d'échantillonnage ont été testées. Il s'agit de l'échantillonnage aléatoire simple, l'échantillonnage aléatoire avec la contrainte de distance, l'échantillonnage régulier et l'échantillonnage par groupe de production. Ces échantillonnages ont été numériquement réalisés sur les trois vergers dans la base de données des 675 arbres de 2020.

a. Echantillonnage aléatoire simple

Cette méthode a consisté à échantillonner de façon totalement aléatoire un certain nombre d'arbres dans le verger pour estimer son rendement (Figure 29).

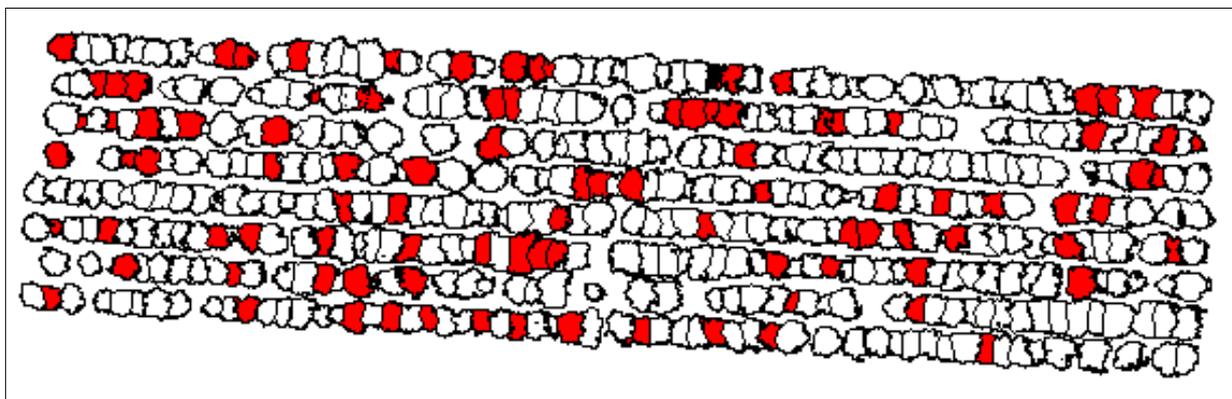


Figure 29 : Echantillonnage aléatoire simple d'arbres dans un verger
Arbres échantillonnés en rouge

b. Echantillonnage lié à la contrainte de distance

La méthode a consisté à fixer une distance entre les arbres à échantillonner dans le verger. Les distances choisies dans cette étude ont été de 10, 15 et 20 m entre les arbres échantillonnés (Figure 30). Pour chaque distance choisie, un échantillonnage a été réalisé.

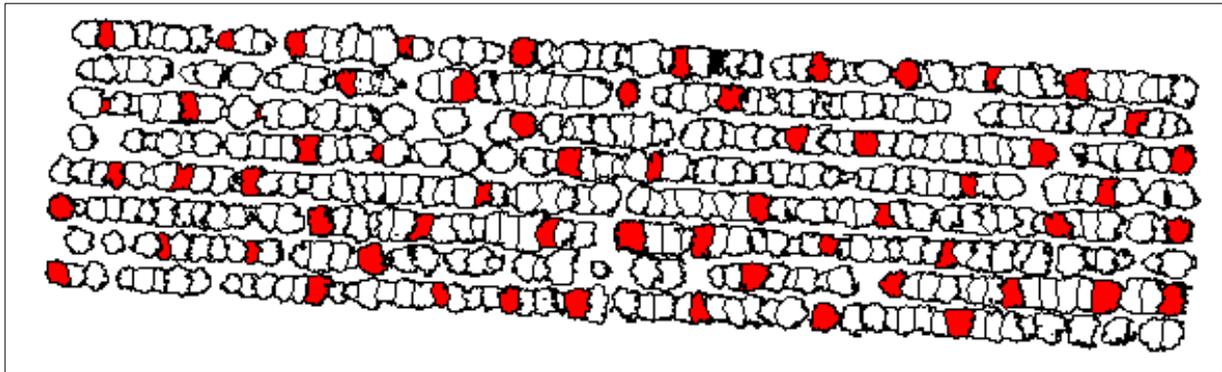


Figure 30 : Echantillonnage aléatoire d'arbres lié à une distance de 15 m
Arbres échantillonnés en rouge

c. Echantillonnage régulier

Cette méthode d'échantillonnage a consisté à choisir un certain nombre d'arbres sur les lignes de plantation dans tout le verger (1 arbre sur 5 sur chaque ligne de plantation).

d. Echantillonnage par groupe de production

Cette méthode a consisté à la construction de groupes d'arbres en fonction de leur production (arbres de production faible, moyenne et élevée). Le même nombre d'arbres a été échantillonné à l'intérieur de chaque groupe formé (Figure 31).

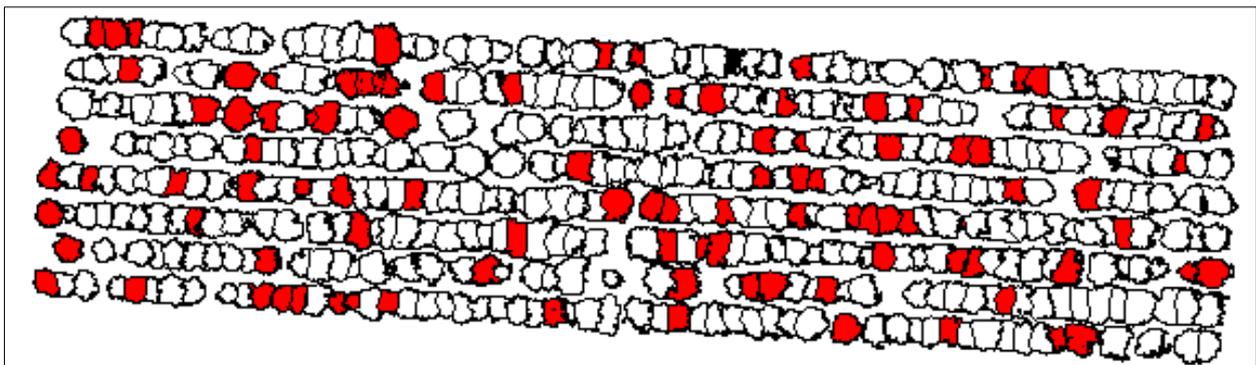


Figure 31 : Echantillonnage d'arbres par groupe de production
Arbres échantillonnés en rouge

4.2.3.3.2. Evaluation des méthodes d'échantillonnage

L'évaluation d'une méthode d'échantillonnage se fait en considérant à la fois l'intensité d'échantillonnage (nombre d'arbres échantillonnés) et le taux d'erreur moyen d'estimation (TE). L'erreur d'estimation est définie comme l'écart entre la production réelle et la production estimée sur la production réelle (somme du nombre de fruits de tous les arbres du verger).

Après enquête, un seuil de TE de 10 % est défini comme la valeur maximum acceptable pour les producteurs. Une méthode d'échantillonnage obtenant un taux d'erreur moyen d'estimation inférieure ou égale à 10 % pourra être considérée comme satisfaisante (Anderson *et al.*, 2019). Dans les trois vergers (V1, V7 et V19), les méthodes d'échantillonnage ont été testées en réalisant 100 simulations numériques (notée s avec $s \in [1, 100]$) pour chaque valeur d'intensité d'échantillonnage I allant de 1 à 99 % des arbres sur les données de rendement de 2020.

Pour chaque simulation à une intensité I donnée, un taux d'erreur d'estimation (noté $p^{eI,s}$) a été déterminé en utilisant la formule suivante :

$$pe_{I,s} = \frac{|\widehat{P}_{I,s} - P|}{P} \times 100 \quad (12)$$

où $\widehat{P}_{I,s}$ est la production totale du verger (en nombre de fruits) estimée pour la simulation s à l'intensité d'échantillonnage I ; et P est la production réelle du verger.

Ainsi, pour l'ensemble des simulations, un taux d'erreur moyen d'estimation (notée TE) pour chaque intensité I a été estimé comme la moyenne des $p^{eI,s}$ des 100 simulations :

$$TE_I = \frac{1}{100} \times \sum_{s=1}^{100} p_{eI,s} \quad (13)$$

TE_I : Taux d'erreur moyen d'estimation de l'ensemble des simulations pour une intensité donnée (I) ; s : simulation ; $p^{eI,s}$: taux d'erreur d'estimation d'une simulation (s) pour une intensité donnée (I)

Le fait de disposer de 100 simulations pour chaque méthode d'échantillonnage permet d'extraire les valeurs de la médiane (50^{ème} centile) et du 95^{ème} centile notées respectivement TE-50 et TE-95. Ces deux valeurs permettent de déterminer la valeur des $p^{eI,s}$ maximale obtenue pour 50 et 95 % des simulations (c'est à dire 50 % et 95 % des échantillonnages se situent sous le seuil de 10 % de TE_I). Une fois la (ou les) méthode(s) optimale(s) identifiée(s), les intensités d'échantillonnage nécessaires pour obtenir des valeurs de TE-50 et de TE-95 égale à 10 % ont été extraites. Ces valeurs ont été extraites directement par lecture graphique.

4.2.4. Analyses statistiques des données

Toutes les données ont été saisies sous le tableur Excel 2016. L'algorithme de détection et de localisation des mangues a été crypté sous Python. Les modèles d'estimation de la production de l'arbre et les méthodes d'échantillonnage des vergers ont été développés avec le logiciel R. L'annotation des fruits, le recadrage de l'image et les masques posés sur les fruits exogènes ont été réalisés avec le logiciel ImageJ.

La comparaison des moyennes des paramètres étudiés a été réalisée avec le test paramétrique ANOVA à un facteur au seuil de 5 % lorsque la distribution suit une loi normale. Lorsque l'effet du facteur étudié est significatif, le test de Student-Newman-Keuls (SNK) ou de Tukey a été utilisé. C'est le cas des paramètres morphologiques et physico-chimiques mesurés sur les fruits. Ces paramètres ont été comparés à l'aide du test de SNK pour déterminer la période de récolte des fruits. Le test de Tukey a été aussi appliqué aux F1-score des vergers pour déterminer l'effet de la structure des arbres du verger sur ce paramètre. Les taux d'erreurs moyens des méthodes d'échantillonnage d'arbres ont été comparés avec le test de Tukey pour déterminer la méthode d'échantillonnage optimale. Les simulations d'échantillonnage d'arbres pour chaque méthode évaluée ont été réalisées avec le logiciel R en utilisant les packages *sp* (Bivand *et al.*, 2013) et *spatialEco* (Evans, 2020).

Pour les cas où la distribution ne suit pas une loi normale, un test non paramétrique a été appliqué. Des tests de corrélations de Spearman a été appliqué entre la production individuelle de l'arbre et sa structure et entre les variables de performance du réseau et la structure des arbres. Une corrélation a été aussi réalisée entre les variables de performance du réseau et le nombre de fruits annotés dans l'image. Une régression linéaire a été réalisée entre le nombre de fruits annotés dans l'image et le nombre de fruits détectés par le réseau.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec les logiciels open source R version 3.4.1 et STATISTICA version 7.1.

Troisième partie :
RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre 5 : Détermination d'un intervalle de temps entre la floraison et la récolte pour estimer la maturité physiologique de la mangue de la variété 'Kent'

Introduction

Ce chapitre présente les résultats relatifs à une méthodologie utilisée pour estimer le niveau de maturité et la qualité de la mangue à la récolte. En effet, une mangue récoltée précocement se conserve certes plus longtemps, mais au détriment de ses propriétés organoleptiques. La durée de conservation des fruits est liée à leur vitesse de mûrissement. Par conséquent, il est important de connaître la meilleure période de maturité physiologique de récolte pour obtenir une qualité organoleptique et nutritionnelle bénéfique pour les consommateurs. Ce travail a permis d'approfondir les connaissances sur le niveau de maturité physiologique de la mangue à la récolte et sur son comportement au cours du mûrissement post-récolte. Ces informations peuvent être utiles pour l'organisation des récoltes des filières de mangues en Afrique de l'ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire.

5.1. Résultats

5.1.1. Caractérisation morphologique et physique des mangues

Les résultats portant sur les caractéristiques morphologique et physique des mangues sont consignés dans le tableau III. Ces résultats ont montré qu'à l'exception de la masse volumique avec une moyenne de $1,36 \pm 0,16 \text{ g/cm}^3$ pour les quatre dates de récolte, les mangues récoltées à 100 jours après floraison (jaf) ont présenté les valeurs moyennes les plus élevées tandis que celles récoltées à 90 jaf, les valeurs les plus faibles. Quant à la masse, la longueur et la circonférence moyenne, elles ne diffèrent significativement pas pour les mangues récoltées à 95, 100 et 105 après la floraison. Cependant, ces paramètres ont été significativement plus faibles ($p < 0,05$) pour les mangues récoltées à 90 jaf. Ainsi, la masse moyenne à la récolte a été de $470,27 \pm 29,08 \text{ g}$ à 90 jours contre une moyenne de $557,46 \pm 20,86 \text{ g}$ pour les mangues récoltées à 95, 100 et 105 jaf. La longueur moyenne des mangues à la récolte a été de $10,11 \pm 1,34 \text{ cm}$ à 90 jours et de $10,99 \pm 0,89 \text{ cm}$ en moyenne pour les mangues récoltées à 95, 100 et 105 jaf. La circonférence moyenne des mangues a été de $28,38 \pm 2,46 \text{ cm}$ à 90 jours, alors qu'elle a été en moyenne de $30,61 \pm 2,19 \text{ cm}$ pour celles récoltées à 95, 100 et 105 jaf.

S'agissant du volume et de la largeur des fruits, les meilleurs résultats ont été obtenus sur les mangues récoltées à 100 jaf ($428,58 \pm 14,40 \text{ cm}^3$ et $9,87 \pm 0,65 \text{ cm}$) et les plus faibles valeurs ont été notées chez les mangues récoltées à 90 jaf ($353,91 \pm 19,72 \text{ cm}^3$ et de $9,3 \pm 0,88 \text{ cm}$).

Tableau III : Caractéristiques morphologiques et physiques des mangues

Variables	Date de récolte (jours après floraison)				F	p
	90	95	100	105		
m_i (g)	470,27 ± 29,08 a	542,00 ± 21,25 b	572,46 ± 20,72 b	557,93 ± 20,62 b	3,85	0,01
m_f (g)	394,70 ± 17,20 a	472,23 ± 17,92 b	514,76 ± 17,99 b	504,36 ± 18,73 b	9,13	0,01
Volume (cm ³)	353,91 ± 19,72 a	397,62 ± 15,66 ab	428,58 ± 14,40 b	405,27 ± 14,99 ab	3,65	0,01
ρ (g.cm ³)	1,37 ± 0,39 a	1,36 ± 0,09 a	1,33 ± 0,08 a	1,38 ± 0,09 a	0,24	0,86
Long. (cm)	10,11 ± 1,34 a	10,99 ± 1,02 b	11,09 ± 0,78 b	10,91 ± 0,87 b	5,67	0,01
Larg. (cm)	9,30 ± 0,88 a	9,52 ± 0,67 ab	9,87 ± 0,65 b	9,66 ± 0,69 ab	3,24	0,02
Circ. (cm)	28,38 ± 2,46 a	30,02 ± 2,13 b	31,01 ± 2,17 b	30,80 ± 2,29 b	8,30	0,01

Sur chaque ligne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Student-Newmann-Keuls.

m_i : masse de la mangue à la récolte ; **m_f** : masse de la mangue après mûrissement ; **ρ** : masse volumique de la mangue ; **Long** : longueur de la mangue ; **Larg** : largeur de la mangue ; **Cir** : circonférence de la mangue

5.1.2. Test de flottaison, densité et aspect des mangues

Les résultats du test de flottaison et de l'aspect des mangues sont présentés à la figure 32. De manière générale, le pourcentage de mangues flottantes et à épiderme ridé diffère pour les quatre dates de récolte. A 90 jaf, 86,66 % des mangues ont flotté soit 26 mangues sur 30, alors que seulement 50 et 56,66 % des mangues (soit des valeurs similaires), respectivement 15 et 17 mangues sur 30, l'ont été pour les récoltes à 100 et 105 jaf.

En ce qui concerne l'aspect des mangues pendant le mûrissement, le pourcentage de mangues à épiderme ridé au cours du mûrissement est passé de 43,33 % (soit 13 mangues sur 30) à 90 jours à 3,33 % (soit 1 mangue ridée sur 30) à 105 jaf.

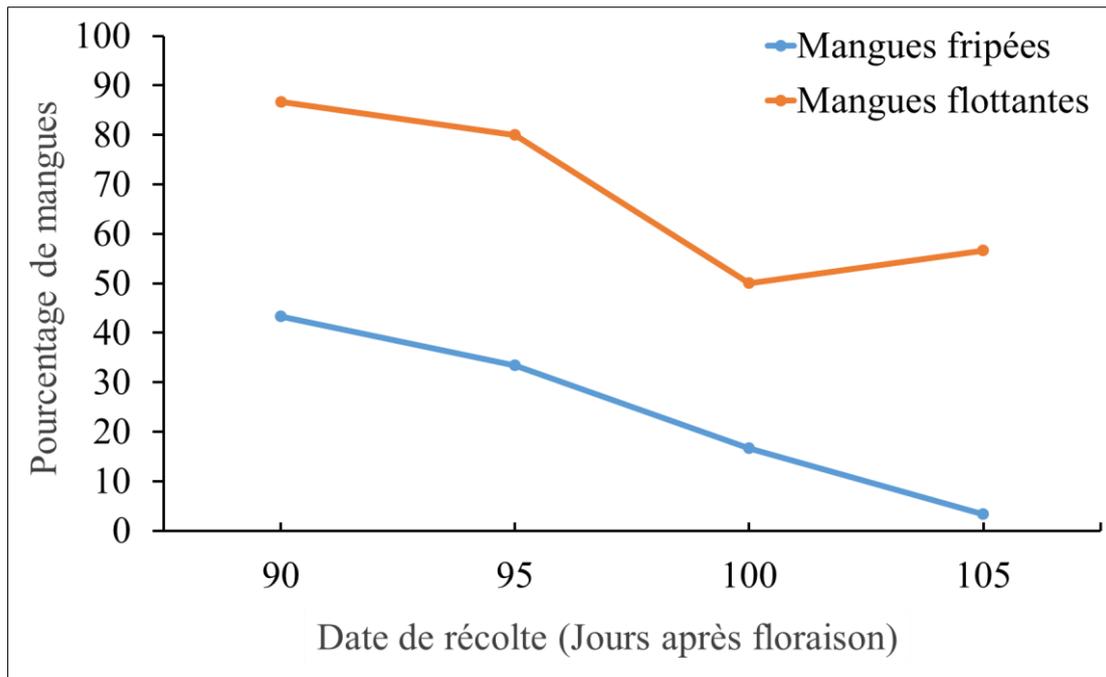


Figure 32 : Pourcentage de mangues flottantes et à épiderme ridé en fonction des quatre dates de récolte

5.1.3. Temps de mûrissement et perte de masse des mangues

Le temps de mûrissement et la perte de masse des mangues en fonction des quatre dates de récolte sont présentés respectivement à la figure 33 et à la figure 34. Les résultats ont montré que le temps de mûrissement et la perte de masse diminuent de manière continue avec la durée de l'intervalle de jours entre la floraison et la récolte. Le mûrissement complet des mangues récoltées à 90 jaf, dure 15 jours en moyenne ($15,16 \pm 1,43$ jours) contre une moyenne de 10 jours ($10,51 \pm 2,30$ jours) pour celles récoltées à 100 et 105 jaf ($p = 0,01$). Concernant la perte de masse, les quatre dates de récolte ont présenté une grande variabilité ($p = 0,01$). Les mangues récoltées à 90 et à 95 jaf ont perdu plus de masse ($14,05 \% \pm 8,57$ et $12,60 \% \pm 5,43$ respectivement) que les mangues récoltées à 100 ($10,04 \% \pm 1,64$) et à 105 ($9,60 \% \pm 2,17$) jaf.

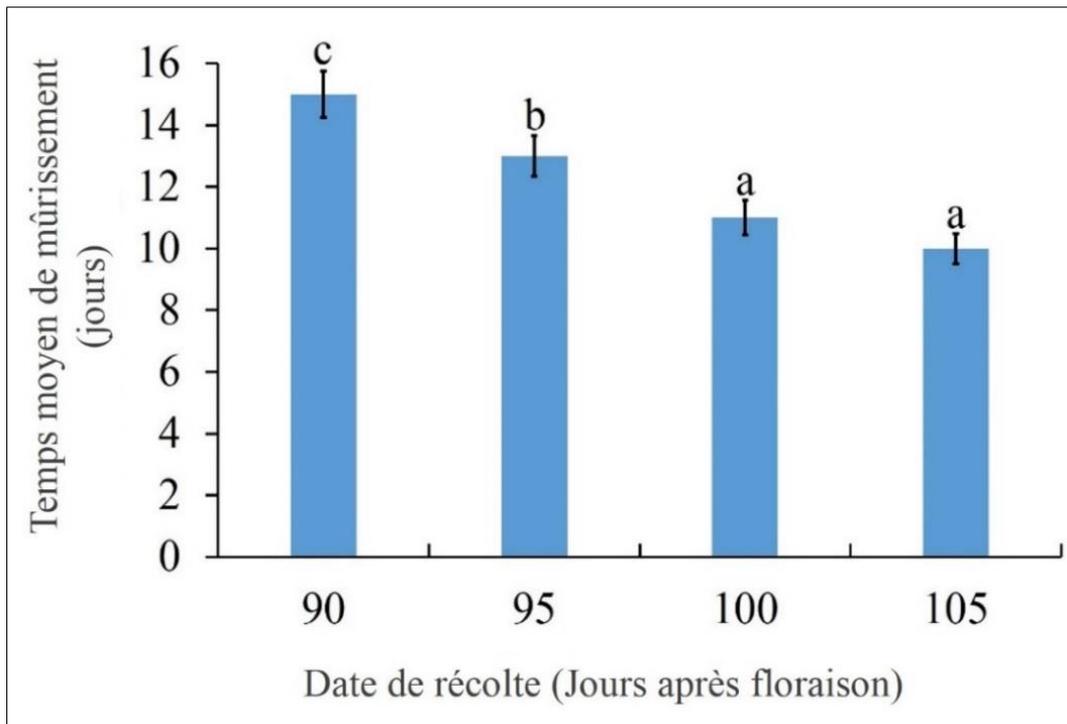


Figure 33 : Temps moyen de mûrissement des mangues en fonction des quatre dates de récolte

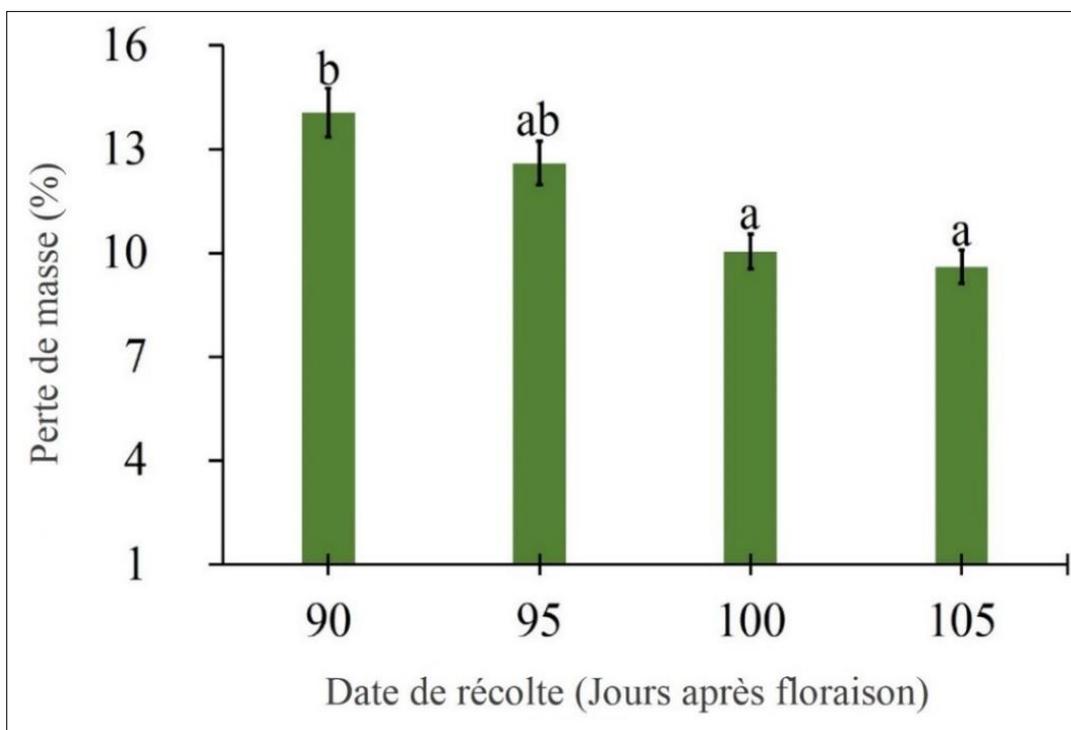


Figure 34 : Perte moyenne de masse des mangues en fonction des quatre dates de récolte

Les colonnes surmontées des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Student-Newmann-Keuls

5.1.4. Caractérisation physico-chimique des mangues

La détermination des paramètres tels que la teneur en sucre et la matière sèche de la pulpe des mangues, a permis d'évaluer la qualité physico-chimique du fruit en fonction de quatre dates de récolte (Tableau IV). Le degré Brix à la récolte (Brix 1), indicateur du taux de sucre dans la mangue, n'a pas montré de différences significatives ($p = 0,17$) entre les valeurs enregistrées aux différentes dates de récoltes. Toutefois, le degré Brix est passé de $8,67 \% \pm 0,79$ à $9,13 \% \pm 0,97$ en moyenne, respectivement à 90 et 105 jaf. Après le mûrissement, le degré Brix (Brix 2) a été significativement différent entre les quatre dates de récolte. Il a été plus important chez les mangues récoltées à 95, 100 et 105 jaf. Le Brix 2 est passé de $16,55 \% \pm 1,39$ à 90 jaf à $19,82 \% \pm 0,99$ à 105 jaf.

Les taux de matière sèche à la récolte (MS1) et après le mûrissement (MS2) ont indiqué des différences significatives pour les quatre dates de récolte étudiés ($p < 0,05$). Les mangues récoltées à 90 jaf ont affiché la plus faible valeur de MS tandis que celles récoltées à 100 jaf ont présenté la valeur la plus élevée. Les valeurs ont été respectivement de $17,20 \% \pm 1,27$; $17,34 \% \pm 1,34$; $19,10 \pm 0,93$ et $18,54 \% \pm 2,88$ pour les fruits récoltés à 90, 95, 100 et 105 jaf. Après le mûrissement, la plus faible valeur de matière sèche a été obtenue par les mangues récoltées à 90 jours et la valeur la plus élevée par les mangues récoltées à 105 jaf. Les valeurs pour la matière sèche après le mûrissement des mangues ont été de $17,25 \pm 1,33 \%$; $19,50 \pm 1,49 \%$; $20,36 \pm 1,92 \%$ et $20,80 \pm 1,26$ respectivement pour les mangues récoltées à 90, 95, 100 et 105 jaf.

Tableau IV : Caractéristiques physicochimiques de la pulpe de mangue

Variables	Date de récolte (jours après floraison)				F	p
	90	95	100	105		
Brix 1 (%)	$8,67 \pm 0,79$ a	$9,06 \pm 0,91$ a	$9,11 \pm 0,98$ a	$9,13 \pm 0,97$ a	1,69	0,17
Brix 2 (%)	$16,55 \pm 1,39$ a	$17,85 \pm 1,24$ b	$18,77 \pm 1,85$ c	$19,82 \pm 0,99$ d	29,22	0,01
MS 1 (%)	$17,20 \pm 1,27$ a	$17,34 \pm 1,34$ a	$19,10 \pm 0,93$ b	$18,54 \pm 2,88$ b	8,13	0,01
MS 2 (%)	$17,25 \pm 1,33$ a	$19,50 \pm 1,49$ b	$20,36 \pm 1,92$ c	$20,80 \pm 1,26$ c	32,22	0,01

Sur chaque ligne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Student-Newmann-Keuls.

Brix 1 : teneur en sucre des mangues à la récolte ; **Brix 2** : teneur en sucre des mangues après mûrissement ; **MS 1** : matière sèche des mangues à la récolte ; **MS 2** : matière sèche des mangues après mûrissement

5.2. Discussion

5.2.1. Caractéristiques morphologique et physique des mangues

Les mangues récoltées à quatre dates (jours entre la floraison et la récolte) différentes ont présenté une grande variabilité des paramètres étudiés (masse, volume, longueur, largeur et circonférence). Les mangues récoltées à 100 jours après la floraison (jaf) ont enregistré les valeurs les plus élevées et celles récoltées à 90 jaf, les valeurs les plus faibles pour l'ensemble des paramètres mesurés. Cette variabilité montre que les mangues n'avaient pas le même niveau de maturité et de croissance à la récolte. Plus le fruit reste sur l'arbre et plus il accumule des assimilats jusqu'à un certain stade de grossissement et de maturité physiologique. Ces résultats pourraient s'expliquer par les conséquences de la compétition entre les fruits pour les assimilats tels que le carbone et l'azote (Ngao *et al.*, 2021). En effet, le volume et la masse du fruit, augmentent avec la quantité d'assimilats disponibles. Par conséquent, la masse et la composition finale du fruit dépendent de la disponibilité en carbone et en azote, qui dépendent du fonctionnement photosynthétique des feuilles, de leur nombre et surtout de la charge en fruits qui entraîne une compétition entre les fruits pour les assimilats (Sun *et al.*, 2021 ; Wen *et al.*, 2021).

Dans cette étude, la variabilité observée serait due au fait que les mangues récoltées à partir de 100 jaf ont bénéficié d'un peu plus de carbone et d'azote suite à la diminution de la charge en fruits de l'arbre. En ce qui concerne la densité des mangues, des valeurs quasi identiques ($1,33 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ à 100 jours à $1,38 \pm 0,09 \text{ g/cm}^3$ à 105 jours) ont été observées. Ces valeurs sont comparables à celles de $0,99 \pm 0,030 \text{ g/cm}^3$ à $1,12 \pm 1,02 \text{ g/cm}^3$ observées par Passannet *et al.* (2018) dans l'étude portant sur la variabilité des caractéristiques physiques des mangues cultivées ('Smith', 'Kent', 'Keitt', 'Palmer', 'Valencia' etc.) au Tchad. Ces valeurs proches de la densité de l'eau montrent que toutes les mangues peuvent flotter sur l'eau, ce qui, selon Diakabana *et al.* (2013), facilite leur nettoyage à grande échelle. Ainsi, la densité des fruits mesurée au stade vert mature, pourrait être utile au secteur des fruits frais pour classer ou trier les mangues au début de la chaîne d'approvisionnement.

5.2.2. Aspect de la peau, perte de masse et temps de mûrissement

Les résultats ont montré que le mûrissement des mangues s'étend sur une période de 15 jours lorsque les fruits sont récoltés à 90 jaf et sur 10 jours lorsqu'ils sont récoltés à 105 jaf. Ces valeurs concordent avec celles enregistrées par Abu *et al.* (2020) pour la mangue 'Kent' au Ghana. Ces chercheurs ont observé un temps de mûrissement de 10 jours pour la 'Kent' récoltée

au stade de maturité physiologique. Ils ont souligné que les différences de temps de mûrissement entre les fruits pourraient être dues à la différence relativement importante de leur niveau de maturité physiologique à la récolte. Dans le cas d'un fruit climactérique, telle la mangue, il faut une période de mûrissement en générale de 8 à 10 jours à environ à 25 °C avant d'obtenir le goût et la texture souhaités pour sa consommation. Cet intervalle de jours de mûrissement a été observé au niveau des mangues récoltées à 100 et 105 après la floraison dans cette étude. La perte de masse au cours du mûrissement est passée de 14,05 % à 90 jours à 9,60 % à 105 jaf traduisant qu'elle baisse pendant le mûrissement proportionnellement à la durée de l'intervalle de jours entre la floraison et la récolte. Par ailleurs, les résultats ont indiqué que le nombre de mangues à épiderme ridé a été plus élevé à 90 et 95 jaf et plus faible à 100 et 105 jaf. La forte perte de masse et la proportion élevée de mangues à épiderme ridé observées au niveau des mangues récoltées à 90 et 95 jaf pourraient être l'effet logique d'un stockage prolongé en raison d'un mûrissement tardif et d'une immaturité physiologique des mangues à la récolte. Selon Abu *et al.* (2020) et Brecht (2020), la perte de masse des fruits pendant le stockage est une conséquence de la perte de réserves alimentaires stockées dans le fruit pendant la respiration et une accélération de la sénescence lorsque les réserves qui fournissent l'énergie nécessaire au maintien de l'état vivant du fruit sont épuisées. Aussi, les mangues moins matures sont moins remplies de substances de réserve et sont donc beaucoup plus susceptibles à subir un taux plus élevé de transpiration et de perte d'eau pendant le stockage. Par ailleurs, Vannière *et al.* (2013) et Abu *et al.* (2021) ont observé que les mangues ayant un niveau de maturité physiologique insuffisante à la récolte présenteront au cours du mûrissement une pulpe partiellement ou totalement blanchâtre et n'auront certainement pas de bonnes qualités organoleptiques et des teneurs moindres en vitamines A et C.

5.2.3. Teneur en sucre et matière sèche au cours du mûrissement des mangues

La caractérisation physico-chimique de la pulpe a montré une faible variation du % Brix des mangues entre 90 et 105 jaf. Toutefois, après le mûrissement des mangues, des différences de % Brix très significatives ont été notées ($16,55 \pm 1,39$ % à 95 jours à $19,82 \pm 0,99$ % à 105 jours après la floraison). Le degré Brix a augmenté et même doublé pour les mêmes dates de récolte avec les meilleurs taux observés aux dates de récolte tardive. Ce résultat indiquerait qu'il y a une faible production de sucres solubles à partir de l'amidon stocké dans la mangue avant sa récolte et ceci quel que soit son niveau de maturité. Le taux de sucres après mûrissement est plus important lorsque les mangues sont récoltées tardivement bien que le délai de mûrissement

après la récolte soit plus court. Le taux de sucre mesuré semble augmenter proportionnellement avec la durée de l'intervalle de jours entre la floraison et la récolte des mangues.

Les valeurs de % Brix observées dans ce travail sont similaires à celles obtenues par Tasié *et al.* (2020) sur la mangue 'Kent'. Ces auteurs ont enregistré des taux de sucres solubles de 18 % Brix après le mûrissement des fruits. Ces résultats sont aussi similaires à ceux de Abu *et al.* (2021) dans leurs travaux menés sur des mangues 'Kent' récoltées au Ghana. Ils ont mesuré des taux de sucres solubles de 7 % à la récolte et 18 % après le mûrissement des mangues à 126 jaf. Ces valeurs sont très proches de celles obtenues dans ce travail, pour les mangues récoltées à 100 et 105 jaf montrant que la mangue 'Kent' récoltée à partir de 100 jaf est très riche en sucres. La teneur en sucre exprimée en % Brix reste un critère de choix dans l'appréciation du goût sucré des fruits.

Selon Abu *et al.* (2021) et Diop *et al.* (2021), les fruits récoltés à un intervalle de jours plus avancé entre la floraison et la récolte sont plus riches en sucres solubles, en matière sèche et en amidon que ceux récoltés plus tôt, comme c'est le cas dans cette étude. Ces auteurs ont indiqué que la récolte des mangues destinées à l'exportation, doit être établie sur la base du type de marché, de la distance du verger ou du centre de conditionnement et du type de transport à utiliser. Les mangues doivent être récoltées au moment idéal afin de permettre le développement de leur qualité organoleptique et nutritionnelle la plus adéquate et la plus longue durée de vie post-récolte. Néanmoins, un taux trop élevé de sucres présente un risque de dégradation par les levures en cas de mauvaise conservation (Koné *et al.*, 2018). D'où la nécessité de trouver un intervalle de jours entre la floraison et la récolte garantissant une meilleure conservation de la mangue pendant le mûrissement. Le taux de matière sèche a varié dans les fruits avant la récolte puis durant le mûrissement passant, de $17,25 \pm 1,33$ pour les mangues récoltées à 90 jaf à $20,80 \pm 1,26$ après le mûrissement pour celles récoltées à 105 jaf. Ces résultats sont similaires à ceux de Tasié *et al.* (2020) sur la mangue 'Kent'. En effet, ces chercheurs ont trouvé une valeur de matière sèche comprise entre 16 et 18 %. Ces résultats montrent que la mangue 'Kent' mature se caractériserait par une teneur en eau relativement faible, qui expliquerait sa bonne durée de conservation. Ainsi, une récolte à partir de 100 jaf pourrait permettre à la mangue, variété 'Kent' de maximiser son mûrissement et avoir une qualité organoleptique et nutritionnelle bénéfique aux consommateurs.

Conclusion partielle

L'étude sur la détermination d'un intervalle de temps entre la floraison et la récolte, pour estimer la maturité physiologique de la mangue, variété 'Kent', a permis de caractériser les conditions morphologiques, physicochimiques des mangues et d'analyser leur qualité au cours du mûrissement. Au regard des résultats obtenus, un intervalle de 100 jours après l'ouverture de la fleur terminale de l'inflorescence correspond à la maturité physiologique de la mangue 'Kent' dans la région du Poro, au Nord de la Côte d'Ivoire. À partir de cet intervalle, la mangue enregistre de meilleures qualités organoleptiques au cours du mûrissement post-récolte. Cet intervalle de récolte a indiqué une période minimum pour obtenir des mangues à la fois riches en sucres, à épiderme moins ridé, à faible perte de masse et à délai de mûrissement plus court.

Chapitre 6 : Développement d'un outil d'estimation du rendement du manguiier à l'échelle de l'arbre par analyse d'image assistée par modèle

Introduction

Au cours de cette dernière décennie, l'analyse d'images utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique a prouvé son efficacité dans la détection, le comptage de fruits et l'estimation du rendement des arbres fruitiers. Cependant, peu d'études se sont intéressées à l'adaptation de ces outils numériques dans les conditions d'Afrique de l'Ouest et particulièrement de la Côte d'Ivoire où les outils d'estimation du rendement sont inexistantes ou précaires pour la plupart des cultures. Ce travail a consisté à utiliser un réseau de neurone, appelé le Faster R-CNN pour estimer le rendement du manguiier à l'échelle de l'arbre. En effet, les CNN sont utilisés dans l'analyse d'images pour leurs performances en termes de temps et d'efficacité pour détecter des mangues. L'emploi du Faster R-CNN combiné à un modèle correctif d'estimation de rendement, a permis d'obtenir la production des 230 arbres suivis.

6.1. Résultats

6.1.1. Estimation de la production à l'échelle de l'arbre par analyse d'image

6.1.1.1. Description des performances du réseau Faster R-CNN

Les résultats portant sur les performances du réseau Faster R-CNN sont présentés à la figure 35 et dans le tableau V. Ces résultats ont montré que le réseau a détecté 25 006 vrais positifs, 2 095 faux positifs et 3 755 faux négatifs. Les résultats ont aussi indiqué que le réseau Faster R-CNN entraîné spécifiquement pour les images de cette étude, a obtenu une précision moyenne de détection de $0,91 \pm 0,14$, un rappel moyen de $0,85 \pm 0,16$, et un F1-score moyen de $0,88 \pm 0,09$ (Figure 36). Des différences ont été observées entre les F1-score des vergers (Figure 37). Ainsi, le verger V5 a obtenu le plus faible F1-score moyen (0,80) et le verger V14 a enregistré le F1-score moyen le plus élevé (0,92). Toutefois, le test de Tukey réalisé a montré que ces différences ne sont pas significatives ($p = 0,07$).



Figure 35 : Quelques erreurs de détection du réseau sur les images de manguier
 Les encadrés rouges sont les mangues annotées par l'expert et les encadrés bleus, les détections automatiques du réseau

A- une feuille a été confondue à une mangue par le réseau (FP en bleu). B- une mangue a été détectée par le réseau alors qu'elle n'a pas été annotée par l'expert (FP en bleu). C- une mangue annotée par l'expert n'a pas été détectée par le réseau (FN en rouge)

Tableau V : Détections et performances du réseau sur un total de 29 000 fruits repérés et annotés

	Catégories de détection			Performances du réseau		
	Vrais Positifs	Faux Positifs	Faux Négatifs	Précision moyenne	Rappel moyen	F1-score moyen
Valeurs	25 006	2 095	3 755	0,91 ± 0,14	0,85 ± 0,16	0,88 ± 0,09

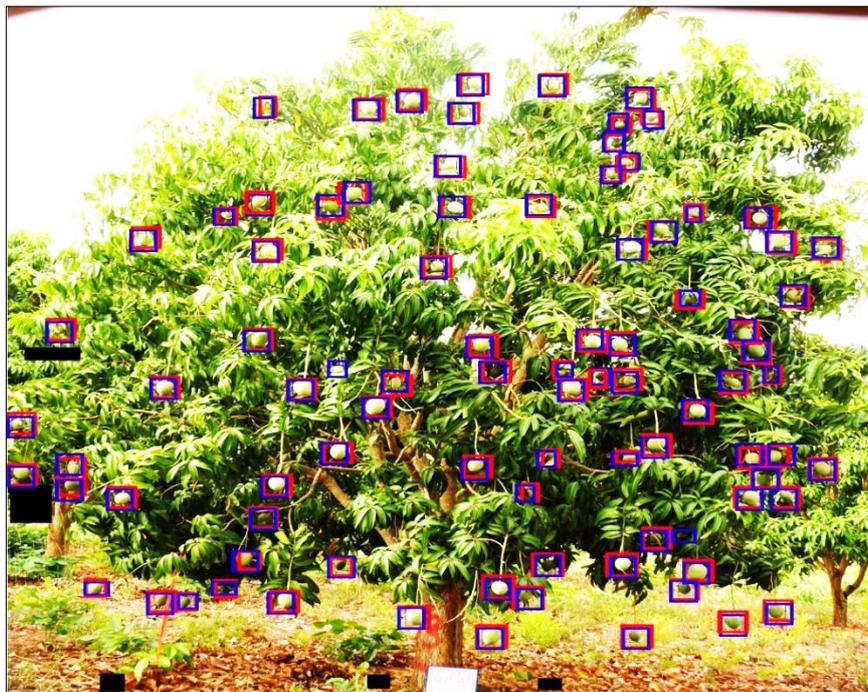


Figure 36 : Détection de mangues dans une image de manguier par le réseau
 Les encadrés rouges sont les mangues annotées par l'expert et les encadrés bleus, les détections du réseau

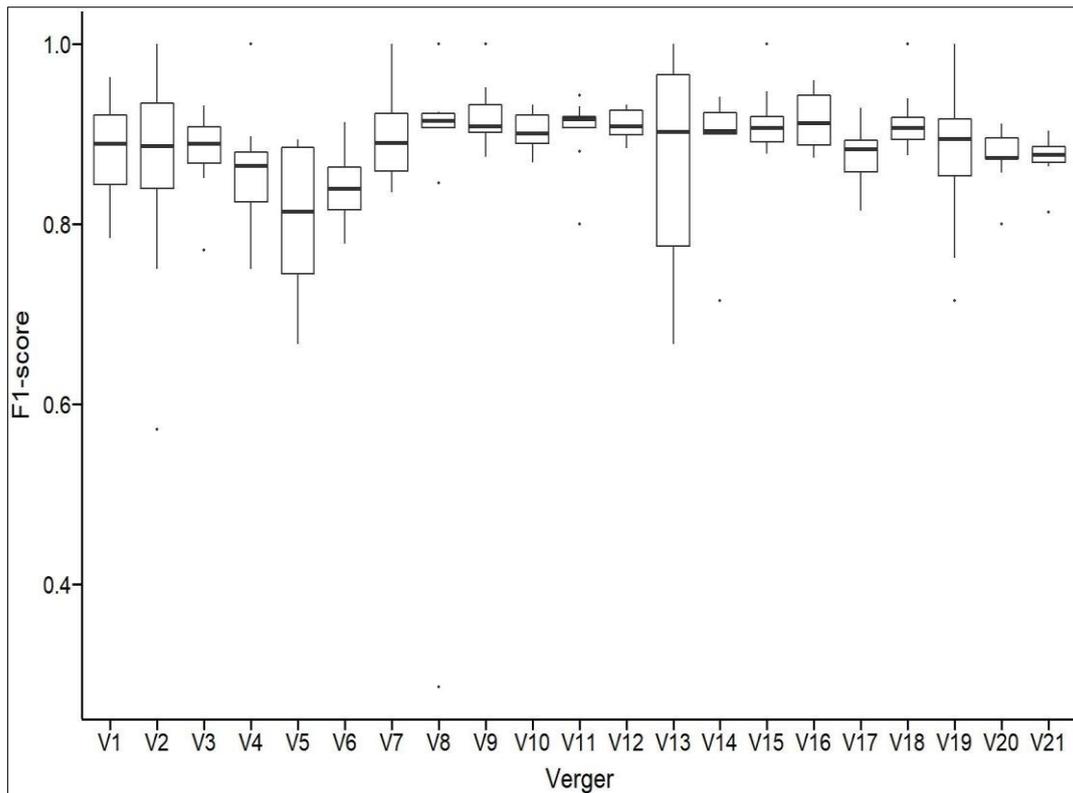


Figure 37 : F1-score du réseau de neurones Faster R-CNN obtenus pour les 21 vergers de l'étude

6.1.1.2. Effet de la structure de l'arbre et du nombre de fruits annotés par arbre sur la performance du réseau

La matrice de corrélation obtenue entre les variables de performances du réseau Faster R-CNN et les composantes de la structure de l'arbre est présentée à la figure 38. Les résultats ont montré de très faibles corrélations (r compris entre 0,04 et 0,09) significatives (p compris entre 0,01 et 0,04) entre la variable 'précision' et les variables de structure de l'arbre sauf pour la variable 'hauteur du tronc' ($p = 0,68$ et $r = -0,13$). Seule la variable envergure de l'arbre a présenté une corrélation significative faible ($p = 0,04$ et $r = -0,21$) avec la variable 'rappel'. Par ailleurs, la variable 'F1-score' n'a été corrélée à aucune composante de la structure de l'arbre (p compris entre 0,27 et 0,94).

L'effet du nombre de fruits annotés sur les variables « précision, rappel et F1-score du réseau » sont présentés à la figure 39. Les résultats ont montré que la performance du réseau est fonction du nombre de fruits annotés dans l'arbre. La performance du réseau a été plus faible lorsque le nombre de fruits annotés dans l'arbre a été faible. En analysant visuellement les images pour lesquelles le réseau a montré de faibles performances, les arbres à gros volume et peu chargés en fruits (50 arbres) sont majoritaires (Figure 40). Des corrélations faibles mais

significatives ont été observées entre le nombre de fruits annotés dans l'arbre et la précision ($r = -0,12$ et $p = 0,01$), le rappel ($r = 0,04$ et $p = 0,00$) et le F1-score ($r = 0,10$ et $p = 0,00$).

Ainsi, contrairement aux variables de structure de l'arbre, la variable nombre de fruits a eu un effet significatif sur les trois variables de performance du réseau ($p < 0,05$).

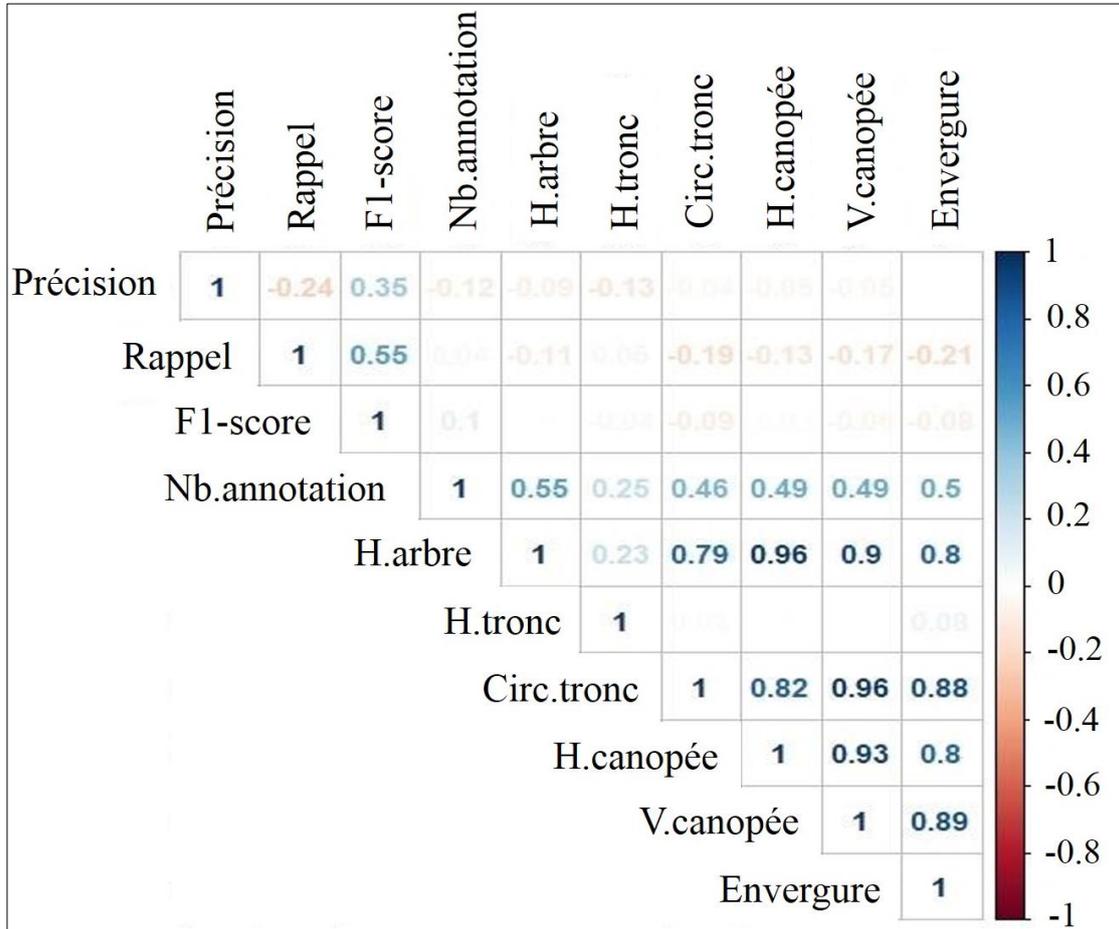


Figure 38 : Corrélations entre les performances du réseau et les variables de structure des arbres

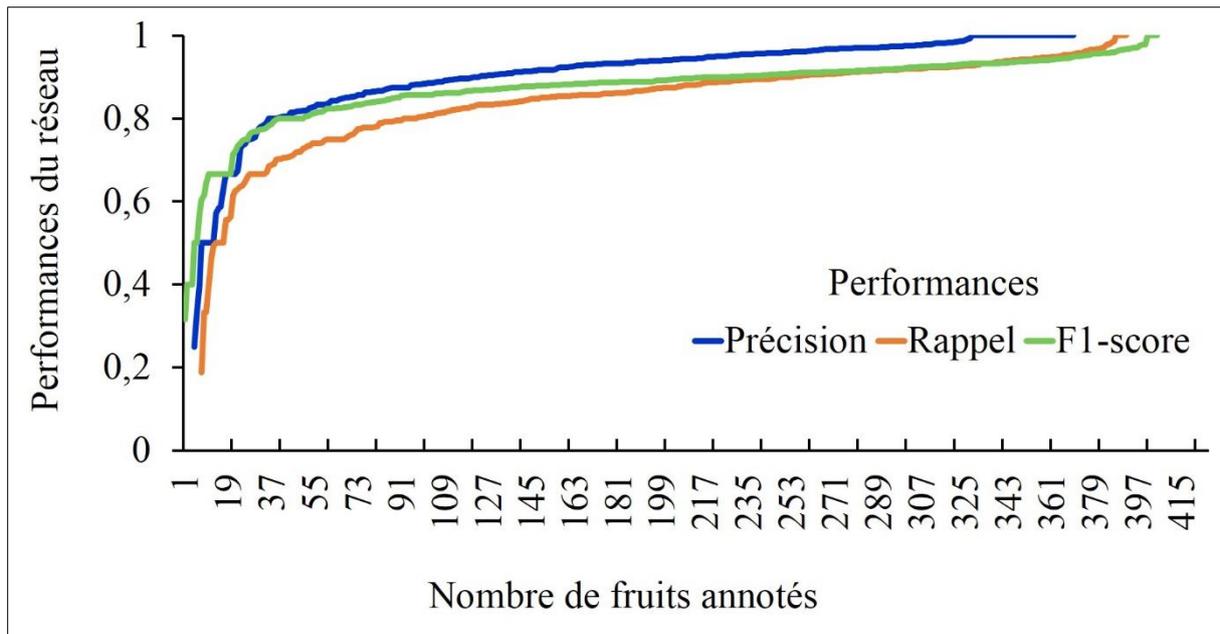


Figure 39 : Performances du réseau en fonction du nombre de fruits annotés dans l'arbre



Figure 40 : Arbre de gros volume avec peu de fruits annotés

Les encadrés rouges représentent les mangues annotées par l'expert et les encadrés bleus, les détections du réseau

6.1.2. Modèles correctifs pour l'estimation de la production des arbres

Le nombre de fruits réellement comptés dans les 230 arbres a été utilisé pour développer et calibrer les modèles correctifs d'estimation de la production. Les résultats (Tableau VI) ont montré que le comptage automatique avec le réseau Faster R-CNN (42 004 ± 152, 28 fruits détectés) a été significativement inférieur ($p < 0,05$) au nombre de fruits vus et comptés par les experts dans les 230 arbres (42 346 ± 162, 14 fruits comptés).

Tableau VI : Comparaison des méthodes de comptage de mangue dans l'arbre

	Méthode de comptage		p
	Faster R-CNN	Comptage des experts	
Nombre de fruits	42 004 ± 152, 28 a	42 346 ± 162, 14 b	0,01

Sur la ligne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Tukey pour la comparaison des moyennes.

A partir de ces résultats, trois modèles correctifs ont été développés et comparés pour améliorer les performances du réseau (Tableau VII). Les résultats ont montré que la régression linéaire entre le comptage automatique du Faster R-CNN et le comptage visuel sur le terrain, a atteint un coefficient de détermination (R^2) de 0,88 et une erreur quadratique normalisé (NRMSE) de 7,6 % comme niveau d'erreur pour le modèle 1. Pour le modèle 2, un R^2 de 0,91 et une NRMSE de 6,1 % ont été observés. Le modèle 3 a donné un R^2 de 0,96 et une NRMSE de 5,9 %. A l'issus de ces résultats, le modèle 3 ayant présenté le coefficient de détermination le plus élevé et l'erreur quadratique moyenne la plus faible, a été conservé (Figure 41). L'équation de ce modèle est la suivante :

$$P_i = 1,51 \times N_i \quad (14)$$

où P_i est la production en fruits estimée de l'arbre i et N_i est le nombre total de fruit détectés sur l'arbre.

Ce modèle correctif a été utilisé pour estimer le nombre de fruits des 230 arbres pour les années 2019 et 2020 à partir des détections du réseau Faster R-CNN.

Tableau VII : Comparaison des trois modèles correctifs développés pour estimer le nombre de fruits

	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Description	Modèle avec valeurs aberrantes	Modèle sans valeurs aberrantes	Modèle sans valeurs aberrantes et intercept à 0
R ²	0,88	0,91	0,96
NRMSE validation	7,6 %	6,1 %	5,9 %

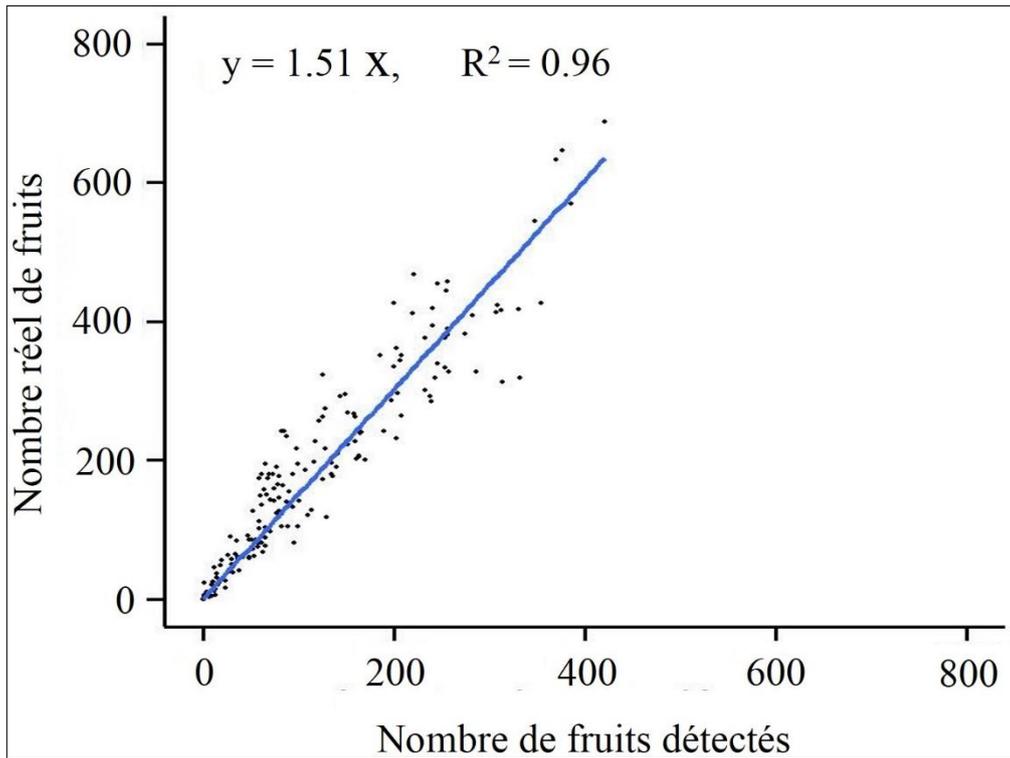


Figure 41 : Régression linéaire entre le nombre réel de fruits comptés (comptage visuel) et le nombre de fruits détectés

Données de calibration du modèle 3

6.1.3. Production des arbres en nombre de fruits

Le réseau de neurones entraîné et le modèle correctif développé ont été utilisés pour estimer le nombre de fruits présents dans chacun des 230 arbres pour les années 2019 et 2020. La répartition de la production individuelle des 230 arbres est présentée à la figure 42. Les résultats obtenus ont montré que quelle que soit l'année, des différences significatives apparaissent entre la production des arbres ($p = 0,01$). La production des arbres a été supérieure en 2019 comparée à 2020. Pour l'année 2019, la production a varié entre 0 et 960 fruits par arbre, avec une moyenne de $275 \pm 233,34$ fruits par arbre et une production totale de 63 427 fruits pour les 230. La distribution de la production n'a pas été homogène entre les arbres.

Ainsi, 48 % des arbres ont enregistré moins de 200 fruits avec un coefficient de variation (CV) de 84,61 %. En 2020, le nombre de fruits a varié entre 0 et 540 fruits par arbre, avec une moyenne de $76 \pm 99,24$ fruits par arbre, pour une production totale de 17 475 fruits. La distribution de la production a été plus hétérogène entre les arbres et 89 % des arbres ont enregistré moins de 200 fruits avec un coefficient de variation (CV) élevé de 130,62 % (Tableau VIII).

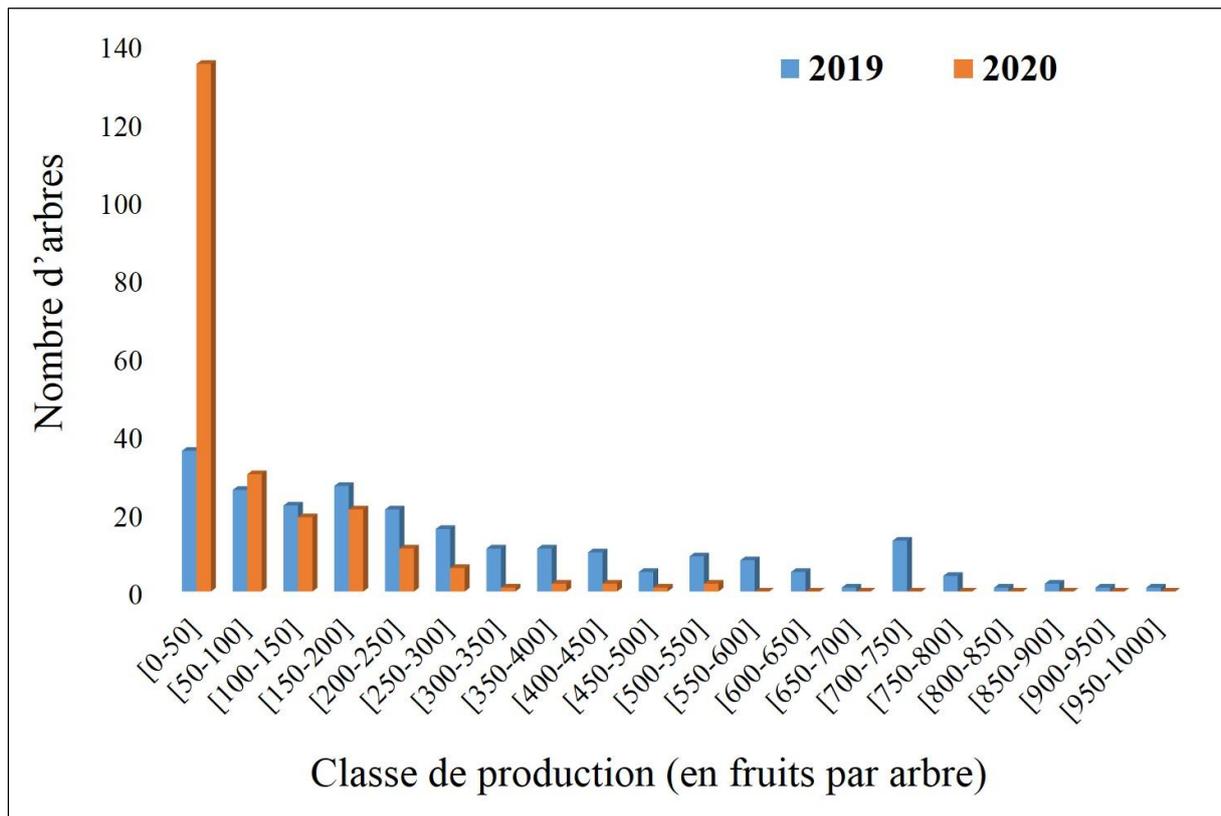


Figure 42 : Distribution de la production des 230 arbres en 2019 et 2020

Tableau VIII : Statistique descriptive de la production des arbres en nombre de fruits

Variables	Moyenne	Minimum	Maximum	Somme	Ecart-type	CV (%)	F	p
Production de fruits 2019	275 b	0	960	63 427	233,34	84,61		
Production de fruits 2020	76 a	0	540	17 475	99,24	130,62	142,78	0,01

Sur la colonne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Tukey pour la comparaison des moyennes.

Concernant la charge en fruits, les résultats obtenus ont montré des différences significatives entre 2019 et 2020 ($p < 0,05$; Tableau IX). La charge en fruits de l'arbre en 2019 a varié de 0 à 152,17 fruits.m⁻³ avec une charge moyenne de $48,40 \pm 30,96$ fruits.m⁻³ par couronne de l'arbre et un coefficient de variation de 63,96 %. En 2020, la charge en fruits a été comprise entre 0 et 159,86 fruits.m⁻³ par couronne de l'arbre avec une charge moyenne de $20,14 \pm 27,67$ fruits.m⁻³ et un coefficient de variation de 137,40 %.

Tableau IX : Statistique descriptive du taux de charge en fruits des arbres

Variables	Moyenne	Minimum	Maximum	Somme	Ecart-type	CV (%)	F	p
Charge en fruits 2019 (nombre de fruits.m ⁻³)	48,40 b	0	152,17	11 131	30,96	63,96	5,99	0,00
Charge en fruits 2020 (nombre de fruits.m ⁻³)	20,14 a	0	159,86	4 632	27,67	137,40	1,13	0,00

Sur la colonne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Tukey pour la comparaison des moyennes.

6.1.4. Production de fruits par localité

La production moyenne de fruits par arbre en fonction des localités de Korhogo et Sinématiali est présentée dans le tableau X. A Korhogo, la production des arbres a varié entre 0 et 959,46 en 2019 avec une moyenne de $284,29 \pm 243,52$ fruits par arbre et un coefficient de variation de 85,66 %. A Sinématiali, la production individuelle des arbres en 2019 a été comprise entre 0 et 860,54 avec une moyenne de $256,28 \pm 208,56$ fruits par arbre et un coefficient de variation de 81,38 %. En 2020, la production individuelle des arbres à Korhogo a été comprise entre 0 et 540,72 fruits avec une moyenne de $75,52 \pm 106,48$ fruits par arbre et un coefficient de variation très élevé de 140,99 %. A Sinématiali, la production individuelle a varié entre 0 et 341,25 fruits avec une moyenne de $77,01 \pm 80,99$ fruits par arbre et un coefficient de variation élevé de 105,16 %.

Par année, l'analyse statistique ne ressort aucune différence significative ($p > 0,05$) entre la production moyenne des arbres des deux localités. Cependant, d'une année à l'autre, une différence significative ($p < 0,05$) a été enregistrée entre la production moyenne par arbre par localité. La production des arbres a été plus élevée en 2019 qu'en 2020 quelle que soit la localité.

Tableau X : Statistique descriptive de la production de fruits par arbre et par localité

Variabes	Localité	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type	CV (%)	F	p
Production 2019 (nombre de fruits)	Korhogo	284,29 a	0	959,46	243,52	85,66	0,70	0,40
	Sinématiali	256,28 a	0	860,54	208,56	81,38		
Production 2020 (nombre de fruits)	Korhogo	75,52 a	0	540,72	106,48	140,99	0,01	0,92
	Sinématiali	77,01 a	0	341,25	80,99	105,16		

Sur la colonne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Tukey pour la comparaison des moyennes.

6.1.5. Effet de la structure de l'arbre sur sa production

En 2019, les résultats ont montré des corrélations positives élevées et significatives ($p < 0,05$) entre la production et la structure de l'arbre (Figure 43). Les meilleures corrélations ont été enregistrées entre la production et la hauteur ($r = 0,54$), le volume ($r = 0,53$) et la hauteur ($r = 0,50$) de la canopée et l'envergure ($r = 0,53$) des arbres. La plus faible corrélation positive mais significative a été établie avec la hauteur du tronc ($r = 0,27$). Pour l'année 2020, des corrélations négatives faibles mais significatives ont été enregistrées entre la production et la structure des arbres ($p < 0,05$).

Par ailleurs, la production individuelle des arbres en 2020 a été corrélée significativement ($p = 0,01$) mais faiblement et négativement ($r = - 0,34$) à celle de 2019.

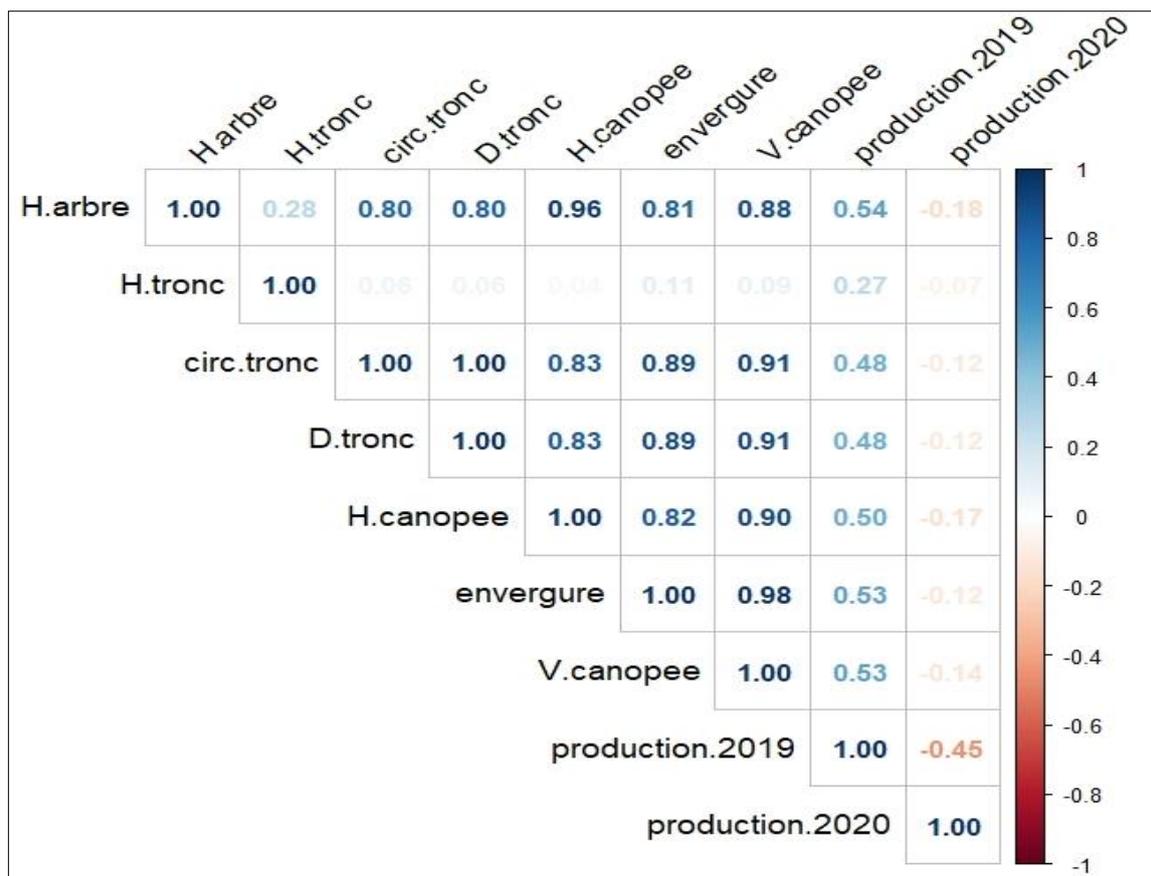


Figure 43 : Corrélations entre la structure de l’arbre et sa production

6.2. Discussion

6.2.1. Production du manguiier selon l’analyse d’image

L’estimation de la production du manguiier à l’échelle de l’arbre a été faite par analyse d’image et modèle correctif. C’est une méthode qui n’avait jamais été utilisée en Côte d’Ivoire bien qu’elle soit utilisée dans divers pays, depuis quelques années, dans la recherche agricole, pour la détection des fruits comme les pommes, les amandes ou les mangues (Jiménez *et al.*, 2000 ; Linker *et al.*, 2012 ; Bargoti & Underwood, 2017 ; Qureshi *et al.*, 2017). Afin de faire connaître cette technique dans notre région, un réseau de neurones de convolution (algorithme de deep learning), le Faster-RCNN dont l’efficacité pour détecter des mangues a été démontrée très récemment (Stein *et al.*, 2016 ; Borianne *et al.*, 2019 ; Sarron *et al.*, 2020) a été testé et exploité pour la détection des mangues dans le houppier de 230 manguiiers. Le réseau Faster-RCNN entraîné spécifiquement pour les 920 images a eu une efficacité globale (F1-score) comprise entre 0,80 et 0,92 et a permis de détecter 91 % des mangues dans les images pour les 21 vergers ‘Kent’ suivis. Les performances du réseau entraîné dans cette étude sont très proches de celles indiquées dans la littérature récente. Par exemple, Bargoti & Underwood (2017) ont

utilisé le réseau Faster R-CNN qui leur a permis de détecter plus de 90 % des mangues présentes dans des images de manguiers. Par ailleurs, Borianne *et al.* (2019) ont obtenu, avec le même réseau, une efficacité globale (F1-score) de 90 % pour la détection des fruits. Toutes ces études confirment l'efficacité des réseaux de neurones dans la détection de mangues dans le houppier. Les résultats avec ces réseaux sont supérieurs en matière de précision et de détection, comparés à ceux obtenus par d'autres techniques comme le KNN (k-nearest neighbours). En effet, Qureshi *et al.* (2017) et Sarron *et al.* (2020) ont utilisé le KNN, pour la détection de mangues dans le houppier avec des efficacités globales de 0,68 et 0,73 (KNN) respectivement sur des arbres "Kent" en monocultures.

Certes les réseaux de neurones (Faster R-CNN) offrent de nombreux potentiels pour l'estimation de la production, mais l'utilisation de ces outils n'est pas sans contrainte selon Sarron *et al.* (2020). La première contrainte est due au fait que les réseaux de neurones requièrent un nombre important de données d'entraînement obtenues à partir d'annotations sous forme de boîtes englobantes créées manuellement par des annotateurs experts qui repèrent chaque fruit sur l'image. La seconde contrainte réside dans la définition de l'objet (exemple de la mangue) à annoter qui peut varier d'un annotateur à l'autre. En effet, certaines mangues ne sont pas repérables par tous les annotateurs parce que cachées alors que des objets qui ne sont pas des mangues peuvent être assimilés à des mangues. L'inclusion ou l'exclusion d'un objet dans l'annotation est donc subjective, dépendante de facteurs humains et peut avoir des impacts sur les performances du réseau.

6.2.2. Facteurs susceptibles d'impacter les performances du Faster R-CNN

Les principales erreurs de l'analyse d'image dans cette étude concernent les faux positifs, fruits détectés à tort par le réseau et les faux négatifs, fruits annotés mais non détectés par le réseau. Ces erreurs de détection pourraient être à l'origine des faibles performances obtenues par le réseau dans certains vergers. Plusieurs auteurs ont signalé ces erreurs de détection dans des études récentes (Borianne *et al.*, 2019 ; Sarron, 2019). Ainsi, selon Bargoti & Underwood (2017), ces erreurs qui conduisent à une faible performance du réseau peuvent provenir des erreurs d'annotations des fruits sous forme de boîtes englobantes (fruits oubliés ou mauvaises annotations). Les incohérences dans la définition de la mangue à annoter et la difficulté d'annotation peuvent aussi entraîner des erreurs. Ces erreurs d'annotation peuvent être réduites par un consensus entre les différents annotateurs dans l'identification des fruits annotés. De plus, une mauvaise résolution d'image peut augmenter le nombre de faux positifs du fait de la similarité avec des feuilles courbées (Koirala *et al.*, 2019). Il peut en être de même pour les

feuilles violacées rougeâtres qui peuvent être confondues avec un fruit par le réseau (Qureshi *et al.*, 2017). Selon Borianne *et al.* (2019), les détections de fruits non annotés par l'annotateur sont en termes absolus de faux positifs qui pénalisent aussi les performances du réseau. Certains fruits peuvent être plutôt cachés par des feuilles, des branches ou le tronc de l'arbre, donc non visibles (Koirala *et al.*, 2019). Toutes ces contraintes sont la cause du nombre élevé des faux positifs et faux négatifs, ce qui dégrade ainsi les performances du réseau dans la détection de fruits dans certaines images.

La présente étude a aussi montré que les variables de performances du réseau (précision, rappel et F1-score) n'ont pas été significativement corrélées aux variables de structure de l'arbre. La structure de l'arbre n'aurait eu aucun effet sur l'efficacité du réseau Faster R-CNN. Toutefois, contrairement aux composantes de la structure de l'arbre, la variable 'nombre de fruits annotés dans l'image' a eu un effet significatif sur les variables de performance du réseau. L'analyse des images pour lesquelles le réseau a présenté de faibles performances, a fait ressortir la présence majoritaire d'arbres de gros volume, mais avec peu de fruits. Ces résultats sont dus au fait que le nombre réel de fruits présents sur l'image et annotés était faible dans les arbres de gros volume, entraînant une réduction du nombre de VP (vrai positif, vrais fruits détectés). Le nombre d'erreurs de détection a quant à lui augmenté et dépassé le nombre de VP dégradant mécaniquement les performances du réseau. D'où, une efficacité plus faible du réseau enregistrée dans la détection de mangue sur les images comportant des arbres de gros volume. Borianne *et al.* (2019) et Sarron *et al.* (2019) ont souligné que d'autres paramètres telles l'aspect des fruits (couleur et forme), la variation des feuilles, de la structure et de l'architecture des arbres peuvent aussi affecter les performances du réseau et conduire à des erreurs d'estimation de la production des arbres.

6.2.3. Modèle correctif pour l'estimation de la production de l'arbre

L'estimation précise du rendement est l'un des enjeux majeurs pour l'amélioration de la qualité globale de la production de mangue en Afrique de l'Ouest et plus particulièrement en Côte d'Ivoire. Cette étude a été réalisée pour améliorer la méthode de comptage visuel, très pénible et peu fiable selon Linker *et al.* (2012). Le comptage des fruits réalisé dans 230 arbres par trois experts a été comparé au comptage automatique effectué par le réseau Faster R-CNN aux performances de détection connues. Les résultats ont montré une différence significative entre ces deux modes de comptage. Par ailleurs, la régression linéaire réalisée entre eux a atteint un coefficient de détermination (R^2) de 0,96 et un écart quadratique moyen normalisé par l'amplitude des valeurs (NRMSE) de 5,9 % pour le modèle correctif retenu.

Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Koirala *et al.* (2019) qui ont utilisé le même réseau et obtenus des R^2 compris entre 0,94 et 0,98 en monocultures de manguiers. Sarron *et al.* (2019) ont trouvé des résultats semblables dans la région des Niayes au Sénégal sur des manguiers, avec des R^2 satisfaisants compris entre 0,92 et 0,95 et un NRMSE de 7 %. Avec les bonnes performances susmentionnées, le Faster R-CNN entraîné combiné au modèle correctif s'est révélé être un outil efficace pour l'estimation de la production des arbres. Le modèle correctif, solide et fiable ($R^2 = 0,96$; NRMSE = 5,9 %) développé dans ce travail a permis de quantifier la production (nombre de fruits) des 230 arbres suivis pendant deux ans dans la région du Poro, au nord de la Côte d'Ivoire.

Plusieurs études ont porté sur la détection des fruits dans la littérature (Stein *et al.*, 2016 ; Borianne *et al.*, 2019), mais seulement quelques travaux abordent l'estimation de la production à partir de ces détections. Les travaux de Linker (2017) ont montré une bonne corrélation entre la détection des fruits sur les images par le réseau et la production de l'arbre. Ce réseau et modèle correctif associé pourront être implémentés dans des smartphones en vue de son utilisation courante par les acteurs des filières de mangue pour réaliser des comptages de fruits automatisés. Le comptage des fruits par analyse d'image peut être utilisé de plusieurs façons. Au niveau du verger, il peut être utilisé pour estimer le nombre de fruits par bloc de verger, en informant sur les ressources nécessaires pour la récolte. La technologie peut être utilisée pour éclairer les décisions de gestion au niveau de chaque arbre (taille, fertilisation, irrigation, etc.), ou pour créer un registre du nombre de fruits de l'arbre à travers les années.

6.2.4. Facteurs de variabilité de la production individuelle des arbres

La dimension d'un arbre, pouvant avoir une influence sur sa production, les composantes de la structure des arbres ont été déterminées et la production réelle (nombre de fruits) de chaque arbre pour les années 2019 et 2020 a été estimée grâce au modèle correctif développé. Il a été observé une forte variabilité de la production individuelle des arbres pour chaque année. En analysant l'effet de la structure de l'arbre sur sa production, les résultats ont montré que toutes les variables de la structure de l'arbre (hauteur, hauteur du tronc, diamètre et circonférence du tronc, envergure, hauteur et le volume de la canopée des arbres) ont été positivement corrélées à la production de 2019, mais négativement à celle de 2020. La hauteur et l'envergure de l'arbre, la hauteur et le volume de la canopée ont été les plus corrélées à la production. Ainsi, la variabilité dans la structure des arbres expliquerait en partie la variabilité du rendement de l'arbre. Les grands arbres à grande canopées produisent plus que les petits arbres à canopée moins importante.

Les résultats de 2019 corroborent ceux de Diatta (2018) qui a montré que la hauteur de l'arbre a une influence positive sur le rendement de la variété 'Kent' dans la plupart des vergers suivis dans le cadre d'une étude menée dans la région des Niayes, au Sénégal.

En analysant la production de ces deux ans, les résultats obtenus ont montré que quelle que soit l'année, des différences significatives apparaissent entre la production des arbres d'une année à l'autre. Les arbres ont été plus productifs (en nombre de fruits) en 2019 qu'en 2020 et une très faible corrélation négative a été observée entre la production des arbres en 2019 et en 2020. Cela s'expliquerait par le fait que la production de l'année 2019 a bénéficié de conditions climatiques beaucoup plus favorables à la floraison et à la fructification du manguier par rapport à 2020. En effet, les données de températures relevées de décembre 2018 à avril 2019 (entre 24 °C et 30 °C en moyenne), période de production du manguier ont été plus faibles que celles relevées de décembre 2019 à avril 2020 (entre 26 °C et 32 °C en moyenne). Aussi, la pluviométrie a été plus abondante en 2018 (avec un total de 950 mm) qu'en 2019 (avec un total de 740 mm). Joubert *et al.* (1993) ont indiqué que la floraison du manguier est très fortement influencée par les basses températures. La floraison est favorisée par des températures mensuelles moyennes comprises entre 12 et 17 °C et quand les températures journalières sont autour de 20 °C, le jour et 15 °C, la nuit (Whiley, 1992 ; Issarakraisila *et al.*, 1997). Ces résultats montrent que la température pourrait être à l'origine de la meilleure productivité des arbres en 2019 par rapport à 2020. Toutefois, cette variabilité pourrait être le fait de l'irrégularité de production de ces arbres Monselise & Goldschmidt (1982). En tenant compte des rendements en 2019 et 2020, l'année 2019 pourrait être qualifiée d'année « on » et 2020 d'année « off », ce qui traduit une plus forte utilisation des réserves carbonées en 2019 par rapport à 2020. Les années « off » sont marquées par une faible fructification alors que les années « on » correspondent à une fructification très importante, causée par une floraison abondante et/ou peu de chutes de fruits (Monselise & Goldschmidt, 1982). Selon Yeshitela *et al.* (2005), cette irrégularité plus ou moins prononcée de la plupart des variétés de manguier, s'explique non pas par des chutes plus importantes de bourgeons floraux ou de fruits, mais par une floraison insuffisante les années off.

Certains paramètres peuvent déclencher une alternance de production. Ainsi, un facteur environnemental tel que la température, est souvent considéré comme le premier déclencheur du comportement alternant des arbres. Menzel & Le Lagadec (2017) ont indiqué que l'environnement impacterait fortement l'efficacité de production de la variété 'Kent' et peut être un des facteurs explicatifs de sa variabilité interannuelle de production.

Les pratiques culturales telles que le labour, le désherbage, la taille et la densité de plantation peuvent impacter fortement la production individuelle de l'arbre. En effet, certains arbres suivis, ont subi une taille après la récolte de 2019, ce qui a probablement impactés leur production en 2020. Selon Monselise & Goldschmidt (1982), le rendement du manguiier dépend aussi des conditions édaphiques (sol) et de l'âge du manguiier. Plusieurs études ont montré que la production du manguiier tient compte de la texture, de la structure et de la composition physico-chimiques du sol (Gerbaud, 2015). Ces facteurs qui interviennent dans le bon développement du manguiier pourraient aussi être à l'origine de la variabilité structurale et de production observée entre les arbres. Pour Yeshitela *et al.* (2005), l'intensité du phénomène d'irrégularité de production qui reste fonction des caractéristiques internes des espèces et des variétés peut être en partie atténuée par la création de variétés à production plus régulières, même si la réalisation d'un tel projet demande du temps et est coûteuse. L'irrégularité de production conduit à des effets économiques souvent négatifs et marqués pour tous les acteurs de la filière fruitière, du producteur au consommateur.

Conclusion partielle

Ce travail a consisté à exploiter les performances d'un réseau de neurones de détection de fruits, le Faster R-CNN, pour estimer la production du manguiier à l'échelle de l'arbre. Le neurone a obtenu une efficacité globale (F1- score) moyenne de 0,88 et une précision de détection de 91 % des mangues présentes dans l'image. En comparant les performances du Faster R-CNN avec un comptage manuel de fruits dans 230 d'arbres, un modèle correctif efficace et fiable avec un R^2 de 0,96 et un NRMSE de 5,9 % a été mis au point pour estimer la production en mangues à partir d'images d'arbres individuels. Ce modèle, a permis d'estimer la production du manguiier à l'échelle de l'arbre dans la région du Poro, au nord de la Côte d'Ivoire. L'étude a révélé une forte variabilité de production entre les arbres. La production des arbres a été supérieure en 2019 comparé à 2020. En 2019, des corrélations positives élevées et significatives ont été observées entre la production et la structure de l'arbre, contrairement à 2020 où ces corrélations ont été négatives, faibles mais significatives.

Ces travaux de recherche ont permis d'approfondir les connaissances sur la production du manguiier, variété 'Kent' dans la région du Poro, au Nord de la Côte d'Ivoire. Les résultats obtenus ont permis de mettre en place un outil d'aide à la décision appelé SoYield mangue qui est disponible sur les smartphones. Cet outil en phase de test actuellement sera déployé très prochainement auprès des acteurs de la filière mangue pour leur permettre d'obtenir des informations fiables sur la production de mangues avant la récolte.

Chapitre 7 : Adaptation d'une stratégie d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger

Introduction

Ce chapitre porte sur la mise en place d'une stratégie d'échantillonnage pour déterminer le nombre d'arbres à photographier dans un verger, afin d'estimer son rendement avec une marge d'erreur la plus faible possible selon la densité de plantation. Les outils d'estimation de la production à l'échelle de l'arbre ont été utilisés pour estimer la production des arbres en photographiant chaque arbre dans trois vergers. Cette estimation a permis d'étudier la variabilité de production intra-verger. Cette variabilité a été prise en compte dans la construction des stratégies d'échantillonnage pour estimer le rendement du verger. Une méthode d'échantillonnage d'arbres du verger pour une estimation du rendement a ainsi été recommandée. Cette méthode a permis d'estimer le rendement de chaque verger avec une marge d'erreur acceptable.

7.1. Résultats

7.1.1. Rendement du verger

La distribution de la production en nombre de fruits par arbre et par verger est présentée à la figure 44. La production estimée par le réseau R-CNN a varié entre 0 et 390 fruits par arbre, avec une production moyenne de 86 fruits par arbre dans les trois vergers. La distribution de la production n'a pas été homogène entre les arbres pour les trois vergers (test de normalité de Shapiro $< 0,05$) et 92 % des arbres ont enregistré moins de 200 fruits (Figure 44). La répartition de la production (Tableau XI) dans le verger V1 a été moins hétérogène, avec un coefficient de variation (CV) de 46,88 % plus faible que dans les vergers V7 (CV = 103,10 %) et V19 (CV = 78,70 %). Dans le verger V1, le nombre moyen de fruits par arbre a été plus élevé (122 par arbre) pour une production totale de 23 903 fruits. Les vergers V7 et V19 ont présenté un nombre plus élevé d'arbres de faible production. Un tiers (32 %) des arbres du verger V7 ont produit moins de 20 fruits par arbre (Figure 44). Ces deux vergers (V7 et V19) ont enregistré une production par arbre similaire (environ 70 fruits) et une production totale de 12 087 fruits et 21 820 fruits, respectivement. L'analyse statistique a montré une différence significative ($p < 0,05$) entre la production des arbres des vergers.

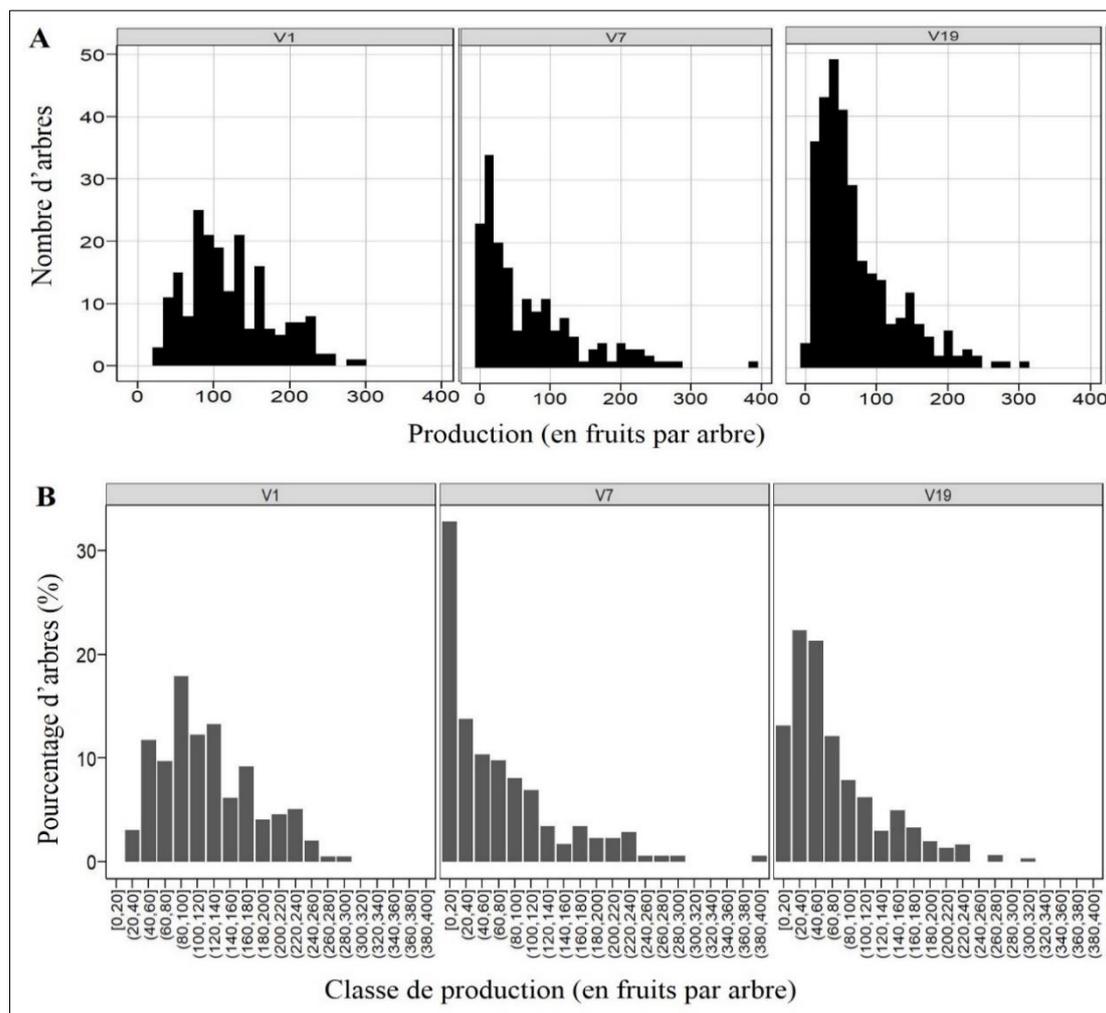


Figure 44 : Distribution de la production des arbres par verger

A) Production de fruits par arbres, B) pourcentage d'arbres dans chaque classe de production

Tableau XI : Caractéristiques de la production estimée en nombre de fruits dans les trois vergers

Variables	Vergers			F	p
	V1	V7	V19		
Production moyenne par arbre	121,95 ± 57,17 b	69,46 ± 71,62 a	71,54 ± 56,30 a		
Production minimum par arbre	31,74	0	1,51		
Production maximum par arbre	291,68	388,41	308,31	49,22	0,01
Coefficient de variation (%)	46,88	103,10	78,70		
Production totale (nombre de fruits)	23 903	12 087	21 820		
Production totale (t)	10,75	5,42	9,82		

Sur la ligne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Tukey pour la comparaison des moyennes.

V1 : verger 1 ; V7 : verger 7 ; V19 : verger 19

7.1.2. Efficacité des méthodes d'échantillonnage d'arbres

Le taux d'erreur (TE) moyen d'estimation obtenue par chaque méthode d'échantillonnage d'arbres pour les 100 simulations selon l'intensité 1 à 99 est présenté à la figure 45 et le Tableau XII. Ces méthodes d'échantillonnage ont montré les mêmes profils d'évolution pour les vergers V7 et V19 (Figure 45). Les méthodes d'échantillonnage par groupe de production et aléatoire simple ont donné les plus faibles taux d'erreurs quel que soit le verger. L'échantillonnage par groupe de production a affiché des taux d'erreur compris entre 1,67 et 3,56 % contre 3,88 et 9,08 % pour l'échantillonnage aléatoire simple. Quant aux méthodes d'échantillonnage régulier et lié à la contrainte de distance (10, 15 et 20 m), elles ont enregistré les taux d'erreur les plus élevés. Ces taux d'erreur se situent entre 4,49 et 24,97 % pour l'échantillonnage régulier et entre 5,34 et 21,43 pour l'échantillonnage lié à la contrainte de distance.

Par ailleurs, les méthodes d'échantillonnage ont été plus efficaces dans le verger V1 qui a enregistré les taux d'erreur les plus faibles (entre 1,67 à 9,53 %).

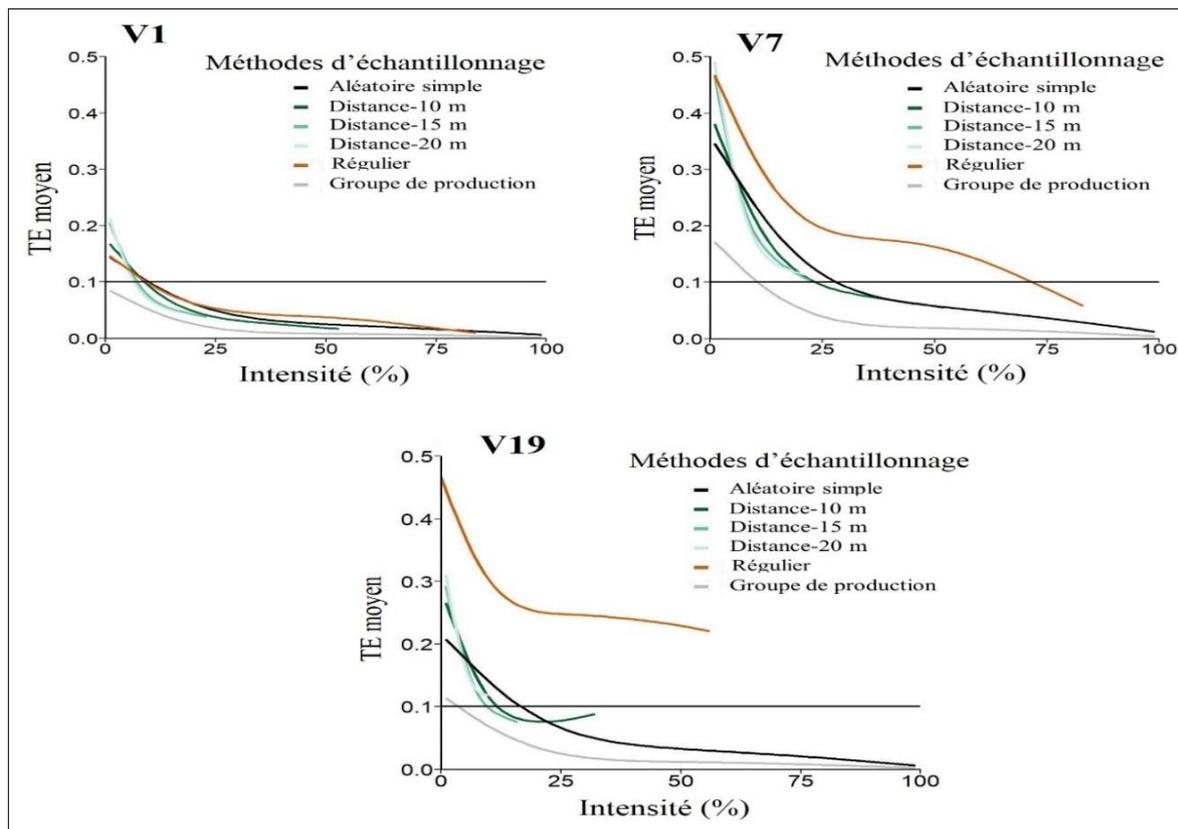


Figure 45 : Taux d'erreur (TE en %) en fonction de l'intensité et de la méthode d'échantillonnage pour les trois vergers

La barre horizontale noire indique la valeur de TE de 10 %

Tableau XII : Taux d'erreur (TE) et production estimée de chaque méthode d'échantillonnage dans les trois vergers

Méthodes d'échantillonnage	V1		V7		V19	
	TE (%)	Prod. estimée	TE (%)	Prod. estimée	TE (%)	Prod. estimée
Aléatoire simple	3,88 ± 0,05 b	24 040	9,08 ± 0,13 b	12 303	5,30 ± 0,08 b	21 951
Distance-10 m	5,34 ± 0,06 d	23 875	13,17 ± 0,16 c	12 313	11,38 ± 0,11 c	22 739
Distance-15 m	8,41 ± 0,09 e	23 925	20,98 ± 0,20 d	11 987	13,94 ± 0,14 c	22 382
Distance-20 m	9,53 ± 0,09 f	23 899	21,43 ± 0,22 d	12 044	17,83 ± 0,15 d	22 414
Régulier	4,49 ± 0,05 c	23 184	17,99 ± 0,18 d	14 069	24,97 ± 0,10 e	27 148
Groupe de production	1,67 ± 0,03 a	23 819	3,56 ± 0,06 a	12 073	2,31 ± 0,05 a	21 730
Moyenne	5,55 ± 0,06	23 790	14,37 ± 0,16	12 464	12,62 ± 0,10	23 060
F	566,95		1 891,72		17 985,55	
p	0,01		0,01		0,01	
Prod. réelle (nombre fruits)		23 903		12 087		21 820
Prod. totale (t)		10,75		5,44		9,82

Sur chaque colonne, les valeurs suivies des mêmes lettres ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % selon le test de Tukey pour la comparaison des moyennes.

V1 : verger 1 ; **V7** : verger 7 ; **V19** : verger 19 ; **TE** : taux d'erreur ; **Prod. estimée** : production estimée (en nombre de fruits) ; **Prod. totale** : production totale

7.1.3. Méthodes d'échantillonnage retenues pour chaque verger

Pour les trois vergers, la méthode d'échantillonnage par groupe de production a permis d'obtenir des résultats intéressants, mais elle est plus complexe à mettre en œuvre car elle nécessite une connaissance à priori de la production des arbres pour les classer. Pour les trois vergers, les méthodes d'échantillonnage aléatoire simple et liée la contrainte de distance, peuvent être retenues pour les résultats satisfaisants obtenus à leur niveau.

7.1.3.1. Verger V1

Les résultats obtenus avec les méthodes d'échantillonnage aléatoire simple et liées à la contrainte distance de 10 m dans le verger V1, sont présentés dans le tableau XIII et sur la figure 46. Dans le verger V1, la méthode d'échantillonnage aléatoire simple utilisée à une intensité de 7 %, soit 14 arbres échantillonnés sur 196 a donné un TE-50 inférieur à 10 %. En utilisant cette méthode, une intensité d'échantillonnage de 31 % des arbres du verger, soit 61 arbres, a été nécessaire pour obtenir une estimation en dessous des 10 % d'erreur avec une probabilité de 95 % (Figure 46). Ainsi, dans le verger V1, un échantillonnage aléatoire simple de 14 arbres sur un total de 196 arbres, a conduit à une production estimée du verger (24 208 fruits) très proche

de la production réelle mesurée (23 903 fruits) avec un taux d'erreur moyen de 10 % (Tableau XIII).

La méthode liée à la contrainte de distance de 10 m a donné également les mêmes résultats pour l'intensité d'échantillonnage de 7 % des arbres. Pour obtenir un TE-95 inférieur à 10 %, une intensité d'échantillonnage de 22 % des arbres, soit 43 arbres contre 61 pour la méthode aléatoire simple, a été nécessaire (Figure 46). Un échantillonnage de 43 arbres avec cette méthode a conduit à une production estimée du verger (23 992 fruits) quasi-identique à la production réelle (23 903 fruits) avec un taux d'erreur de moins de 10 % (Tableau XIII).

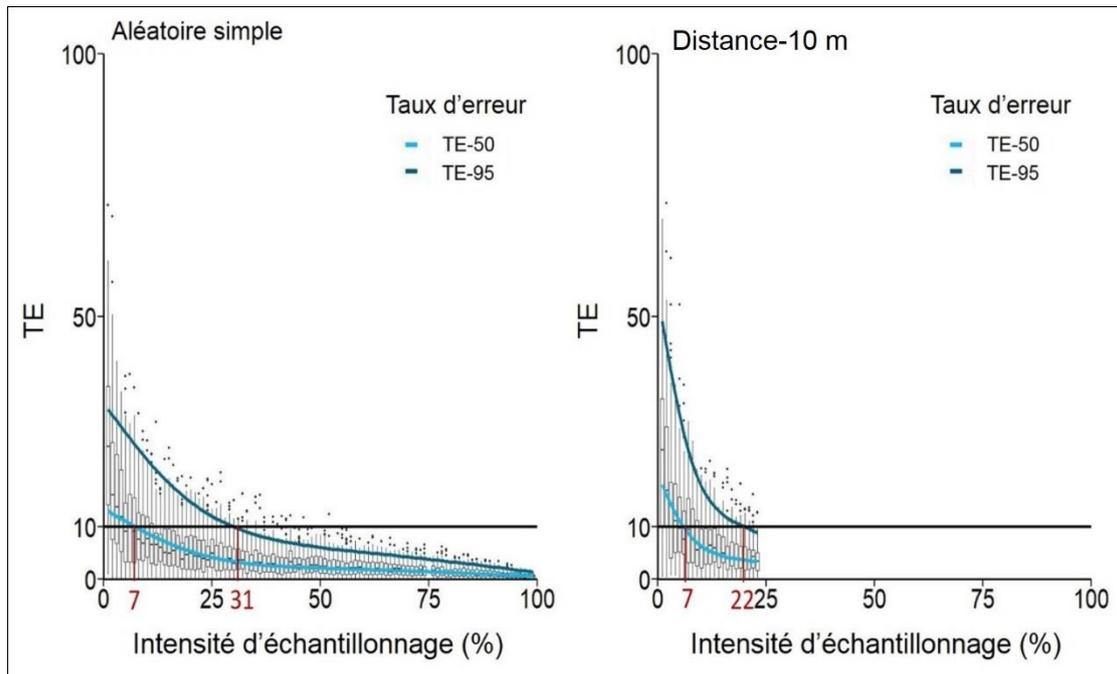


Figure 46 : Taux d'erreur (TE) en fonction de l'intensité d'échantillonnage dans le verger V1
Les courbes bleues claires et foncées représentent respectivement les valeurs de TE-50 et TE-95.

Tableau XIII : Taux d'erreur (TE) et production estimée selon la méthode et l'intensité d'échantillonnage dans le verger V1

Méthodes d'échantillonnage	I (%)	TE moyen (%)	TE-50 (%)	TE-95 (%)	Prod. Estimée (nombre de fruits)	Prod. Réelle (nombre de fruits)
Aléatoire simple	7	10,06 ± 7,63	9,07	21,91	24 208	23 903
Aléatoire simple	31	4,30 ± 2,88	3,67	9,78	24 035	
Distance-10 m	7	10,00 ± 7,43	9,40	22,70	23 554	
Distance-10 m	22	4,28 ± 3,01	4,20	9,40	23 992	

7.1.3.2. Verger V7

Dans le verger V7, les intensités d'échantillonnage nécessaires pour obtenir une bonne estimation du rendement ont été les plus élevées. Ainsi, la méthode d'échantillonnage aléatoire simple utilisée à une intensité de 26 % (45 arbres sur un total de 174) obtient un TE-50 inférieur à 10 % et un TE-95 proche des 25 % (Figure 47 et Tableau XIV). En utilisant cette méthode, une intensité d'échantillonnage d'au moins 66 % des arbres (115 arbres) a été réalisée pour obtenir une estimation en dessous des 10 % d'erreur avec une probabilité de 95 % (Figure 47). Une intensité d'échantillonnage de 10 % des arbres (18 arbres) selon la méthode aléatoire simple, conduit à un TE-50 de 14,85 % et un TE-95 de 42,78 %. Un échantillonnage de 45 arbres (intensité de 26 %) sur 174 arbres présents dans le verger a été ainsi nécessaire pour obtenir une production estimée (12 397 fruits) beaucoup plus proche de la production réelle mesurée (12 087 fruits) avec un taux d'erreur moyen de 10 % (Tableau XIV).

La méthode liée à la contrainte de distance de 10 m a réduit l'intensité d'échantillonnage nécessaire de 26 % à 23 %, soit 5 arbres de moins à échantillonner pour obtenir un TE-50 inférieur à 10 % (Figure 47). L'intensité de 23 % a réduit le TE-95 de 43 % (pour la méthode aléatoire simple) à 24 %. La méthode liée à la distance de 10 m ne permet pas d'aller au-delà de 52 % des arbres échantillonnés à cause de la contrainte de distance imposée entre les arbres. L'intensité de 52 % avec cette méthode conduit à des résultats presque similaires avec la méthode aléatoire simple à une intensité de 66 % (Tableau XIV).

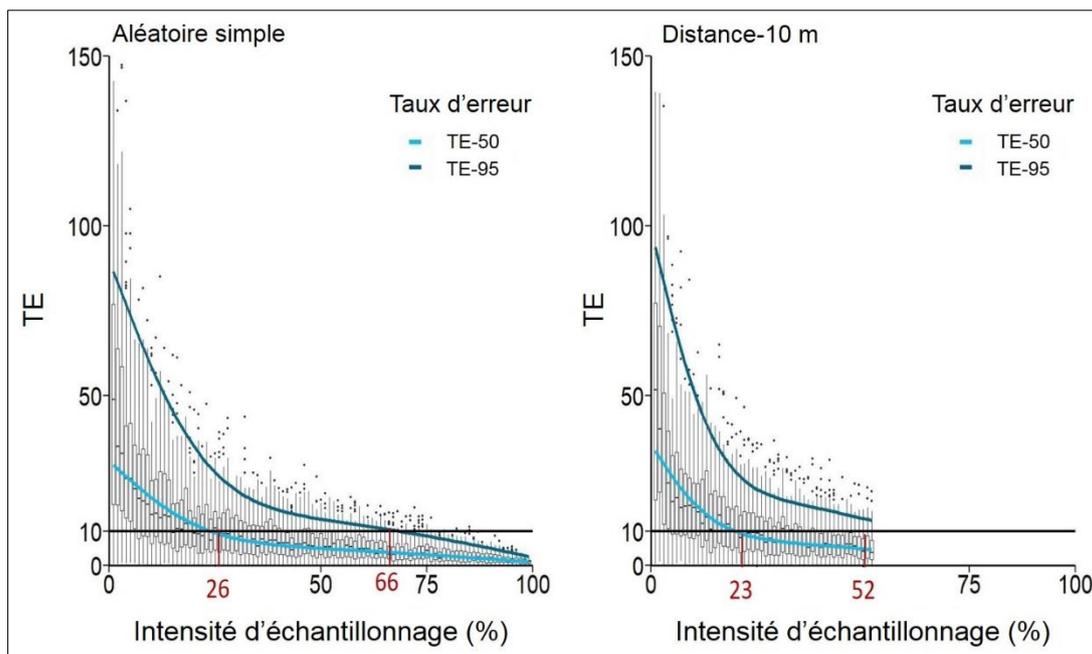


Figure 47 : Taux d'erreur (TE) en fonction de l'intensité d'échantillonnage dans le verger V7

Les courbes bleues claires et foncées représentent respectivement les valeurs de TE-50 et TE-95.

Tableau XIV : Taux d'erreur (TE) et production estimée selon la méthode et l'intensité d'échantillonnage dans le verger V7

Méthodes d'échantillonnage	I (%)	TE moyen (%)	TE-50 (%)	TE-95 (%)	Prod. Estimée (nombre de fruits)	Prod. Réelle (nombre de fruits)
Aléatoire simple	10	18,12 ± 14,75	14,85	42,78	12 495	
Aléatoire simple	26	10,45 ± 8,15	8,70	24,28	12 397	
Aléatoire simple	66	4,08 ± 3,18	3,19	9,94	12 202	12 087
Distance-10 m	23	10,77 ± 8,03	9,40	24,40	12 240	
Distance-10 m	52	5,27 ± 4,65	3,70	14,50	12 191	

7.1.3.3. Verger V19

La figure 48 et tableau XVI présentent les résultats des méthodes d'échantillonnage aléatoire simple et liée à la contrainte de distance de 15 m recommandées dans le verger V19. Dans ce verger, la méthode aléatoire simple utilisée à une intensité de 8 % (Figure 48) a permis d'obtenir un TE-50 inférieur à 10 % et un TE-95 de 27 %. Une intensité d'échantillonnage de 10 % (31 arbres) a donné un taux d'erreur moyen de 10 % avec un TE-50 de 8,84 % et un TE-95 de 28,51 % (Tableau XVI). En utilisant cette méthode, une intensité d'échantillonnage d'au moins 44 % des arbres (133 arbres) a été réalisée et a conduit à une estimation en dessous des 10 % d'erreur avec une probabilité de 95 %.

La méthode liée à la contrainte de distance de 15 m a obtenu les mêmes performances à 9 % d'intensité d'échantillonnage d'arbres que la méthode aléatoire simple (Figure 48 et Tableau XVI). Cette méthode ne permet pas d'aller au-delà d'une intensité de 16 % des arbres (soit 50 arbres) dans le verger V19 à cause de la contrainte de distance imposée entre les arbres. A une intensité de 16 %, cette méthode a obtenu un taux d'erreur de 19,70 % avec le TE-95 (Figure 48). Ainsi, pour ce verger, un échantillonnage aléatoire simple d'au moins 24 arbres (8%) sur 305 au total, a été nécessaire pour obtenir une bonne estimation de la production (Tableau XVI). Toutefois, une augmentation de l'intensité d'échantillonnage (44 %, soit 133 arbres) a permis d'avoir une production estimée (21 701 fruits) quasi identique à la production réelle (21 820 fruits) du verger (Tableau XVI).

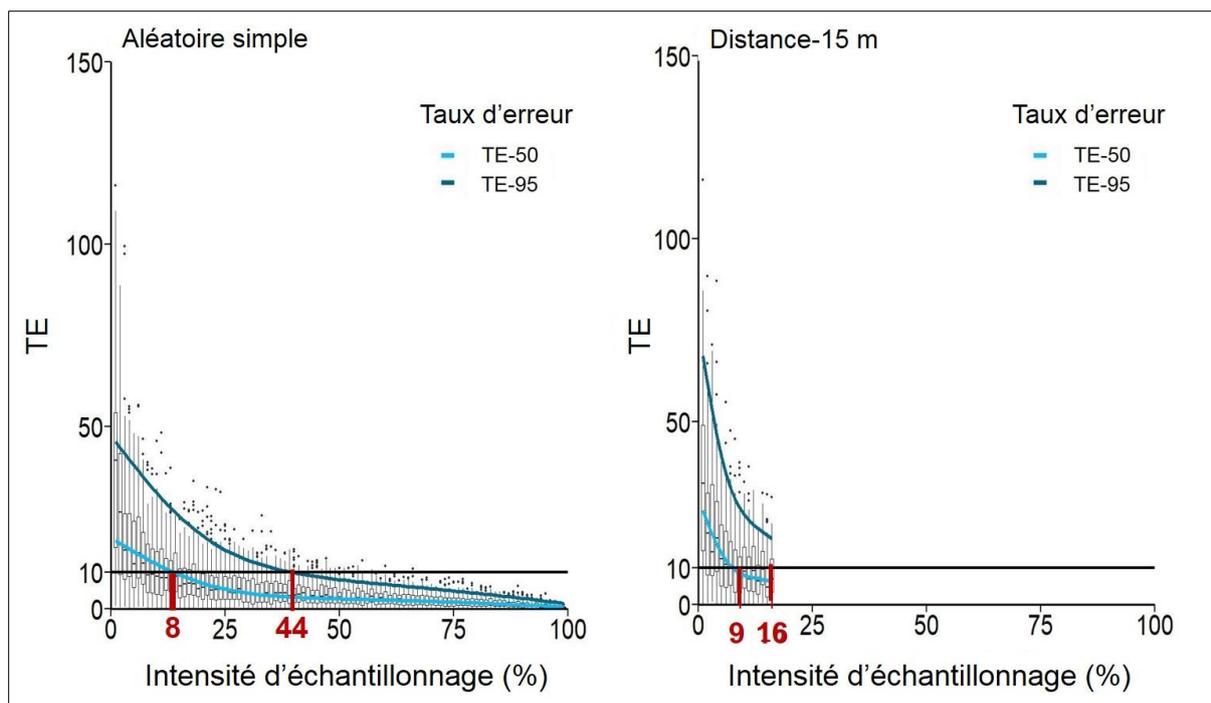


Figure 48 : Taux d'erreur (TE) en fonction de l'intensité d'échantillonnage dans le verger V19
 Les courbes bleues claires et foncées représentent respectivement les valeurs de TE-50 et TE-95.

Tableau XVI : Taux d'erreur (TE) et production estimée selon la méthode et l'intensité d'échantillonnage dans le verger V19

Méthodes d'échantillonnage	I (%)	TE moyen (%)	TE-50 (%)	TE-95 (%)	Prod. Estimée (nombre de fruits)	Prod. Réelle (nombre de fruits)
Aléatoire simple	8	11,91 ± 9,26	9,31	27,01	22 640	
Aléatoire simple	10	10,85 ± 8,82	8,84	28,51	21 963	
Aléatoire simple	44	3,84 ± 2,80	3,48	9,46	21 701	21 820
Distance-15 m	9	9,71 ± 8,57	9,40	25,20	22 222	
Distance-15 m	16	8,16 ± 6,13	7,00	19,70	22 673	

7.2. Discussion

7.2.1. Variabilité de production entre les vergers

La variabilité structurale des arbres au sein du verger peut être exploitée pour mettre au point des stratégies d'échantillonnage d'arbres pour estimer la production (Sarron, 2019). C'est pourquoi la variabilité de production entre les trois vergers choisis a été analysée. Les résultats obtenus ont montré une distribution différente de la production des arbres dans chaque verger. La production moyenne d'un arbre du verger V1 a été de 122 fruits contre 70 fruits pour les arbres des vergers V7 et V19. De plus, la distribution de la production dans le verger V1 a été moins hétérogène avec un coefficient de variation (CV) plus faible (46,80 %) que dans les vergers V7 (CV = 103,10 %) et V19 (CV = 78,70 %). Le coefficient de variation de la production chez V1 est très proche de celui de Payne *et al.* (2013) et de Peeters *et al.* (2015) qui ont rapporté un coefficient de variation de 44 et 56 % dans deux vergers de manguiers et 42 % dans un verger de pamplemousses, respectivement. Le coefficient de variation pour V1 est aussi semblable à ceux des vergers intensifs dans les Niayes au Sénégal, avec des valeurs de 32 à 37 % (Sarron, 2019).

La variabilité observée entre la production des trois vergers pourrait être tributaire aux pratiques culturales telles que le labour, le désherbage, l'environnement, mais aussi de facteurs endogènes aux arbres et de la topographie des sites. En effet, les arbres du verger V1 ont été en moyenne plus productifs. Ce verger a bénéficié d'une taille de ses arbres après la récolte de 2019, contrairement aux deux autres vergers. Cette taille aurait contribué à la productivité de ses arbres. Ce verger pourrait aussi se situer dans une zone qui bénéficie d'un microclimat plus favorable à la production des arbres. La présence de jeunes arbres, de petites dimensions dans V19, pourrait aussi être un facteur de la variabilité de production entre les vergers.

Une variabilité spatiale de la production des arbres a été aussi observée par Aggelopoulou *et al.* (2010) dans un verger de pommiers avec un coefficient de variation faible de 21 %. Cette variabilité a été corrélée à la topographie du verger, à l'aspect et à la disponibilité de la lumière. Mann *et al.* (2011) ont également mis en évidence un coefficient de variation de 50,43 % au niveau de la production des arbres d'une plantation d'agrume. Les auteurs ont indiqué que cette variabilité est due à une dépendance spatiale des caractéristiques des arbres et du sol. Sarron (2019) a souligné que la structure du verger a un impact sur la production, mais n'est pas le principal facteur expliquant la variabilité spatiale de la production des arbres.

Les facteurs d'hétérogénéité qui ont plus d'effet seraient la variation spatiale des caractéristiques du sol, à la fois la fertilité et la teneur en eau qui pourraient être exacerbées par le faible niveau d'intrants qui caractérise ce système de culture. De plus, la variabilité morphologique et/ou génétique du matériel de plantation, en particulier des porte-greffes, au moment de la plantation en fait partir. Selon Zaman & Schumann (2006), la variabilité de la qualité du sol est un facteur majeur qui affecte le rendement des plantations d'agrumes. La variation du sol à l'intérieur d'un même verger, peut entraîner une variation du taux de matière organique. La variation du taux de matière organique peut entraîner une hétérogénéité du rendement en raison de son effet sur le sol, tant sur les propriétés chimiques que physiques. Cependant, Zagbaï *et al.* (2006) et Djaha *et al.* (2014) ont indiqué que les sols de la région du Poro sont en général désaturés, peu humifères et de fertilité moyenne. Aussi, l'alternance de production pourrait-t-elle avoir un impact éventuel sur la variabilité de production observée dans les trois vergers en raison de la production des arbres une année sur deux.

7.2.2. Méthodes d'échantillonnage d'arbres

Les producteurs échantillonnent généralement moins de 5 % d'arbres pour estimer la production (Qureshi *et al.*, 2017 ; Anderson *et al.*, 2019). Si le choix des arbres échantillonnés peut être fait de manière totalement aléatoire, il n'est pas sûr que cette méthode d'échantillonnage soit adéquate. En effet, elle ne prend pas en compte les éventuelles variabilités intra-parcellaires observées comme la variabilité de matériel génétique (porte-greffe et variété), la productivité, la structure et l'âge des arbres. Actuellement, l'estimation de la production de chaque arbre se fait en comptant visuellement le nombre de fruits augmentant l'imprécision de l'estimation. Dans cette étude quatre méthodes d'échantillonnage adaptées pour estimer le rendement des vergers manguiers dans la région du Poro, au nord de la Côte d'Ivoire ont été évaluées. Les résultats ont révélé une corrélation entre la variabilité de la production des arbres dans le verger, l'efficacité de la méthode d'échantillonnage et le nombre d'arbres à échantillonner pour atteindre au maximum 10 % d'erreur. La méthode d'échantillonnage par groupe de production a été la plus efficace pour estimer le rendement des vergers de la zone. La méthode d'échantillonnage aléatoire simple a aussi obtenu de bonnes performances comparables aux méthodes liées à la contrainte de distance.

Par ailleurs, les quatre méthodes d'échantillonnage étudiées ont été plus efficaces dans le verger V1 contrairement aux vergers V7 et V19. Les meilleures performances des méthodes d'échantillonnage dans V1 s'expliqueraient par le fait que ce verger a une faible variabilité de production de ses arbres. Ces performances sont similaires à celles obtenues dans les vergers

intensifs au Sénégal (Sarron, 2019). Les performances plus faibles des méthodes d'échantillonnage observées dans les vergers V7 et V19 pourraient être la conséquence logique d'une plus forte variabilité de production dans ces vergers. Ces observations corroborent celles de Sarron (2019), qui a souligné que l'erreur d'estimation du rendement par échantillonnage dépend, de la variabilité de production des arbres décrite par le coefficient de variation. En effet, plus la variabilité de production est forte, plus le nombre d'arbres à échantillonner est grand pour atteindre un taux d'erreur acceptable de 10 % (Anderson *et al.*, 2019). Dans cette étude et comme mentionné plus haut, le coefficient de variation de la production des arbres a été plus élevé dans les vergers V7 et V19 que dans le verger V1. En agriculture de précision, plusieurs études ont montré l'intérêt du regroupement d'arbres pour délimiter les zones du verger pour une gestion précise (Mann *et al.*, 2011 ; Zaman & Schumann, 2006). Cette méthode par regroupement, a permis dans certains cas d'améliorer l'estimation du rendement. Sarron (2019) a utilisé le regroupement des arbres en fonction du volume de leurs couronnes pour améliorer la précision de l'estimation du rendement dans un verger diversifié dans la zone des Niayes au Sénégal. Cela n'a pas été le cas dans cette étude. Par ailleurs, de nombreuses autres études ont été orientées vers le regroupement des arbres en utilisant d'autres caractéristiques plus corrélées à la production des arbres comme la circonférence du tronc pour améliorer l'estimation du rendement du verger (Peeters *et al.*, 2015).

7.2.3. Méthode d'échantillonnage retenue pour les trois vergers

Dans cette étude, la méthode d'échantillonnage basée sur les groupes de production a été la plus efficace pour estimer le rendement des vergers. Cependant, la mise en œuvre d'une telle méthode nécessite la connaissance au préalable de la production de chaque arbre du verger pour former les groupes de production (Anderson *et al.*, 2019). Par ailleurs, des pistes peuvent être explorées pour construire les groupes de production. Il s'agit de la connaissance des variables comme la vigueur de l'arbre et la quantité de végétation traduite par l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) ou encore la circonférence du tronc (Rahman *et al.*, 2018). La connaissance du producteur sur la production individuelle des arbres du verger (série temporelle ou production de l'année précédente) peut être prise en compte. Connaître l'évolution passée de la production du verger aide à la prédiction de la production de l'année en cours. Cependant, cette information demeure inaccessible dans la majorité des vergers du Nord de la Côte d'Ivoire.

C'est pourquoi, pour la zone d'étude, la méthode d'échantillonnage aléatoire simple qui a obtenu des résultats très satisfaisants peut être utilisée. Cette méthode est recommandée lorsque l'intensité d'échantillonnage est moins élevée (moins de 10 % voire 20 % pour le verger

7). En effet, la méthode aléatoire simple, à ces niveaux d'intensité, présente les mêmes performances que la méthode liée à la contrainte de distance de 10 m et 15 m, mais elle est plus facile à mettre en œuvre. Un échantillonnage de 7 à 8 % des arbres (14 à 25 arbres) des vergers V1 et V19 avec la méthode aléatoire simple a conduit à un taux d'erreur de moins de 10 %. Le troisième verger V7 a nécessité d'échantillonner plus d'arbres sans doute à cause de la plus forte hétérogénéité de production de ses arbres et d'une proportion plus importante d'arbres non-productifs. Ainsi, pour ce dernier, l'échantillonnage aléatoire simple de 26 % des arbres (45 arbres) est choisi comme un compromis entre la précision de l'estimation du rendement et l'intensité de l'échantillonnage. En effet, plus la production des arbres est homogène dans le verger, plus la méthode d'échantillonnage considérée est efficace et plus le nombre d'arbres à échantillonner diminue. Cependant, la majorité des intensités d'échantillonnage se situe entre 7 et 66 % d'arbres pour atteindre 10 % d'erreur comme l'ont constaté Anderson *et al.* (2019) dans les vergers commerciaux de manguiers.

La méthode d'échantillonnage aléatoire simple peut encore être améliorée. Aujourd'hui, l'existence des méthodes d'estimation du rendement en temps réel en verger (Stein *et al.*, 2016) peut stimuler le développement d'outils innovants pour l'échantillonnage guidé en temps réel en verger. Car, l'estimation de la production par échantillonnage aléatoire reste dépendante de la manière dont l'opérateur choisit les arbres dans le verger. En utilisant un échantillonnage guidé par un outil numérique, la variabilité des arbres déjà échantillonnés peut-être rapidement évaluée et ainsi orienter l'opérateur sur le choix du prochain arbre à estimer (Thompson, 2013 ; Sarron, 2019). Cette approche qui prendra en compte la variabilité intra-verger, contribuera à un échantillonnage plus fiable pour une estimation de la production en temps réel. Ce qui peut être aujourd'hui possible grâce notamment à certains réseaux de neurones (Koirala *et al.*, 2019).

Conclusion partielle

Cette étude a consisté à évaluer des stratégies d'échantillonnage d'arbres adaptées pour estimer le rendement des vergers manguiers dans la région du Poro. Les résultats ont révélé une forte hétérogénéité de production entre les arbres à l'intérieur du verger et entre les arbres des trois vergers V1, V7 et V19 suivis. La répartition de la production dans le verger V1 a été plus homogène (CV = 46,80 %) que dans les vergers V7 (CV = 103,10 %) et V19 (CV = 78,70 %). L'analyse des méthodes d'échantillonnage a montré que la méthode par groupe de production a été la plus efficace pour estimer le rendement des vergers de la zone d'étude. Cependant, la méthode d'échantillonnage aléatoire simple a montré de bonnes performances à l'image des méthodes liées à la contrainte de distance. L'échantillonnage sur une grille régulière a affiché

les performances les moins bonnes. Dans les vergers V1 et V19, un échantillonnage aléatoire de 7 à 8 % des arbres par site avec la méthode aléatoire simple a permis d'obtenir un taux d'erreur d'estimation de la production du verger de moins de 10 %. Le verger V7, ayant une variabilité de production plus élevée a nécessité un échantillonnage de 26 % des arbres (45 arbres) pour avoir une production estimée beaucoup plus proche de la production réelle avec un pourcentage d'erreur moyen de 10 %. Cette étude ouvre la voie à l'amélioration des outils et stratégies d'estimation précise et fiable du rendement du manguier à l'échelle du verger en Côte d'Ivoire.

DISCUSSION GENERALE

Les objectifs de ce travail étaient de déterminer un intervalle de temps entre la floraison et la récolte pour estimer la maturité physiologique de la mangue de la variété 'Kent', de développer un outil d'estimation du rendement du manguier à échelle de l'arbre et d'adapter une stratégie d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger. De façon générale, il s'agit de contribuer à l'amélioration du rendement du manguier et de la qualité de la mangue, variété 'Kent' à travers la mise en place d'un modèle quantitatif et qualitatif de prévision de récolte. Pour y arriver, différentes méthodes et outils ont été utilisés pour analyser la qualité du fruit au cours du mûrissement et caractériser l'arbre et le rendement du verger.

A l'échelle du fruit, une récolte à partir de 100 jours après l'ouverture de la fleur terminale de l'inflorescence a permis d'avoir des mangues 'Kent' de bonnes qualités organoleptiques au cours du mûrissement post-récolte. Des résultats similaires ont été obtenus par Dick *et al.* (2009) sur la mangue 'Kent' récoltée à Korhogo au nord de la Côte d'Ivoire. Selon Abu *et al.* (2021), les mangues ayant une maturité physiologique insuffisante n'auront pas de bonnes qualités organoleptiques et nutritionnelles notamment en vitamines A et C. Ces travaux confirment ceux de Léchaudel *et al.* (2010) pour qui la qualité finale du fruit est indissociable de son niveau de maturité physiologique à la récolte. Contrôler et maîtriser le niveau de maturité de la mangue à la récolte reste un réel défi à relever en Afrique de l'ouest, où il existe peu méthode fiable pour estimer la maturité de la mangue avant ou pendant la récolte, à ce jour. Cette situation justifie dans la pratique les quantités de mangue écartées qui pourrissent dans les champs et les quantités rejetées en station de conditionnement pour immaturité physiologique. Coupler la durée de l'intervalle de jours entre la floraison et la récolte à l'inspection visuelle pendant la récolte permettra de réduire considérablement la quantité de mangues rejetées et les conflits entre acteurs. En effet, ces rejets de mangues constituent une perte économique pour les producteurs. Cette étude qui a permis de déterminer une période optimale pour la récolte de la mangue 'Kent' pourrait être renforcée par le développement d'autres méthodes d'estimation non destructives des mangues. Léchaudel *et al.* (2010) ont aussi souligné la nécessité d'utiliser des méthodes de mesures non destructives pour estimer le niveau de maturité du fruit à la récolte. Dans cette optique, l'analyse d'images RVB basées sur les réseaux de neurones peut être explorée vu leurs performances dans la détection des mangues dans l'arbre (Stein *et al.*, 2016 ; Koirala *et al.*, 2019). Il s'agira de s'intéresser à la capacité des réseaux de neurones à prédire le niveau de maturité physiologique du fruit avant sa récolte à partir d'une analyse d'image photographique.

A l'échelle de l'arbre, le réseau de neurones, Faster R-CNN a détecté 91 % des mangues présentes dans les images. L'utilisation du Faster R-CNN a permis d'obtenir le nombre de fruits de 230 arbres pendant deux années d'étude. Des résultats similaires ont été rapportés par Bargoti & Underwood (2017) et Sarron *et al.* (2020) avec le même réseau de neurone dans des vergers de manguiers. Ce réseau de neurones combiné à un modèle efficace et fiable (R^2 de 0,96 et un NRMSE de 5,9 %) d'estimation du rendement a donné une mesure précise de la production réelle de chaque arbre. Bien que l'analyse d'images utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique a prouvé son efficacité dans la détection, le comptage de fruits et l'estimation du rendement des arbres fruitiers (Stein *et al.*, 2016 ; Borianne *et al.*, 2019), très peu d'études se sont intéressées à leur adaptation dans les conditions particulières des vergers d'Afrique de l'Ouest. Cette étude pourrait donc offrir une alternative au manque d'outils précis et efficaces pour estimer la production du manguiers dans cette zone. Elle pourra améliorer ainsi la mauvaise qualité des données disponibles en l'Afrique de l'Ouest et plus particulièrement en Côte d'Ivoire sur le rendement du manguiers. En effet, l'absence d'outils adaptés pour la mesure de la production dans les conditions de culture de l'Afrique de l'Ouest entraîne une fiabilité médiocre des données de rendement dans toute la région (Carletto *et al.*, 2015), rendant difficile toute tentative d'amélioration des performances du système de culture et la conception d'itinéraires techniques adaptés. Les outils numériques développés dans cette étude ouvrent la voie à la possibilité d'acquisition de données fiables pour la mettre à la disposition des producteurs, des acteurs de la filière et de la recherche afin de répondre à la problématique de manque de données.

A l'échelle du verger, différentes méthodes d'échantillonnage d'arbres ont été testées pour estimer son rendement. Il s'est agi de déterminer le nombre d'arbre à échantillonner dans un verger pour estimer son rendement avec une marge la plus faible en fonction de la densité de plantation. Le réseau de neurones entraîné précédemment a été utilisé pour estimer la production de tous les arbres dans trois vergers (V1, V7 et V19). Les méthodes d'échantillonnage par groupe de production et aléatoire simple d'arbres ont obtenu de très bonnes performances pour estimer le rendement du verger. Ainsi, l'échantillonnage aléatoire simple de 14 arbres sur un total de 196 (2 ha) a suffi pour obtenir un taux d'erreur de moins de 10 % et une production estimée quasi-identique à la production réelle du verger V1. Des performances similaires ont été obtenues dans les vergers intensifs au Sénégal par Sarron (2019). En suivant la méthode d'échantillonnage aléatoire simple d'arbres, il est possible pour

le producteur de connaître le rendement de son verger avant la récolte, afin de lui permettre de planifier la gestion des récoltes.

Cette technologie pourra offrir des chances de négociation aux producteurs avant la vente et permettre aux exportateurs d'organiser leur logistique et de mieux contrôler les stocks. Des études complémentaires réalisées en 2021 dans de nouveaux vergers permettront de tester la méthode d'échantillonnage aléatoire simple d'arbres et de comparer les rendements obtenus à ceux des producteurs afin de renforcer la viabilité des outils développés. Les résultats majeurs obtenus dans cette étude montrent que des outils numériques opérationnels peuvent être mise en place et déployés auprès des acteurs de la filière pour leur permettre d'obtenir des informations fiables sur la production de mangues à différentes échelles avant la récolte. Ce travail montre ainsi qu'il est possible d'aller vers la mise en place d'un système de prévision de récolte fiable avant le début des premières récoltes.

**CONCLUSION GENERALE,
RECOMMANDATIONS ET
PERSPECTIVES**

Cette étude a été menée dans l'objectif de déterminer un intervalle de temps entre la floraison et la récolte pour estimer la maturité physiologique de la mangue de la variété 'Kent', de développer un outil pour estimer le rendement du manguier à échelle de l'arbre et d'adapter une stratégie d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger dans la région du Poro, au Nord de la Côte d'Ivoire. Les travaux ont permis de réaliser la caractérisation morphologique et physicochimique des mangues et d'analyser leur qualité au mûrissement. Au regard des résultats obtenus, la maturité physiologique de la mangue 'Kent' est atteinte 100 jours après l'ouverture de la fleur terminale de l'inflorescence dans la zone d'étude. Par ailleurs, cette période permet d'obtenir des mangues avec les meilleures caractéristiques physicochimiques et organoleptiques attendues par les consommateurs.

Ce travail a aussi exploité les performances d'un réseau de neurones (Faster R-CNN) de détection de fruits dans l'image pour estimer le rendement du manguier aux échelles de l'arbre et du verger et identifier les paramètres explicatifs de sa variabilité. Le réseau de neurones a montré une efficacité globale (F1- score) de 0,88 et une précision de détection de 91 % des mangues présentes dans l'image pour des manguiers de variété 'Kent' issus de 21 vergers en monoculture. Un modèle correctif efficace et fiable (R^2 de 0,96 et un NRMSE de 5,9 %) a pu être mis au point pour estimer le rendement en mangues à partir des fruits détectés sur les images. Ce modèle a permis d'estimer le rendement du manguier à l'échelle de l'arbre dans la région du Poro. L'étude a révélé une forte variabilité de production qui a été corrélée à la structure de l'arbre.

Des méthodes d'échantillonnage arbres adaptées à la mesure du rendement des vergers de manguier ont été testées. Le Faster R-CNN et le modèle correctif ont permis d'estimer le rendement des arbres du verger pour chaque méthode d'échantillonnage. Une forte corrélation entre la variabilité de la production des arbres, l'efficacité des méthodes et le nombre d'arbres à échantillonner pour atteindre au maximum 10 % d'erreur a été observée. La méthode d'échantillonnage par groupe de production est apparue plus efficace pour évaluer le rendement des vergers. Pour la zone d'étude, la méthode d'échantillonnage aléatoire simple est recommandée pour ses résultats satisfaisants et pour sa facilité de mise en œuvre. Un échantillonnage de 7 à 26 % des arbres avec cette méthode, conduit à une bonne estimation du rendement du verger avec un taux d'erreur de moins de 10 %.

Cette étude a permis de déterminer un intervalle de jours entre la floraison et la récolte qui garantit un bon mûrissement de la mangue 'Kent' et de développer un outil d'estimation du rendement du verger à travers un bon dénombrement des fruits de chaque arbre.

Au regard des résultats majeurs obtenus dans cette étude, il s'avère nécessaire de faire des recommandations à l'endroit des acteurs de la filière mangue.

A l'égard des producteurs et exportateurs :

- tenir compte de l'intervalle de 100 jours après la floraison dans la récolte des fruits,
- tenir compte de la variabilité intra-parcellaire dans l'estimation du rendement du verger de manguier,
- mesurer la production d'un nombre suffisant d'arbres du verger pour obtenir une estimation plus fiable avec les méthodes d'échantillonnage.

A l'égard des pouvoirs publics et de l'Etat :

- organiser des journées scientifiques 'agriculture numérique' pour une meilleure valorisation des résultats issus de travaux innovants sur les arbres fruitiers,
- promouvoir l'agriculture de précision avec l'utilisation d'outils numériques.

Les perspectives à court et moyen termes résultant de la présente étude sont les suivantes :

- évaluer des méthodes non destructives pour estimer la maturité du fruit au champ,
- améliorer le modèle de prévision de récolte grâce à un modèle mécaniste sur le manguier (modèle V-Mango de Boudon *et al.* 2020) ou un modèle statistique de grossissement du fruits (degrés jours, Léchaudel *et al.*, 2005),
- estimer la masse et le calibre des mangues par analyse d'image et les intégrer dans l'outil d'estimation de la production,
- étudier les effets des conditions pédologiques, climatiques et culturales sur la production et la qualité de la mangue,
- tester d'autres méthodes d'échantillonnage d'arbres pour estimer le rendement du verger, notamment celle basée sur les groupes de volume des arbres.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- Abu M., Abbey D.L. & Amey K.N. (2021). Relation of harvesting time on physicochemical properties of 'Haden', 'Kent', 'Palmer' and 'Keitt' mango varieties for export and local markets. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 4 (1): 87-100.
- Abu M., Olympio N.S. & Darko O.J. (2020). Effects of different storage temperature conditions on ripening quality and shelf life of mango (*Mangifera indica*) fruits in Ghana. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 3 (2): 245-256.
- Abu M.A.S., Dheir I.M., Elsharif A.A. & Abu-Naser S.S. (2019). Mango Classification Using Deep Learning. *International Journal of Academic Engineering Research*, 3 (12): 22-29.
- Aggelopoulou K., Castrignanò A., Gemtos T. & Benedetto D.D. (2013). Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90: 119-130.
- Aggelopoulou K.D., Wulfsohn D., Fountas S., Gemtos T.A., Nanos G.D. & Blackmore S. (2010). Spatial variation in yield and quality in a small apple orchard. *Precision Agriculture*, 11: 538-556.
- Aïwa A.E. (2015). L'impact de la culture du coton sur le développement socio-économique : étude de cas de la région de Korhogo, au nord de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 11 (31): 1857-7881.
- Ambuko J., Kemunto N., Hutchinson M. & Willis O. (2017). Comparaison des caractéristiques post-récolte des fruits de Mangue produits dans des conditions agro-écologiques contrastées et récoltés à différents stades de maturité. *Journal of Agricultural Science*, 9 (8): 181.
- Amouroux P., Hoarau I., Joas J., Léchaudel M., Michels T., Normand F. & Vincenot D. (2009). Guide de Production Intégrée de Mangues à La Réunion. Montpellier, France, 126 p.
- Anderson N.T., Underwood J.P., Rahman M.M., Robson A. & Walsh K. B. (2019). Estimation of fruit load in mango orchards: tree sampling considerations and use of machine vision and satellite imagery. *Precision Agriculture*, 20: 823-839.
- Artès F. (2004). Le rôle du froid dans le maintien de la qualité et l'amélioration de la sécurité des produits alimentaires d'origine végétale. Bulletin de l'Institut International du Froid - n°2004-1 Cartagène, Espagne, 14 p.
- Asrey R., Patel V.B., Barman K. & Pal R.K. (2013). Pruning affects fruit yield and postharvest quality in mango (*Mangifera indica* L.) cv. Amrapali. *Fruits*, 68: 367-380.

- Assoi K.N.E., Dibi W., Kouakou K.A., Kouakou K.B., Koffi T. & Zoueu T.J. (2019). Nouvel outil de mesure non destructive de la qualité des mangues par télédétection. *Afrique science*, 15 (2): 106-116.
- Bally I.S.E. & Ibell P.T. (2015). Improvement of mango tree architecture. *Acta Horticulturae*, 1075: 59-64.
- Bally I.S.E. (2006). *Mangifera indica* (mango). In: Traditional trees of pacific islands. Permanent Agriculture Resources. Craig R. Elevitch, Holualoa, Hawaï, aux États-Unis, pp 441-465.
- Bargoti S. & Underwood J. (2017). Deep fruit detection in orchards. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 29 May-3 June 2017, Singapore, Malaisie, pp 3626-3633.
- Barthélémy D. & Caraglio Y. (2007). Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, 99: 375-407.
- Birdal A.C., Avdan U. & Türk T. (2017). Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8: 1144-1156.
- Bivand R.S., Pebesma E. & Gómez-Rubio V. (2013). Applied Spatial Data Analysis with R. Second Edition, *Springer*, New York, Etats-Unis, 414 p.
- Blasco J., Aleixos N., Gómez-Sanchis J. & Moltó E. (2009). Recognition and classification of external skin damage in citrus fruits using multispectral data and morphological features. *Biosystems Engineering*, 103: 137-145.
- Bompard J.M. (2009). Taxonomy and Systematic. In: *The mango: botany, production and uses*. 2nd edition, Litz R.E., Wallingford, Etats-Unis, pp 19-34.
- Bonora E., Noferini M., Vidoni S. & Costa G. (2013). Modeling fruit ripening for improving peach homogeneity in planta. *Scientia Horticulturae*, 159: 166-171.
- Borianne P., Sarron J., Borne F. & Faye E. (2019). “Deep Mangoes: From Fruit Detection to Cultivar Identification in Colour Images of Mango Trees.” *arXiv:1909.10939*. 8.
- Boudon F., Persello S., Jestin A., Briand A-A., Grechi S., Fernique P., Guédon Y., Léchaudel M., Lauri P-E. & Normand F. (2020). V-Mango: a functional–structural model of mango tree growth, development and fruit production. *Annals of Botany*, 126 (4): 745-763.
- Brecht K.J. (2020). Mango postharvest best management practices manual. University of Florida, Etats-Unis, 73 p.
- Campbell R.J. & Campbell C.W. (1994). A Guide to Mangoes in Florida. *Fairchild Tropical Garden*, First Edition, Miami, Etats-Unis, ISBN-10: 0963226401.

- Capelli M. (2017). Décrypter l'irrégularité de production des fruitiers tropicaux via l'analyse des coûts de la reproduction. Le cas du manguier (*Mangifera indica* L.). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier (Montpellier, France), 252 p.
- Carletto C., Jolliffe D. & Banerjee R. (2015). From Tragedy to Renaissance: Improving Agricultural Data for Better Policies. *The Journal of Development Studies*, 51: 133-148.
- Carlos A.S., Crookston L.N., Hudak T.A. & Vierling A.L. (2015). LiDAR Data Processing and Visualization, Package 'rLiDAR', 20 p.
- Castro D.I.A., Jiménez-Brenes M.F., Torres-Sánchez J., Peña M.J., Borra-Serrano I. & López-Granados F. (2018). « 3-D Characterization of Vineyards Using a Novel UAV Imagery-Based OBIA Procedure for Precision Viticulture Applications ». *Remote Sensing*, 10: 4.
- CBI. (2019). Analyse de la chaîne de valeur des fruits transformés au Burkina Faso, au Mali et en Côte d'Ivoire. Rapport d'analyse pour le Centre pour la Promotion des Importations, 178p.https://www.cbi.eu/sites/default/files/2019_vca_west_afrika_processed_fruits_fr.pdf.
- Combris P., Amiot-Carlin M.J., Caillavet F., Causse M., Dallongeville J., Padilla M., Renard C. & Soler L.G. (2008). Les fruits et légumes dans l'alimentation. Enjeux et déterminants de la consommation. Rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 127 p.
- Connor D.J., Gómez-del-Campo M., Rousseaux M.C. & Searles P.S. (2014). Structure, management and productivity of hedgerow olive orchards. *Scientia Horticulturae*, 169: 71-93.
- Costes E., Lauri P.-É. & Regnard J.L. (2010). Analyzing fruit tree architecture: implications for tree management and fruit production. *Horticultural reviews*, 32: 1-61.
- Coulibaly A. (2021). Méthodes de lutte intégrée incluant l'utilisation de *Oecophylla longinoda* (Hymenoptera: Formicidae), de l'huile de neem (Azadirachtine) et de Success appât (Spinosad) dans la lutte contre les mouches des fruits du manguier au nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 193 p.
- Crane J.H., Salazar-García S., Lin T.S., De Queiroz Pinto A.C. & Shü Z.H. (2009). Crop production: Management. In: *The Mango: botany, production and uses*. 2nd edition, Litz R.E., Wallingford, Etats-Unis, pp 432-472.
- Dambreville A., Lauri P.-É., Normand F. & Guédon Y. (2015). Analysing growth and development of plants jointly using developmental growth stages. *Annals of Botany*, 115: 93-105.

- Dambreville A., Normand F. & Lauri P.-É. (2013). Plant growth co-ordination *in natura*: a unique temperature-controlled law among vegetative and reproductive organs in mango. *Functional Plant Biology*, 40: 280-291.
- Dambreville A. (2012). 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. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 182 p.
- Davenport T.L. (2003). Management of flowering in three tropical and subtropical fruit tree species. *Horticultural Science*, 38 (7): 1331-1335.
- Davenport T.L. (2009). Reproductive physiology. In *The Mango: Botany, Production and Uses*, 2nd Edition, Litz R.E., Wallingford, Etats-Unis, pp 97-169.
- De Bon H., Fondio L., Dugué P., Coulibaly Z. & Yannick Biard Y. (2019). Etude d'identification et d'analyse des contraintes à la production maraîchère selon les grandes zones agro-climatiques de la Côte d'Ivoire. Rapport d'expertise, 140 p.
- De Laroussilhe F. (1980). *Le manguier-Techniques agricoles et productions tropicales*. Edition Gustave-Paul Maisonneuve et Larose, Paris, France, 312 p.
- Delroise A. (2003). Caractérisation de la qualité et étude du potentiel de maturation de la mangue (*Mangifera indica* L. Lirfa) en fonction de son stade de récolte. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies de Génie Biologique, Université de Technologie Compiègne (Ile de la Réunion, France), 61 p.
- Diakabana P., Kobawila S.C., Massengo V. & Louembe D. (2013). Effet du degré de maturation sur la cinétique de fermentation éthylique de la pulpe de mangue cultivar Boko. *Journal of Experimental Biology*, 09 (01): 1-8.
- Diarrassouba N., Silue S., Fofana J.I., Dago N.D., Kouamé N.M.T. & Koffi K.E. (2014). Caractérisation et évaluation des vivriers dans un système d'exploitation agricole à base de coton dans le département de Sinématiali-Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8 (4): 1656-1668.
- 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. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal), 174 p.
- Díaz-Varela R., De la Rosa R., León L. & Zarco-Tejada P. (2015). High-Resolution Airborne UAV Imagery to Assess Olive Tree Crown Parameters Using 3D Photo Reconstruction: Application in Breeding Trials. *Remote Sensing*, 7: 4213-4232.

- Dick E., Adopo A.N., Camara B. & Moudioh E. (2009). Influence of maturity stage of mango at harvest on its ripening quality. *Fruits Journal*, 64: 13-18.
- Diop A., Méot J.-M., Léchaudel M., Chiroleu F., Diop N.D.N., Mertz C., Cissé M. & Chillet M. (2021). Impact of Preharvest and Postharvest on Color Changes during Convective Drying of Mangoes. *Foods*, 10: 490.
- Djaha A. J.-B., N'da H.A., Koffi K. E., Adopo A.A. & Ake S. (2014). Diversité morphologique des accessions d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) introduits en Côte d'Ivoire. *Revist Ivoire Sciences Technological*, 23: 244-258.
- Doukouré C.F. & Kodjo A.A. (2018). Impact du conseil agricole sur les performances des producteurs d'anacarde de Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 14 (30): 1857-7881.
- Dro B., Soro D., Koné M.W., Bakayoko A. & Kamanzi K. (2013). Evaluation de l'abondance de plantes médicinales utilisées en médecine traditionnelle dans le Nord de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 17 (3): 2631-2646.
- Ducamp M.N. (2002). Physiologie post-récolte et conservation de la mangue. In: *Journée manguiers-Réunion annuelle CIRAD-Flhor*. Programme arboriculture fruitière, Montpellier, France, pp 19-20.
- Edelin C. (1984). L'architecture monopodiale: L'exemple de quelques arbres d'Asie tropicale. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II (Montpellier, France), 258 p.
- El Masry G., Wang N., ElSayed A. & Ngadi M. (2007). Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*, 81: 98-107.
- Evans J.S. (2020). SpatialEco. R package version 1.3-4.
- FAO. (2019). The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on Food loss and waster reduction. Rome, Italy, 182 p. <http://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>.
- Faye E., Sarron J., Diatta J. & Borianne P. (2019). PixFruit : un outil d'acquisition, de gestion, et de partage de données pour une normalisation de la filière Mangue en Afrique de l'Ouest aux services de ses acteurs. *Symposium "Agriculture Numérique en Afrique"*, 28-30 Avril 2019, Dakar, Senegal, pp 10-11.
- Faye E., Rebaudo F., Yáñez-Cajo D., Cauvy-Fraunié S. & Dangles O. (2016). A toolbox for studying thermal heterogeneity across spatial scales: From unmanned aerial vehicle imagery to landscape metrics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7: 437-446.
- Fifanou V.G., Ousmane C., Gauthier B. & Brice S. (2011). Traditional agroforestry systems and biodiversity conservation in Benin (West Africa). *Agroforestry Systems*, 82: 1-13.

- Galán S.V. (2013). Worldwide mango production and market: current situation and future prospects. *Acta Horticulturae*, 992 : 37-48.
- Garridonovell C., Pérezmarin D., Amigo J.M., Fernández J., Guerrero J.E. & Garrido varo A. (2012). Grading and color evolution of apples using RGB and hyperspectral imaging vision cameras. *Journal of Food Engineering*, 113: 281-288.
- Gerbaud P. (2021). La mangue plus forte que la covid. *FruiTrop*, 274 : 48-90.
- Gerbaud P. (2020). Mangue d’Afrique de l’Ouest : La menace de la mouche du fruit. *FruiTrop*, 267, 2p.
- Gerbaud P. (2018). Bilan mangue 2017 sur le marché européen. *FruiTrop*, 255 : 48-74.
- Gerbaud P. (2015). Mangue. Progression des tonnages et concentration des campagnes. *FruiTrop*, 230: 32-59.
- Ghannay S. (2017). Etude sur les représentations continues de mots appliquées à la détection automatique des erreurs de reconnaissance de la parole. Thèse de Doctorat, Université Bretagne Loire (France), 204 p.
- Goguey T. (1995). Approche architecturale des mécanismes de la croissance aérienne et de la floraison du manguier. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 264 p.
- Gongal A., Amatya S., Karkee M., Zhang Q. & Lewis K. (2015). Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116: 8-19.
- Hallé F., Oldeman R.A. & Tomlinson P.B. (1978). Tropical trees and forests. An architectural analysis. 1st edition, *Springer Verlag*, Berlin, Germany, 444 p.
- Herrero-langreo A., Lunadei L., Lle L., Diezma B. & Ruiz-Altisent M. (2011). Multispectral vision for monitoring peach ripeness. *Journal of Food Science*, 76 (2): E178-E187.
- Issarakraisila M., Considine J.A. & Turner D.W. (1997). Vegetative and reproductive growth aspects of mango growing in a mediterranean climate in Western Australia. *Acta Horticulturae*, 455: 56-63.
- Iyer C.P.A. & Schnell R.J. (2009). Breeding and genetics. In: *The Mango: Botany, Production and Uses*. 2nd edition, Litz R.E., Wallingford, Etats-Unis, pp 67-96.
- Jeuffroy M.-H., Casadebaig P., Debaeke P., Chantal Loyce C. & Meynard J.-M. (2014). Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 34: 121-137.

- Jha S.N., Narsaiah K., Jaiswal P., Bhardwaj R., Gupta M., Kumar R. & Sharma R. (2014). Nondestructive prediction of maturity of mango using near infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 124: 152-157.
- Jiménez A.R., Ceres R. & Pons J.L. (2000). A survey of computer vision methods for locating fruit on trees. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 43 (6): 1911-1920.
- Jiménez-Brenes F.M., López-Granados F., De Castro A.I., Torres-Sánchez J., Serrano N. & Peña J.M. (2017). Quantifying pruning impacts on olive tree architecture and annual canopy growth by using UAV-based 3D modelling. *Plant Methods*, 13: 55.
- Joas J. & Léchaudel M. (2009). La récolte et la conservation. In *Guide de Protection Intégrée de Mangues à La Réunion*, Vincenot Didier et Normand Frédéric, Montpellier, France: 105-118.
- Jorge A., Osuna G., Martínez V.P., Henríquez P. & Lizano M. (2013). Production, post-récolte et hygiène alimentaire de la mangue. Rapport du Projet Revitalizing a Cherished Crop: Mango Chain Development, Port-au-Prince, Haïti, 75 p.
- Joubert J.P., Robbertse P.J., Coetzer L.A. & Wishart D.L. (1993). Inflorescence characteristics and flower sex ratio studies of container-grown mango trees. *South African Mango Growers' Association Yearbook*, 13: 27-33.
- Julio N.B., Miguel J.H.H. & Francisco J.H. (2014). Determination of technological maturity of grapes and total phenolic compounds of grape skins in red and white cultivars during ripening by near infrared hyperspectral image: A preliminary approach. *Food Chemistry*, 152: 586-591.
- 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. Thèse de Doctorat, Université de la Nouvelle-Calédonie (Nouvelle-Calédonie, France), 217 p.
- Kamilaris A. & Prenafeta-Boldú F.X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147: 70-90.
- Kasse M. (2015). Amélioration de la conservation des mangues 4ème gamme par l'utilisation d'un enrobage, d'un traitement antimicrobien et du conditionnement sous atmosphère modifiée. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal), 140 p.
- Koirala A., Walsh K.B., Wang Z. & McCarthy C. (2019). Deep learning for real-time fruit detection and orchard fruit load estimation: benchmarking of 'MangoYOLO.' *Precision Agriculture*, 20: 1107-1135.

- Konan K.H., Kra K.J. & Koffi Y.S.K. (2017). La culture de la mangue à Sinématiali au nord de la Côte d'Ivoire : entre essor et sous-exportation. *Lonniya*, 1(1): 197-218.
- Koné H.S., Koné K.Y., Akaki K.D., Soro D., Elleingang F.E. & Assidjo N.E. (2018). Caractérisation biochimique de la pulpe des fruits du prunier noir (*Vitex Doniana*) de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal January*, 14 (3): 1857-7881.
- Koné M., Aman A., Adou Y.C.Y., Coulibaly L. & N'Guessan K.É. (2007). Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*, 7 (1-2-3-4): 433-446.
- Kouakou A.L. (1995). Les haie-vives traditionnelles et modernes en pays senoufo. Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, Université Paris XII Val de Marne (Paris, France), 81 p.
- Kouamé G.K., Sorho F., Koné D., Bomisso L.E., Ake S. & Yatty J. (2011). Activité pathologique comparée de deux isolats de *Colletotrichum gloeosporioides* (PENZ.) sur deux variétés de mangues (*Mangifera indica* L.). *Agronomie Africaine*, 23 (1): 33-41.
- Kouamé N. & Sinan A.A. (2016). Impact socio-économique de la culture de l'anacarde dans la Sous-Préfecture d'Odienné (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12 (32): 1857-7881.
- Kumar R. (2015). Rejuvenating old, senile orchards of tropical and subtropical fruits for enhanced production and improved quality. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 85: 295-313.
- Lalel H.J.D., Singh Z. & Tan S.C. (2003). Maturity stage at harvest affects fruit ripening, quality and biosynthesis of aroma volatile compounds in 'Kensington Pride' mango. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78: 225-233.
- Lauri P.-É. & Trottier C. (2004). Patterns of size and fate relationships of contiguous organs in the apple (*Malus domestica*) crown. *New Phytologist*, 163: 533-546.
- Léchaudel M., Lopez-Lauri F., Vidal V., Sallanon H. & Joas J. (2012). Response of the physiological parameters of mango fruit (transpiration, water relations and antioxidant system) to its light and temperature environment. *Journal of plant physiology*, 170 (6): 567-576.
- Léchaudel 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.

- Léchaudel M. & Joas J. (2007). An overview of preharvest factors influencing mango fruit growth, quality and postharvest behaviour. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19: 287-298.
- Léchaudel M., Vercambre G., Lescourret F., Normand F. & Génard M. (2007). An analysis of elastic and plastic fruit growth of mango in response to various assimilate supplies. *Tree Physiology*, 27: 219-230.
- 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., Génard M., Lescourret F., Urban L. & Jannoyer M. (2005). Modeling effects of weather and source-sink relationships on mango fruit growth. *Tree Physiology*, 25 (5): 583-597.
- Lecun Y. (2016). Le « *Deep learning* » : une révolution en Intelligence artificielle. Leçon Inaugurale au Collège de France, *la lettre du Collège de France*, 13 p. <http://journals.openedition.org/lettre-cdf/3227>.
- Leroux L. (2015). Suivi et Caractérisation des Dynamiques de la Production Agricole en Afrique de l'Ouest par Télédétection à Moyenne Résolution Spatiale. Thèse de Doctorat ParisTech, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Montpellier, France), 285 p.
- Lespinasse J. M. & Delort F. (1986). Apple tree management in vertical axis: appraisal after ten years of experiments. *Acta Horticulturae*, 160: 120-155.
- Linker R. (2017). A procedure for estimating the number of green mature apples in night-time orchard images using light distribution and its application to yield estimation. *Precision Agriculture*, 18: 59-75.
- Linker R., Cohen O. & Naor A. (2012). Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81: 45-57.
- Lisein J., Michez A., Claessens H. & Lejeune P. (2015). Discrimination of Deciduous Tree Species from Time Series of Unmanned Aerial System Imagery. *PLoS ONE*, 10 (11): e0141006.
- Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchis J., Cubero S., García-Navarrete O.L. & Blasco J. (2012). Recent Advances and Applications of Hyperspectral Imaging for Fruit and Vegetable Quality Assessment. *Food Bioprocess Technology*, 5: 1121-1142.

- Mackels C. (2008). Modélisation des pertes de rendement des cultures de blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg sur base de l'étude des surfaces photosynthétiquement actives. Thèse de Doctorat, Université de Liège (Liège, Belgique), 151 p.
- Mann K.K., Schumann A.W. & Obreza T.A. (2011). Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. *Precision agriculture*, 12: 457-472.
- Massonnet C. (2004). Variabilité architecturale et fonctionnelle du système aérien chez le pommier (*Malus domestica* Borkh.): comparaison de quatre cultivars par une approche de modélisation structure-fonction. Thèse de Doctorat, école nationale supérieure agronomique de Montpellier (Montpellier, France), 282 p.
- Menzel C.M. & Le Lagadec M.D. (2017). Can the productivity of mango orchards be increased by using high-density plantings? *Scientia Horticulturae*, 219: 222-263.
- Mieu B. (2017). Côte d'Ivoire : le gouvernement veut restructurer la filière mangue. www.Jeuneafrique.com. 12 p. Consulté le 21 février 2020.
- Minhibo Y.M., Akpessa A.A.M., Diby Y.K.S. & Koua K.H. (2019). Effectiveness of prophylactic methods in fruit fly management in northern Côte d'Ivoire. *European Journal of Biotechnology and Bioscience*, 7 (3): 84-87.
- Mitra S.K. (2016). Mango production in the world-present situation and future prospect. *Acta Horticulturae*, 1111: 287-296.
- Monselise S.P. & Goldschmidt E.E. (1982). Alternate bearing in fruit trees. *Horticultural Reviews*, 4: 128-173.
- Montanaro G., Dichio B. & Xiloyannis C. (2010). Significance of fruit transpiration on calcium nutrition in developing apricot fruit. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173: 618-622.
- Monteiro F., Catarino L., Batista D., Batista D., Indjai B., Duarte M.C. & Romeiras M.M. (2017). Cashew as a High Agricultural Commodity in West Africa: Insights towards Sustainable Production in Guinea-Bissau. *Sustainability*, 9: 1666.
- Mukherjee S.K. & Litz R.E. (2009). Botany and Importance. In: *The mango: botany, production and uses*. 2nd edition, Litz R.E., Wallingford, Etats-Unis: 1-18.
- N'Dépo O.R., Hala N.F., Allou K., Aboua L.R., Kouassi K.P., Vayssières J.F. & De Meyer M. (2009). Abondance des mouches des fruits dans la zone de production fruitière de Côte d'Ivoire: dynamique des populations de *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae). *Fruits*, 64 (5): 313-324.

- N'Guettia M. Y., Diallo H. A., Kouassi N. & Coulibaly F. (2013). Diversité morphologique et pathogénique des souches de *Colletotrichum* sp. responsables de l'antracnose de la mangue en Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 18 (3): 2775-2784.
- Nandi C.S., Tudu B. & Koley C. (2012). An automated machine vision based system for fruit sorting and grading, *Sixth International Conference on Sensing Technology*, 18-21 December 2012, Kolkata, India, pp 195-200.
- Nevalainen O., Honkavaara E., Tuominen S., Viljanen N., Hakala T., Yu X., Hyypä J., Saari H., Pölönen I., Imai N.N. & Tommaselli A.M.G. (2017). Individual Tree Detection and Classification with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging. *Remote Sensing*, 9: 185.
- Ngao J., Martinez S., Marquier A., Bluy S., Saint-Joanis B., Costes E. & Pallas B. (2021). Spatial variability in carbon- and nitrogen-related traits in apple trees: the effects of the light environment and crop load. *Journal of Experimental Botany*, 72 (5): 1933-1945.
- 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. (2014). Analyse expérimentale et modélisation de l'hétérogénéité de la qualité et de la maturité des mangues. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon (Avignon, France), 222 p.
- Nordey T., Léchaudel M., Saudreau M., Joas J. & Génard M. (2014a). Model-Assisted Analysis of Spatial and Temporal Variations in Fruit Temperature and Transpiration Highlighting the Role of Fruit Development. *PLoS ONE*, 9 (3): e92532.
- Nordey T., Joas J., Davrieux F., Génard M. & Léchaudel M. (2014b). Non-destructive prediction of color and pigment contents in mango peel. *Scientia Horticulturae*, 171: 37-44.
- Normand F. & Lauri P.-É. (2018). Advances in understanding mango tree growth and canopy development. In: *Achieving sustainable cultivation of mangoes*. Galán Saúco Victor et Ping Lu, *Burleigh Dodds Science Publishing*, Cambridge, Angleterre: 87-119.
- Normand F. (2009). Le manguier. In *Guide de Production Intégrée de Mangues à La Réunion*. Vincenot Didier et Normand Frédéric, Montpellier, France : 45-58.
- Normand F., Pambo Bello A.K., Trottier C. & Lauri P.-É. (2009). Is axis position within tree architecture a determinant of axis morphology, branching, flowering and fruiting? An essay in mango. *Annals of Botany*, 103: 1325-1336.

- PACIR. (2013). Evaluation du potentiel à l'exportation des fruits tropicaux, Côte d'Ivoire - 2013. Rapport d'analyse pour le Programme d'Appui au Commerce et à l'Intégration Régionale pour la Côte d'Ivoire, 170 p. <https://docplayer.fr/10519801-Evaluation-du-potentiel-a-l-exportation-des-fruits-tropicaux.html>.
- Panzoli D. (2008). Proposition de l'architecture « Cortexionist » pour l'intelligence comportementale de créatures artificielles. Thèse de doctorat, université de Toulouse, (Toulouse, France), 158p.
- Parrot L., Klaver D., Biard Y., Kabré E. & Vannière H. (2018). Analyse de la chaîne de valeur Mangu au Burkina Faso. Rapport d'analyse, n°2, 6 p.
- Passannet A.S., Aghofack-Nguemezi J. & Gatsing D. (2018). Variabilité des caractéristiques physiques des mangues cultivées au Tchad : caractérisation de la diversité fonctionnelle. *Journal of Applied Biosciences*, 128: 12932-12942.
- Payne A.B., Walsh K.B., Subedi P.P & Jarvis D. (2013). Estimation of mango crop yield using image analysis-Segmentation method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91: 57-64.
- Peeters A., Zude M., Käthner J., Ünlüd M., Kanberd R., Hetzronie A., Gebbers R. & Ben-Gala A. (2015). Getis-Ord's hot- and cold-spot statistics as a basis for multivariate spatial clustering of orchard tree data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 111: 140-150.
- Peng Y. & Lu R. (2006). An LCTF-based multispectral imaging system for estimation of apple fruit firmness: Part I. Acquisition and characterization of scattering images. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 49 (1): 269-275.
- Puletti N., Rita Perria R. & Storchi P. (2014). « Unsupervised classification of very high remotely sensed images for grapevine rows detection ». *European Journal of Remote Sensing*, 47 (1): 45-54.
- Qureshi W.S., Payne A., Walsh K.B., Linker R., O. Cohen O. & Dailey M.N. (2017). Machine vision for counting fruit on mango tree canopies. *Precision Agriculture*, 18: 224-244.
- Raffo M.D., Ponce N.M.A., Sozzi G.O., Vicente A.R. & Stortz C.A. (2011). Compositional Changes in 'Bartlett' Pear (*Pyrus communis* L.) Cell Wall Polysaccharides As Affected by Sunlight Conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (22): 12155-12162.
- Rahman M.M., Robson A. & Bristow M. (2018). Exploring the Potential of High Resolution WorldView-3 Imagery for Estimating Yield of Mango. *Remote Sens*, 10 : 1866.

- Rajkumar P., Wang N., Eimasry G.R & Gariepy Y. (2012). Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 108: 194-200.
- Ramírez F. & Davenport T.L. (2010). Mango (*Mangifera indica* L.) flowering physiology. *Scientia Horticulturae*, 126: 65-72.
- Ramírez F., Davenport T.L., Fischer G. & Pinzón J.C.A. (2010). The stem age required for floral induction of synchronized mango trees in the tropics. *Horticultural Science*, 45: 1453-1458.
- Ravindra M.R. & Goswami T.K. (2008). Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. *Biosystems Engineering*, 99: 239-248.
- Reddy Y.T.N., Kurian R.M., Ramachander P.R., Singh G. & Kohli R.R. (2003). Long-term effects of rootstocks on growth and fruit yielding patterns of 'Alphonso' mango (*Mangifera indica* L.). *Scientia Horticulturae*, 97: 95-108.
- Ren S., He K., Girshick R. & Sun J. (2015). Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 91-99.
- Rey J.-Y., Diallo T.M., Vannière H., Didier C., Keita S. & Sangaré M. (2004a). La mangue en Afrique de l'Ouest francophone. *Fruits*, 59 (2): 121-129.
- Rey J.-Y., Diallo T. M., Vannière H., Didier C., Keita S. & Sangaré M. (2004b). La mangue en Afrique de l'Ouest francophone : variétés et composition variétale des vergers. *Fruits*, 59 (3): 191-208.
- RGPH. (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2014 - Répertoire des localités de la région du Poro, 58p. <http://www.ins.ci/n/>.
- Roemer M.G. (2011). Premature fruit drop in mango (*Mangifera indica* L.) in Northern Vietnam. PhD thesis, University Hohenheim, (Hohenheim, Germany), 83 p.
- Roemer M.G., Hegele M., Wünsche J.N. & Huong P.T. (2008). Possible physiological mechanisms of premature fruit drop in mango (*Mangifera indica* L.) in Northern Vietnam. *Acta Horticulturae*, 903: 999-1006.
- Sa'ad F.S.A., Ibrahim M.F., Shakaff A.Y.Md., Zakaria A. & Abdullah M.Z. (2015). Shape and weight grading of mangoes using visible imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115: 51-56.
- 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.

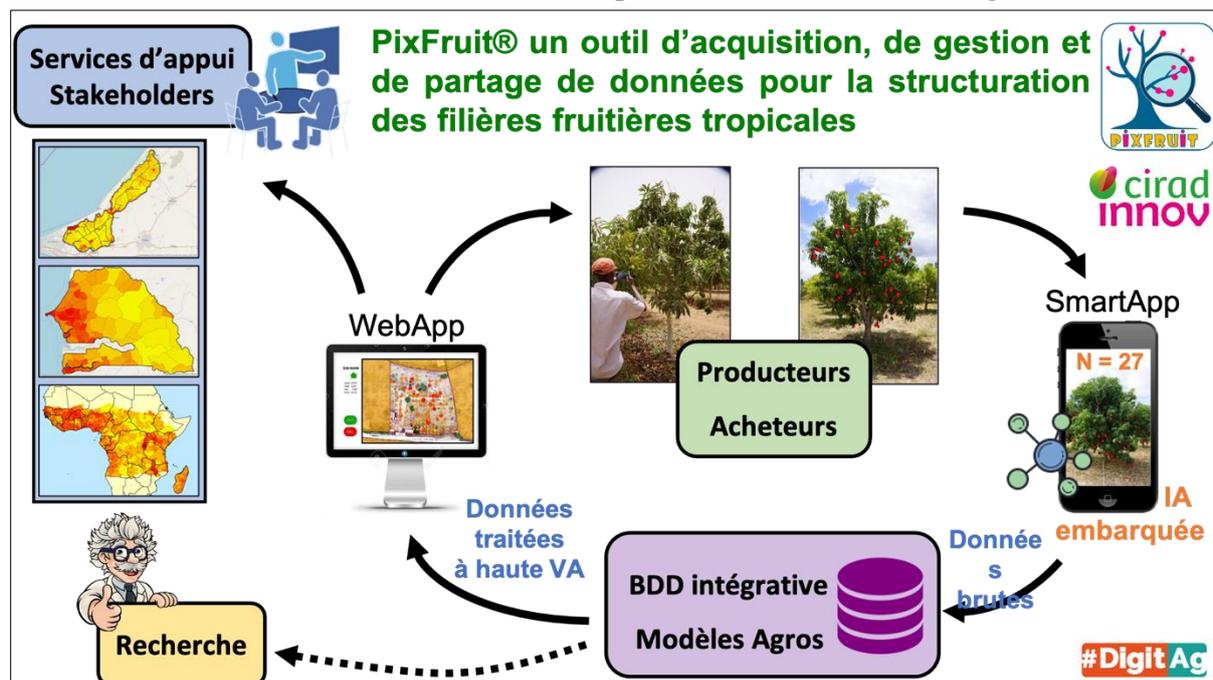
- Sarron J., Sané C.A.B., Borianne P., Malézieux E., Nordey T., Normand F., Diatta P., Niang Y. & Faye E. (2020). Is machine learning efficient for mango yield estimation when used under heterogeneous field conditions? *Acta Horticulturae*, 1279: 201-208.
- Sarron J. (2019). Estimation spatialisée des rendements d'une culture pérenne en Afrique de l'Ouest : le cas du manguier au Sénégal. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier Supagro (Montpellier, France), 259 p.
- Sarron J., Malézieux E., Sané C.A.B. & Faye E. (2018). Mango Yield Mapping at the Orchard Scale Based on Tree Structure and Land Cover Assessed by UAV. *Remote Sens*, 10: 1900.
- Schaffer B., Urban L., Lu P. & Whiley A.W. (2009). Ecophysiology. In: *The mango: botany, production and uses*. 2nd edition, Litz R.E., Wallingford, Etats-Unis: 170-209.
- Schreiner M., Korn M., Stenger M., Holzgreve L. & Altmann M. (2013). Current understanding and use of quality characteristics of horticulture products. *Scientia Horticulturae*, 163: 63-69.
- Shaib M.A.F., Abdul Rahim R., Muji Z.M.S. & Ahmad A.A.A. (2017). Investigating Maturity State and Internal Properties of Fruits Using Non-Destructive Techniques. *Telecommunication Computing Electronics and Control*, 15: 1574.
- Sib O. (2013). Analyse de la diversité et de la dynamique des systèmes agraires : cas des exploitations agropastorales de la région de Korhogo (Côte d'Ivoire). Mémoire de Master de Biologie et Productions Animales, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 96 p.
- Simonnet E. (2019). Réseaux de neurones profonds appliqués à la compréhension de la parole. Thèse de Doctorat, Université du Mans (Mans, France), 182 p.
- Singh S.K., Singh S., Sharma R. & Patel V.B. (2010). Influence of pruning intensity on flowering, fruit yields and floral malformation in three mango cultivars planted under high density. *Indian Journal of Horticulture*, 67: 84-89.
- Sitbon C. (2004). Etude de la diversité génétique des manguiers antillais (*Mangifera indica* L.) : Utilisation de marqueurs microsatellites. Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées de Productivité végétale, Biotechnologies, Génome, Université Paris 7 (Paris, France), 115 p.
- Smith H.M. & Samach A. (2013). Constraints to obtaining consistent annual yields in perennials. I: Heavy fruit load limits vegetative growth. *Plant Science*, 207: 158-167.

- Spreer W., Nagle M., Neidhart S., Carle R., Ongprasert S. & Müller J. (2007). Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on the quality of mango fruits (*Mangifera indica* L., cv. "Chok Anan"). *Agricultural Water Management*, 88: 173-180.
- Stein M., Bargoti S. & Underwood J. (2016). Image Based Mango Fruit Detection, Localisation and Yield Estimation Using Multiple View Geometry. *Sensors*, 16: 1915.
- Stephan J., Sinoquet H., Dones N., Haddad N., Talhouk S. & Lauri P.-E. (2008). Light interception and partitioning between shoots in apple cultivars influenced by training. *Tree Physiology*, 28: 331-342.
- Subedi P.P. Walsh K.B. & Owens G.P. (2007). Prediction of mango eating quality at harvest using short wave near infrared spectrometry. *Postharvest Biology Technological*, 43: 326-334.
- Sukhvibul N., Whiley A.W. & Smith M.K. (2005). Effect of temperature on seed and fruit development in three mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 105: 467-474.
- Sultana F.M.I.M., Galib S.M.D., Hasan F.M.D. & Jerin A.S. (2017). Digital Measurement of Maturity Indices of Mangoes using Selected Image Features. *Journal of Food Processing & Technology*, 8: 11.
- Sun W., Xu Z., Ibell P. & Bally I. (2021). Genetic and environmental influence on foliar carbon isotope composition, nitrogen availability and fruit yield of 5-year-old mango plantation in tropical Australia. *Journal of Soils and Sediments*, (21): 1609-1620.
- Tasie M.M., Alemimi A.B., Ali R.M. & Takeoka G. (2020). Study of physicochemical properties and antioxidant content of mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *Eurasian Journal of Food Science and Technology*, 4 (2): 91-104.
- Thompson S.K. (2013). Adaptive web sampling in ecology. *Statistical Methods and Applications*, 22 : 33-43.
- Tonelli N. & Gallouin F. (2013). Des fruits et des grains comestibles du monde entier. 1^{ère} édition, *Lavoisier*, Paris, France: 417-418.
- Toulon N. (2018). Deep learning et agriculture - Comprendre les potentiels et les défis à relever. Une étude de la Chaire AgroTIC, Bordeaux, France, 49 p. https://www.agrotic.org/wp-content/uploads/2018/12/2018_ChaireAgroTIC_DeepLearning_VD2.pdf.
- Touré S. (2012). Etude nationale mangue-Côte d'Ivoire. Rapport d'analyse pour le Centre du Commerce Internationale, Genève, 27 p.
- Ullah R., Khan S., Bilal M., Nurjis F. & Saleem M. (2016). Non-invasive assessment of mango ripening using fluorescence spectroscopy. *Optik*, 127 (13): 5186-5189.

- Usha K. & Singh B. (2013). Potential applications of remote sensing in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 153: 71-83.
- Valente M., Dornier M., Piombo G. & Grotte M. (2004). Relation entre la fermeté de la mangue fraîche et la teneur en amidon de la pulpe. *Fruits*, 59 (6): 399-410.
- Van den Broek J., Apenteng-Sackey N., Arnoldus M., Salif Keita S. & Waardenburg R. (2016). West Africa Fruit - Scoping Study. Analysis report on tropical fruits in West Africa, commissioned by the ministry of Foreign Affairs, Netherlands Enterprise Agency, Pays-Bas, 84 p.
- Vannière H., Rey J.Y. & Vayssieres J.F. (2013). PIP-Itinéraire technique-mangue (*Mangifera indica*). Edition COLEACP, Bruxelles, 88 p.
- Vannière H., Didier C., Rey J. Y., Diallo T. M., Kéita S. & Sangaré M. (2004). La mangue en Afrique de l'Ouest francophone : les systèmes de production et les itinéraires techniques. *Fruits*, 59: 383-398.
- Wallace L., Lucieer A., Malenovsky Z., Turner D. & Vopenka P. (2016). Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7: 62.
- Wen Y., Su S.-C., Jia T.-T. & Wang X.-N. (2021). Allocation of photoassimilates in bud and fruit from different leaf nodes of camellia oleifera. *American Society for Horticultural Science*, 56 (4): 469-477.
- Whiley A.W. (1992). Environmental effects on phenology and physiology of mango. *Acta Horticulturae*, 341: 168-176.
- Yeshitela T., Robbertse P.J. & Stassen P.J.C. (2005). Effects of pruning on flowering, yield and fruit quality in mango (*Mangifera indica* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 45: 1325-1330.
- Zagbaï H.S., Berti F. & Lebailly P. (2006). Impact de la dynamique cotonnière sur le développement rural. Étude de cas de la région de Korhogo, au Nord et au Centre de la Côte d'Ivoire. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 10 (4): 325-334.
- Zaman Q. & Schumann A.W. (2006). Nutrient Management Zones for Citrus Based on Variation in Soil Properties and Tree Performance. *Precision agriculture*, 7: 45-63.

ANNEXES

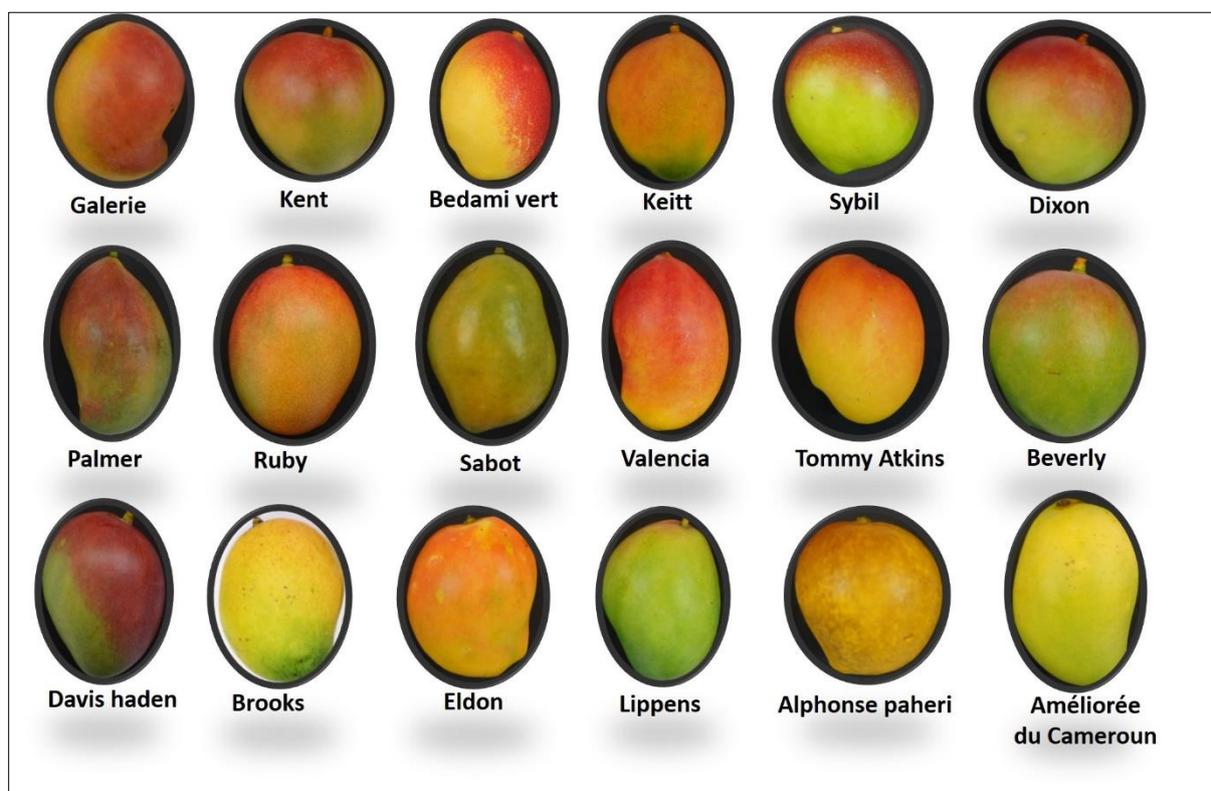
Annexe 1 : Fonctionnement simplifié de l'outil SoYield mangue



Annexe 2 : Enquête sur les besoins des futurs utilisateurs de l'application numérique SoYield



Annexe 3 : Quelques variétés de la collection manguiier de la Station de Recherche CNRA de Lataha



Annexe 4 : Vue aérienne de la collection manguiier de la Station de recherche fruitière du CNRA de Lataha



**PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES
REALISEES PENDANT LA THESE**

Article scientifique publié

- **Koffi J.M.K.**, Soro D., Fondio L., Adopo A.N., Malézieux E. et Faye E. (2021). Effect of the length of the flowering-harvest interval on the ripening and quality of the 'Kent' mango in Côte d'Ivoire. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 9 (2) : 138-146.

Communication orale avec acte

- J. Sarron, D. Beillouin, J. Huat **J.M. Koffi**, J. Diatta, É. Malézieux et E. Faye. Digital agriculture to fulfil the shortage of horticultural data and achieve food security in Sub-Saharan Africa. 4th All Africa Horticultural Congress (AAHC) 2021, Dakar, Senegal (*Africa Horticultural, en press*).

Communication orale sans acte

- **Koffi J.M.K.**, Faye E., Bendahou H., Kouakou C.K., Soro D., Fondio L., Sarron J., Adopo A.N. et Hortense D. (2021). SoYield, un outil numérique pour quantifier la production des vergers de manguiers en Côte d'Ivoire. 2^{ème} conférence internationale de la mangue de Côte d'Ivoire, 17 et 18 Novembre 2021, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- **Koffi J.M.K.**, Soro D., Faye E., Bendahou H., Fondio L., Sarron J. et Adopo A.N. (2021). SoYield, un outil numérique pour quantifier la production des vergers de manguiers en Côte d'Ivoire. Colloque International : Data Science, Intelligence Artificielle et applications : quelles contributions au développement économique et social ?, 16 et 17 Décembre 2021, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire.

Participation aux concours

- **Koffi J.M.K. (2021)**. Estimation de la maturité et de la production de la mangue 'Kent' au nord de la Côte d'Ivoire. Finale nationale du concours international ma thèse en 180 secondes, Edition 2021, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- **Koffi J.M.K.**, Dobo B.Z.A., Coulibaly A., Soro T.K. et Koné P.S. (2018). Valorisation du Karité par la création d'une plate-forme. Concours national d'agriculture numérique CivAgriHack, Edition 2018, Abidjan, Côte d'Ivoire.

Publication

Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences

ISSN No. 2320-8694

DOI: [http://dx.doi.org/10.18006/2021.9\(2\).138.146](http://dx.doi.org/10.18006/2021.9(2).138.146)

Received - January 25, 2021

Revision - March 18, 2021

Accepted - April 09, 2021

Available Online - April 25, 2021



EFFECT OF THE LENGTH OF THE FLOWERING-HARVEST INTERVAL ON THE RIPENING AND QUALITY OF THE 'KENT' MANGO IN CÔTE D'IVOIRE

Jean Mathias Konan Koffi^{1,2*}, Dogniméton Soro², Lassina Fondio¹, Achille N'da Adopo¹, Éric Malézieux^{3,4}, Emile Faye^{3,4,5}

¹National Center for Agricultural Research (CNRA), Regional Direction of Korhogo/Lataha Research Station, BP 856 Korhogo, Côte d'Ivoire

²University Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), Daloa, P.O. Box 150, Côte d'Ivoire

³CIRAD, UPR HortSys, F-34398 Montpellier, France

⁴HortSys, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

⁵ISRA, Center for Horticultural Development, Dakar 14000, Sénégal

Received – January 25, 2021; Revision – March 18, 2021; Accepted – April 09, 2021

Available Online – April 25, 2021

DOI: [http://dx.doi.org/10.18006/2021.9\(2\).138.146](http://dx.doi.org/10.18006/2021.9(2).138.146)

KEYWORDS

Côte d'Ivoire

Flowering

Mangifera indica L.

Maturity

Harvest

ABSTRACT

The physiological stage of mango maturity at harvest affects fruit quality at the time it is commercialized. The objective assessment of the mango maturity stage at harvest remains a challenge because of the multiple interactions between the visual aspect, the physicochemical composition, and the morphology of the fruit. This study aims to quantify the optimal harvest date to guarantee the maturity and quality of mango cv. 'Kent'. In this study, which took place in Korhogo in northern Côte d'Ivoire, the maturity stage and the quality of fruits were measured on 240 Kent mangoes harvested at four different harvest dates (90, 95, 100, and 105 days after flowering). A morphological, physical, and chemical characterization (length, width, mass, soluble sugar content, dry matter, skin appearance, and mass loss) was carried out at each date on 30 fruits at harvest and 30 fruits after ripening at room temperature. The number of days necessary for ripening was quantified. The results showed that the optimal harvest date is 100 days after flowering for Kent mangoes in Côte d'Ivoire. Mangoes harvested at this date developed better organoleptic characteristics (less wrinkled skin, lower mass losses, and a shorter ripening time). Assessment of the harvest date, guaranteeing better ripening of the fruit, is of utmost importance for organizing harvests in the mango sectors in West Africa, and especially in Côte d'Ivoire.

* Corresponding author

E-mail: jeanmathiaskonan@gmail.com (Jean Mathias Konan Koffi)

Peer review under responsibility of Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences.

Production and Hosting by Horizon Publisher India [HPI]
(<http://www.horizonpublisherindia.in/>).
All rights reserved.

All the articles published by [Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences](#) are licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](#) Based on a work at www.jebas.org.



1 Introduction

Mango (*Mangifera indica* L.), the 5th most cultivated fruit in the world, is produced in large quantity in Côte d'Ivoire, the leading African mango exporting country and the 3rd worldwide supplier of the European market (Kouamé et al., 2020). West Africa, a major supplier of the European market with 10.8% of the worldwide production, has experienced the greatest increase rate of mango production worldwide over this last decade (Mitra, 2016). The demand of mango is continuously increasing on export markets because of its attractive appearance and its organoleptic, energy, and nutritional qualities (Abu et al., 2021). Moreover, due to its high content in vitamins C and A, mango fruit contributes to limiting vitamin A deficiency also (Cortés et al., 2016). Moreover, since mangoes are produced during the hunger gap period, they are of critical importance for food safety in sub-Saharan countries (Parrot et al., 2018).

Despite all of these advantages, the development of the mango trade faced technical obstacles linked to the perishable nature of the fruit and the difficulty of objectively assessing the physiological maturity stage at harvest, of utmost importance for a climacteric fruit like mango (Nordey et al., 2019). The taste, the physical appearance, the chemical composition (soluble sugar content (SSC), dry matter (DM), titratable acidity (TA), etc.), and the post-harvest conservation time of mangoes depend on their level of maturity at harvest (Ibrahima et al., 2020; Diop et al., 2021). Fruits harvested before maturity do not ripen uniformly, even for fruits from the same tree and/or orchard, and may have wrinkled skin or variable total SSC (Nordey et al., 2016; Abu et al., 2021). Moreover, the level of physiological maturity in mango fruits at harvest influences their suitability for transport, conservation, ripening and, consequently, the final quality of the fruits proposed to consumers (Brecht, 2020; Farina et al., 2020; Bender et al., 2021). Not even ethylene and acetylene treatments of immature fruits will allow them to reach complete maturation with a satisfactory taste and aroma (Cissé et al., 2020). On the other hand, fruits harvested at a late stage of maturity incur shorter conservation times and a greater sensitivity to disease (Farina et al., 2020).

Overall, external morphological criteria such as fruit size, skin color, shoulder growth, and fruit shape help to estimate the maturity stage of the harvest of mango trees (Brecht, 2020). Other attempts have been made to establish a maturity index for mango in terms of density and firmness, but the inconsistency of these parameters and the diversity of mango cultivars limits its use as a criterion to predict maturity (Subedi et al., 2007). Further, certain chemical parameters such as SSC, TA, starch, phenolic compounds, carotenoids, and DM content have also been used together with morphological criteria to quantify fruit maturity

(Nambi et al., 2017; Abu et al., 2021). Generally speaking, an SSC of over 8% and acidity of approximately 1% are indices that can be used to assess mango maturity (Subedi et al., 2007). However, most of them are of a chemical or physiological nature and must be determined in a technical laboratory with the destruction of the fruit. Many studies have been carried out to design tools that quantify fruit maturity and quality using non-destructive optical or physical methods (Nordey et al., 2019).

In this context, limited informations are available on the effect of harvest date on mango quality and ripening have been carried out in West Africa. At present, few reliable and non-destructive methods exist to evaluate the degree of maturity of mangoes in the field (Raghavendra et al., 2021). Till today, in view of the increase in production and the number of fruits rejected at harvest due to immaturity, the development of reliable and adaptable tools to estimate the optimal fruit harvest date is key to organize harvests in the mango sectors in West Africa, and especially in Côte d'Ivoire.

The difficulty of assessing the stage of physiological maturity at harvest for a climacteric fruit such as mango led to this study. The main objective of this study was to study the relationships between the physicochemical parameters (DM, SSC, etc.) and the harvest date of mangoes cv. 'Kent' in northern Côte d'Ivoire. This cultivar is the most popular mango cultivars intended for export because of its appealing color and, above all, its non-fibrous pulp.

2 Materials and Methods

2.1 Study area

The experiment was carried out from January to May 2019 in a mango orchard on farmland in Lavononkaha (09°38'N and 5°56'O), 8 km from Korhogo, the seat of the Poro region, in northern Côte d'Ivoire (Figure 1). The orchard, which covers an area of 10 ha, is located at an altitude of 336 meters. Kent mangoes are the most commonly grown in the orchard. The orchard is a fairly well-structured export orchard, and the trees are planted in rows with a spacing of 10 m x 10 m (100trees. ha⁻¹). The orchard is surrounded by a cashew tree hedge and benefits from sanitary maintenance against fruit flies, bacteriosis, and anthracnose. Neither irrigation nor fertilization is used in the orchard, and flowers/fruits are not removed. The climate in the region is of the Sudanese type with two seasons: a dry season from November to April, and a rainy season from May to October. Annual average rainfall is 1400 mm in a wet year, and 1000 mm in a dry year. The natural vegetation consists of wooded savannah. The soils are ferrolitic, moderately to highly desaturated (Djaha et al., 2014).

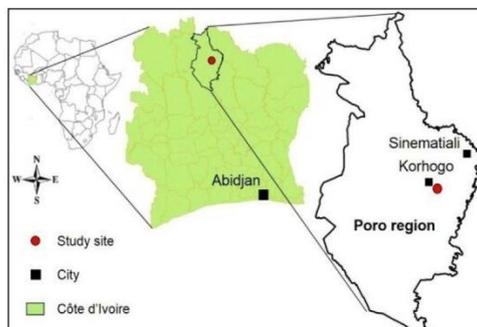


Figure 1 Systematic representation of the study site

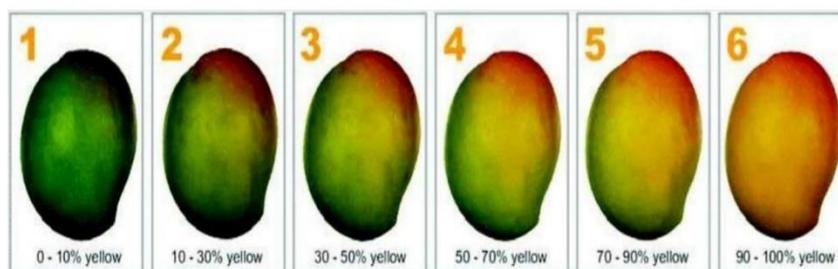


Figure 2 Scale for assessing skin color of Kent mango

2.2 Fruit sampling

To determine the harvest date of the fruits, the opening date of the last flower (terminal flower) of 1645 inflorescences was recorded at random in the crown and at ground level on 15 mango trees in January 2019. Because of the natural physiological decline of the mango tree and very low rate of fruit set of hermaphrodite flowers, 240 fruits obtained from these 1645 inflorescences were harvested during the following mango season in April 2019 at 90, 95, 100, and 105 days after the opening of the terminal flower (60 fruits per date). The mangoes harvested at less than 90 days after flowering, are generally immature, and the time between flowering and fruit maturity is from 3 to 6 months depending on the variety and the climatic conditions (Mukherjee & Litz, 2009). Batches of 60 fruits thus harvested at each date were sent to the CNRA laboratory in Lataha for morphological and physicochemical analyses. Measurements and observations were directly made at harvest on half of these fruits. The other half was kept in a well-ventilated room (room temperature: $28.8 \pm 1.2^\circ\text{C}$) at the Lataha station, out of direct sunlight for ripening, until the fruits had a reddish-yellow skin color (Figure 2; IIC scale: International Import Company). The mangoes sampled were individually treated in each batch, and all 60 fruits were measured.

2.3 Morpho-physical measurements made on fruits

2.3.1 Fruit morphology

The variables considered for the assessment of fruit morphology were length, width, circumference, and fruit mass (Figure 3A). These measurements were carried out using a sliding caliper (Model: Vernier Caliper; precision: 0.02 mm), and total fruit mass was measured using a precision scale (Model: PPS2102C; precision: 0.01g).

2.3.2 Fruit volume

The cylinder approximation analysis method was used in this study to estimate mango volume. The volume was determined by considering the fruit as a cylinder, as can be seen in Figure 3B (Sa'ad et al., 2015). Thus, the volume and the specific gravity of the fruit were assessed using Equations 1 and 2, respectively.

2.3.3 Fruit density measured by flotation test

A flotation test was carried out on each fruit (Figure 3C). This test consisted of plunging each mango into a tank and observing whether it sank or floated. The density of each fruit was calculated according to Equation 3.

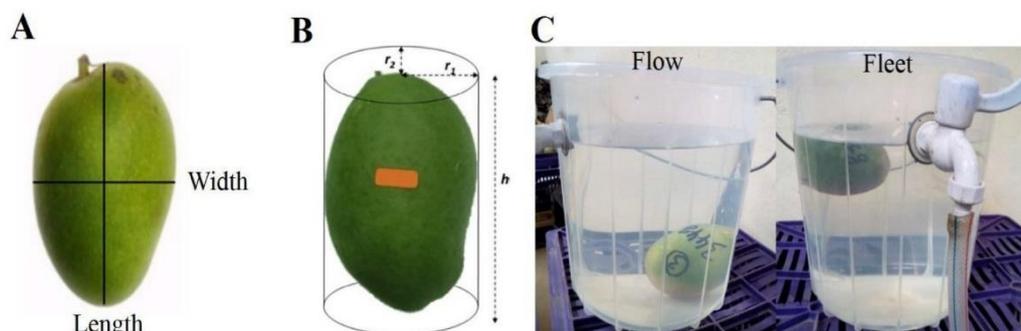


Figure 3 Morpho-physical fruit measurements. (A) fruit size; (B) fruit volume; and (C) fruit density

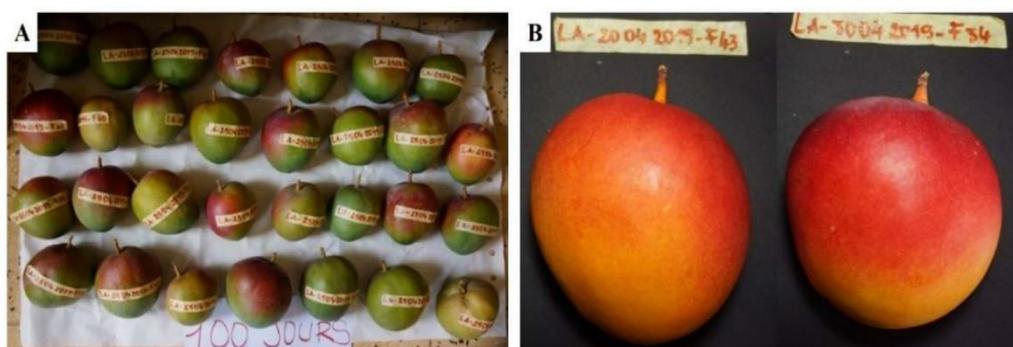


Figure 4 (A) Fruits exposed to room temperature; (B) Ripe fruits.

$$(Eq. 1) \quad V (\text{cm}^3) = \pi r^2 h$$

where:

V = estimated mango volume

r = radius h = height

$$(Eq. 2) \quad \rho (\text{g/cm}^3) = \frac{m}{V}$$

where:

ρ = mango specific gravity

V = estimated mango volume

m = mango mass

$$(Eq. 3) \quad d = \frac{\rho}{\rho_{\text{eau}}}$$

where:

d = mango density

ρ = mango specific gravity

ρ_{eau} = specific gravity of water

2.4 Stored batches: ripening time, mass loss rate and appearance of fruit skin

Ripening time (in days) was observed for each batch stored at room temperature ($28.8 \pm 1.2^\circ\text{C}$) as of the harvest date until the

fruits turned yellow to yellow-orange and their pulp began to soften (Figure 4). The average ripening time was observed for the first ripe fruit and the last ripe fruit of the batch, with ripening periods corresponding to each fruit. The mass of each fruit was determined before and after ripening using a precision scale. The mass-loss rate was calculated according to Equation 4. The wrinkled or normal appearance of the fruit skin was assessed by observation at the end of ripening.

$$(Eq. 4) \quad Pm (\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

where:

Pm = mass loss

m_i = fruit mass at harvest

m_f = fruit mass after ripening

2.6 Physicochemical fruit measurements

2.6.1 Soluble sugar content at harvest and after ripening

Soluble sugar content was estimated in degrees Brix with a benchtop refractometer (Atago RX-5000; precision: 0.01%). The mango was placed with its back shoulder towards the operator, and a longitudinal cut was made just next to the pit on the right side,

from the level of the stalk to the apex. Using a small knife, the entire content of the pulp of the two mango parts was carefully scraped to obtain a paste representative of all of the pulp. The paste obtained was pressed in a little piece of white fabric and the degree Brix was directly measured on 2 to 3 drops of juice on the refractometer prism. Three measurements were made for each mango.

2.6.2 Dry matter content at harvest and after ripening

The fruit was peeled and cut into longitudinal slices over its entire length, in such a way as to represent the fruit in its entirety. These slices were cut into small cubes and mixed well, from this 20 to 30 g of this pulp were then removed, weighed, and dried in an oven in aluminum foil (75°C) for 3 days. Dry matter content was calculated using Equation 5.

$$(Eq. 5) \quad DM (\%) = \frac{m_f - m_a}{m_e} \times 100$$

where:

DM = dry matter content

m_f = final mass obtained after drying, i.e., the mass of the aluminum foil and the mass of the heated sample (in g)

m_a = mass of the aluminum foil (in g)

m_e = mass of the fresh sample placed in the aluminum foil before drying (in g)

2.7 Statistical analyses

An analysis of variance (ANOVA) was carried out to test the significance (at the 0.05 threshold) of the effect of harvest date on each of the morphological and physicochemical parameters. The Student-Newman-Keuls (SNK) comparison test was used to compare the means between the harvest dates. Statistical analyses were carried out using Statistica software, version 7.1.

3 Results

3.1 Morphological and physical characterization of the fruits

Except for specific gravity, fruits harvested at 100 days after flowering registered the highest average values, and fruits harvested at 90 days after flowering registered the lowest values for the set of parameters measured (Table 1). As a matter of fact, mass (m_i : at harvest; and m_f : after-ripening), length, and circumference do not differ for mangoes harvested at 95, 100, and 105 after flowering. However, these parameters are significantly lower ($p < 0.05$) for mangoes harvested at 90 days after flowering. Thus, the average mass at harvest was 470.27 ± 29.08 g for mangoes harvested at 90 days, whereas that of mangoes harvested at 95, 100, and 105 days after flowering was 557.93 ± 20.62 g. The average length of fruit at harvest was 10.11 ± 1.34 cm at 90 days, and 10.99 ± 0.89 cm for mangoes harvested at 95, 100, and 105 days after

flowering. The average circumference of the fruits was 28.38 ± 2.46 cm at 90 days, whereas it was 30.61 ± 2.19 cm for mangoes harvested at 95, 100, and 105 days after flowering. The volume and the width do not differ for mangoes harvested at 95 and 105 days after flowering. Nevertheless, these parameters were significantly lower ($p < 0.05$) for mangoes harvested at 90 days, and higher for mangoes harvested at 100 days after flowering. Consequently, the average volume and the average width of fruits at harvest was 353.91 ± 19.72 cm³ and 9.3 ± 0.88 cm, respectively, for mangoes harvested at 90 days after flowering, whereas they were 401.44 ± 15.32 cm³ and 9.59 ± 0.68 cm, respectively, for mangoes harvested at 95 and 105 days after flowering. The average volume and the average width of the fruits at harvest were 428.58 ± 14.40 cm³ and 9.87 ± 0.65 cm, respectively, for mangoes harvested at 100 days after flowering. The average specific gravity at harvest did not significantly differ for the four harvest dates. The average value obtained for these four dates was 1.36 ± 0.16 g/cm³.

3.2 Flotation test, density and fruit appearance

The results of the flotation test on fruit appearance at harvest are presented in figure 5. Overall, the number of floating and wrinkled fruits decreases with the length of the harvest date. At 90 days after flowering, 26 fruits out of 30 floated on the water, whereas only 15 and 17 fruits out of 30 floated at 100 and 105 days after flowering, respectively. As for fruit appearance during ripening storage, the number of wrinkled fruits during ripening increased from 13 to 30 at 90 days, and 1 wrinkled fruit out of 30 at 105 days after flowering. Results revealed that the density does not significantly differ for the four harvest dates ($p > 0.05$).

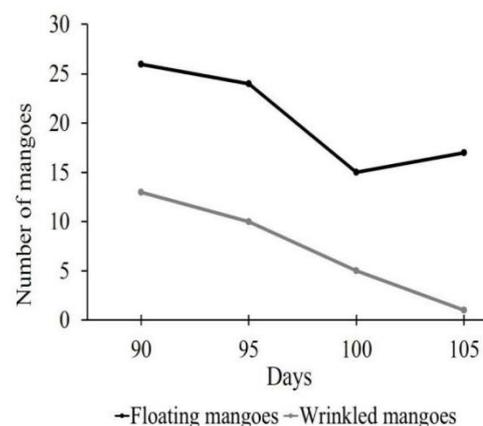


Figure 5 Number of floating and wrinkled fruits as a function of harvest date

Table 1 Morphological and physical characteristics of fruits

Variables/Harvest date (day)	90	95	100	105	F	p
m_i (g)	470.27 ± 29.08a	542.00 ± 21.25b	572.46 ± 20.27b	557.93 ± 20.62b	3.85	0.01
m_r (g)	394.7 ± 17.20a	472.23 ± 17.92b	514.76 ± 17.99b	504.36 ± 18.73b	9.13	0.01
Volume (cm ³)	353.91 ± 19.72a	397.62 ± 15.66ab	428.58 ± 14.40b	405.27 ± 14.99ab	3.65	0.01
ρ (g/cm ³)	1.37 ± 0.39a	1.36 ± 0.09a	1.33 ± 0.08a	1.38 ± 0.09a	0.24	0.86
Length (cm)	10.11 ± 1.34a	10.99 ± 1.02b	11.09 ± 0.78b	10.91 ± 0.87b	5.67	0.01
Width (cm)	9.3 ± 0.88a	9.52 ± 0.67ab	9.87 ± 0.65b	9.66 ± 0.69ab	3.24	0.02
Circ. (cm)	28.38 ± 2.46a	30.02 ± 2.13b	31.01 ± 2.17b	30.80 ± 2.29b	8.30	0.01

Mean ± SE value followed by the different letter in the same vertical column are significantly different according to the Student-Newman-Keuls test (P = 0.05)

3.3 Ripening time and weight loss of fruits

Ripening time and weight loss of fruits as a function of their harvest date are presented in Figures 6 and 7. Results revealed that ripening time and mass loss decrease continuously with the length of the harvest date of the fruits. The onset of ripening of the harvested fruits at 90 days after flowering lasts for an average of 15 days, and then progressively decreases, reaching 10 days at 105 days after flowering. As for mass loss, mangoes assessed at different harvest dates showed a wide range of variability ($p < 0.05$ with $p = 0.01$). Fruits harvested at 90 days ($14.05 \pm 8.57\%$) and at

95 days ($12.60 \pm 5.43\%$) after flowering lost more mass than the fruits harvested at 100 days ($10.04 \pm 1.64\%$) and at 105 days ($9.60 \pm 2.17\%$) after flowering.

3.4 Physicochemical characterization of fruits

By determining the physicochemical parameters such as the degree Brix and the dry matter of the mango pulp, we were able to assess the physicochemical quality of the mangoes as a function of the harvest date of the fruits (Table 2). In general, the degrees Brix at harvest (Brix 1), indicating the sugar content of the fruits, revealed

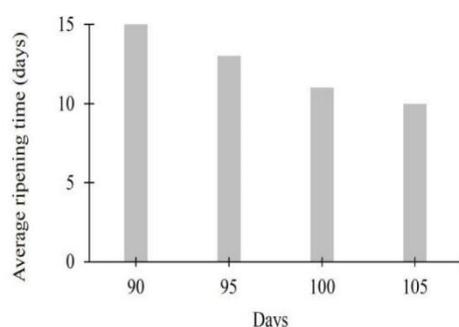


Figure 6 Average fruit ripening time as a function of harvest date

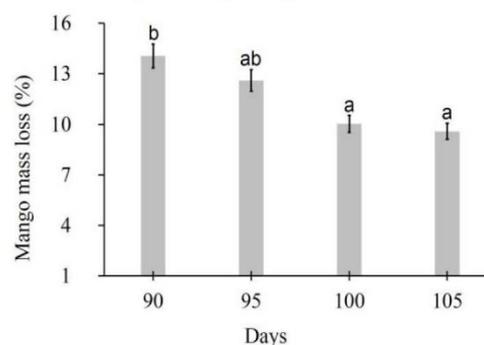


Figure 7 Average fruit weight loss as a function of harvest date. Different letters indicate statistically significant difference (Student-Newman-Keuls test, P = 0.05)

Table 2 Physicochemical characteristics of mango pulp

Variables/Harvest date (day)	90	95	100	105	F	p
Brix 1 (%)	8.67 ± 0.79a	9.06 ± 0.91a	9.11 ± 0.98a	9.13 ± 0.97a	1.69	0.17
Brix 2 (%)	16.55 ± 1.39a	17.85 ± 1.24b	18.77 ± 1.85c	19.82 ± 0.99d	29.22	0.01
DM 1 (%)	17.20 ± 1.27a	17.34 ± 1.34a	19.10 ± 0.93b	18.54 ± 2.88b	8.13	0.01
DM 2 (%)	17.25 ± 1.33a	19.50 ± 1.49b	20.36 ± 1.92c	20.80 ± 1.26c	32.22	0.01

Mean ± SE value followed by the different letter in the same vertical column are significantly different according to the Student-Newman-Keuls test (P = 0.05)

a slight, non-significant increase ($p > 0.05$ where $p = 0.17$), from $8.67 \pm 0.79\%$ to $9.13 \pm 0.97\%$ on average, at 90 and 105 days after flowering, respectively. After fruit ripening, significantly different Brix averages (Brix 2) were observed from one harvest date to another: Brix increased from $16.55 \pm 1.39\%$ at 90 days after flowering, to $19.82 \pm 0.99\%$ at 105 days after flowering, respectively.

As for the dry matter content at harvest (DM1) and after fruit ripening (DM2), significant differences were observed for the four harvest dates studied ($p < 0.05$). For the dry matter at harvest, the values were $17.20 \pm 1.27\%$, $17.34 \pm 1.34\%$, $19.10 \pm 0.93\%$, and $8.54 \pm 2.88\%$, respectively, for fruits harvested at 90, 95, 100, and 105 days after flowering. The values for dry matter after ripening were $17.25 \pm 1.33\%$, $19.50 \pm 1.49\%$, $20.36 \pm 1.92\%$, and $20.80 \pm 1.26\%$, respectively, for fruits harvested at 90, 95, 100, and 105 days after flowering.

4 Discussion

4.1 Morphological and physical evolution of the fruits

Fruits harvested at 100 days after flowering registered higher average values as compared to the fruits harvested at 90 days after flowering. This variability shows that mangoes did not have the same level of maturity and growth rate at harvest. These results could be explained by the consequences of competition between fruits for assimilates such as carbon and nitrogen (Ngoa et al., 2021). Indeed, the volume and mass of the fruit increase with the amount of available assimilate. Consequently, the final mass and composition of the fruit depending on the availability of carbon and nitrogen, which depend on the photosynthetic functioning of the leaves, the number of fruits, and, especially the fruit load that leads to competition between fruits for assimilates (Sun et al., 2021; Wen et al., 2021). In our case study, the variability observed could be because mangoes harvested from 100 days after flowering benefited from slightly more carbon and nitrogen. This is explained by the decrease of the fruit load which leads to competition between fruits.

For mango density, we observed almost identical values for the four harvest dates presented ($1.33 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ at 100 days to $1.38 \pm 0.09 \text{ g/cm}^3$ at 105 days). These values are comparable to those of $0.99 \pm 0.030 \text{ g/cm}^3$ to $1.12 \pm 1.02 \text{ g/cm}^3$ observed by Passannet et al. (2018) in the study of the variability of the physical characteristics of cultivated mangoes (Smith, Kent, Keitt, Palmer, Valencia, etc.) in Tchad. This low density of mangoes could enable fruits to float and facilitate their large-scale cleaning in tanks (Diakabana et al., 2013). Thus, fruit density, measured at the mature green stage, could be useful for the fresh fruit sector for grading or sorting mangoes early in the supply chain.

4.2 Skin appearance, mass loss and ripening time

Results showed that the onset of fruit ripening extends over 15 days when the fruits are harvested at 90 days after flowering, and over 10 days when the fruits are harvested at 105 days. These values are comparable to those found by Abu et al. (2020) for Kent mangoes in Ghana. They observed a ripening time of 10 days for 'Kent' harvested at the physiological maturity stage. They pointed out that the differences in ripening time between fruits could be due to their physiological ripening periods. In the case of climacteric fruit, such as mango, the fruit requires a ripening period of generally 8 to 10 days at about 25°C before it reaches the desired taste and texture at the time of consumption. This ripening time interval was observed in mangoes harvested at 100 and 105 after flowering in our case study. The mass loss also varied from 14.05% at 90 days, to 9.60% at 105 days after flowering, showing that the fruit mass loss decreases in proportion with the duration of the flowering-harvest interval.

Moreover, results revealed that the number of wrinkled fruits decreased with the duration of the flowering-harvest interval (going from 13 wrinkled fruits out of 30 at 90 days, to 1 wrinkled fruit out of 30 at 105 days after flowering). The considerable mass loss and the high proportion of wrinkled fruits observed for the mangoes harvested at 90 and 95 days after flowering and could be due to the obvious effect of extended storage due to late ripening and physiological immaturity. According to Brecht (2020) and Abu et al. (2020), the loss of fruit mass during storage is a consequence of the loss of food reserves stored in the fruit during respiration and acceleration of senescence when the reserves that provide the energy to maintain the living state of the fruit are depleted. Also, less mature mangoes are less filled with reserve substances and are therefore much more likely to experience a higher rate of transpiration and water loss during storage. Vannière et al. (2013) and Abu et al. (2021) observed that fruits with an inadequate level of physiological maturity will have a partially or white colored pulp during ripening, and will most certainly never acquire good organoleptic qualities, especially in terms of their vitamin A and C content.

4.3 Increase of the degree Brix and dry matter during fruit ripening

The experiment consisted of making a physicochemical characterization of fruit pulp at different harvest dates. At harvest, a slight variation of the degree of Brix ($8.67 \pm 0.79\%$ Brix at 90 days, to $9.13 \pm 0.97\%$ Brix at 105 days after flowering) was observed. However, after ripening, highly significant differences in the degree Brix were observed ($16.55 \pm 1.39\%$ Brix at 95 days, to $19.82 \pm 0.99\%$ Brix at 105 days after flowering). These results indicate that there is a low production of soluble sugars from starch stored in the mango before its harvest and that this is true,

regardless of its level of maturity. Sugar content after-ripening is greater when fruits are harvested later and, therefore, when the ripening time after harvest is shorter. Sugar content seems to increase in proportion with the duration of the flowering-harvest interval of mangoes at harvest. The Brix values observed are comparable to those found by Tasié et al. (2020) for mango cv. 'Kent' harvested at maturity. The authors reported soluble sugar contents levels of 18% Brix after fruit ripening.

These results are similar to the results of Abu et al. (2021) studies, those who carried out a study on Kent mangoes harvested at physiological maturity in Ghana. The author found soluble sugar contents of 7% Brix at harvest, and 18% Brix after the ripening of Kent mangoes harvested at 126 days after flowering. These values are very close to those obtained in this study for mangoes harvested at 100 and 105 days after flowering, and thus show that the Kent mango harvested as of 100 days after flowering is very rich in sugar. The degree of Brix remains a key criterion in the evaluation of the sweet taste of the fruits. In fact, according to Diop et al. (2021) and Abu et al. (2021), fruits harvested at an advanced stage of maturity are richer in soluble sugars, dry matter, and starch than those harvested earlier, as is the case in the present study. The authors indicated that the harvesting of mangoes for export should be established based on the type of market, the distance from the orchard or packing house, and the type of transport to be used. These authors suggested that mangoes should be harvested at the ideal stage to allow the development of the most adequate organoleptic quality and the longest post-harvest life. Nevertheless, high sugar content presents the risk of degradation by yeasts in the event of poor conservation conditions (Koné et al., 2018). For the dry matter, highly significant differences were observed at harvest (between 17 and 19%) and after fruit ripening (between 17 and 20%). These results are similar to those of Tasié et al. (2020) for 'Kent' mango. Indeed, these researchers found a dry matter value between 16 and 18%. The mature 'Kent' mango was therefore characterized by relatively low water content in the pulp, which could explain its good conservation time.

Conclusion

This study of the effect of harvest date on ripening and mango quality made it possible to characterize the morphological, physical, and chemical conditions of the fruits, and to analyze their suitability during ripening. In light of the results obtained, 100 days after the opening of the last flower of the inflorescence appears to correspond to the beginning of the physiological maturity of the 'Kent' mango in northern Côte d'Ivoire. As of this period, the fruit will acquire better organoleptic qualities during post-harvest ripening. Consequently, this period appears to be the optimal harvest date to obtain mangoes rich in sugar, with smooth skin, low mass loss, and a short ripening time. To sum up,

mangoes harvested at this time would therefore have an optimal organoleptic quality after ripening.

Acknowledgments

This study was carried out within the framework of Phase 7 of the project, CNRA-CIRAD/C2D Fruits & Market Gardening (Development Support for Agricultural Research), of the 2nd project for Support for the Modernization and Reform of Universities and Higher Education Institutions of Côte d'Ivoire (AMRUGE-CI N°2), financed by the Debt Reduction-Development Contract (C2D) between Côte d'Ivoire and France. This work was also supported by the project Pre-Maturation PixFruit App financed by the French Région Occitanie.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest arising out of this study

References

- Abu M, Abbey DL, Amey KN (2021) Relation of harvesting time on physicochemical properties of Haden, Kent, Palmer and Keitt mango varieties for export and local markets. *Journal of Horticulture and Postharvest Research* 4 (1): 87-100.
- Abu M, Olympio NS, Darko OJ (2020) Effects of different storage temperature conditions on ripening quality and shelf life of mango (*Mangifera indica*) fruits in Ghana. *Journal of Horticulture and Postharvest Research* 3 (2): 245-256.
- Bender RJ, Brecht JK, Sargent SA (2021) Low storage temperature for tree ripe mangoes under controlled atmospheres with elevated CO₂ concentrations. *Journal of the science of food and agriculture* 101 (3): 1161-1166
- Brecht KJ (2020) Mango postharvest best management practices manual. University of Florida USA Pp.73.
- Cissé M, Silue Y, Cissé M, Kouadio ADS, Nindjin C (2020) Effect of Calcium Carbide Treatment on Ripening Time and Physicochemical Properties of Mango (*Mangifera indica* L.) Variety "Kent", Côte d'Ivoire. *Current Journal of Applied Science and Technology* 39 (38): 24-30
- Cortés V, Ortiz C, Aleixos N, Blasco J, Cubero S, Talens P (2016) A new internal quality index for mango and its prediction by external visible and near-infrared reflection spectroscopy. *Postharvest Biology Technological* 118: 148-158.
- Diakabana P, Kobawila SC, Massengo V, Louembe D (2013) Effet du degré de maturation sur la cinétique de fermentation éthylique

- de la pulpe de mangue cultivar Boko. *Cameroon Journal of Experimental Biology* 09 (01): 1-8.
- Diop A, Méot JM, Léchaudel M, Chiroleu F, Diop Ndiaye DN, Mertz C, Cissé M, Chillet M (2021) Impact of Preharvest and Postharvest on Color Changes during Convective Drying of Mangoes. *Foods* 10: 490.
- Djaha AJB, N'da HA, Koffi KE, Adopo AA, Ake S (2014) Diversité morphologique des accessions d'anacardier (*Anacardium occidentale* L.) introduits en Côte d'Ivoire. *Revist Ivoire Sciences Technological* 23: 244-258.
- Farina V, Gentile C, Sortino G, Gianguzzi G, Palazzolo E, Mazzaglia A (2020) Tree-ripe mango fruit: physicochemical characterization, antioxidant properties and sensory profile of six Mediterranean-grown cultivars. *Agronomy* 10: 884.
- Ibrahima B, Mouhamadou F, Moussoukhoye D (2020) Study of the variation in total and reducing sugars contents according to the variety and according to the position where the fruit (mango) was harvested from five mango varieties exploited in Senegal. *Journal of Biosciences and Medicines* 8: 28-36.
- Koné HS, Koné KY, Akaki KD, Soro D, Elleingang FE, Assidjo NE (2018) Caractérisation biochimique de la pulpe des fruits du prunier noir (*Vitex Doniana*) de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal* January 14 (3): 1857-7881.
- Kouamé ML, Kouamé KA, Ouattara L, N'guessan KF, Alloue-Boraud WM, Dje KM (2020) Contraintes liées à la production et à la commercialisation des mangues (*Mangifera indica*) en Côte d'Ivoire : cas des variétés exportées vers l'Europe. *Afrique Science* 17 (3): 16-27.
- Mitra SK (2016) Mango production in the world-present situation and future prospect. *Acta Horticulturae* 287-296.
- Mukherjee SK, Litz RE (2009) Introduction: Botany and Importance. In *The Mango: Botany, Production and Uses*, 2 (Ed), (CAB International, Wallingford) Pp. 1-18.
- Nambi VE, 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 (1): 35-44.
- Ngao J, Martinez S, Marquier A, Bluy S, Saint-Joanis B, Costes E, Pallas B (2021) Spatial variability in carbon- and nitrogen-related traits in apple trees: the effects of the light environment and crop load. *Journal of Experimental Botany* 72 (5): 1933-1945.
- 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, Léchaudel M, Génard M, Joas J (2016) Factors affecting ethylene and carbon dioxide concentrations during ripening: Incidence on final dry matter, total soluble solids content and acidity of mango fruit. *Journal of Plant Physiology* 196 (197): 70-78.
- Parrot L, Klaver D, Biard Y, Kabré E, Vannière H (2018) Analyse de la chaîne de valeur Mangue au Burkina Faso. *Value Chain Analysis for Development*, n°2, Pp.6.
- Passannet AS, Aghofack-Nguemezi J, Gatsing D (2018) Variabilité des caractéristiques physiques des mangues cultivées au Tchad : caractérisation de la diversité fonctionnelle. *Journal of Applied Biosciences* 128: 12932-12942.
- Raghavendra A, Guru DS, Rao KM (2021) An automatic predictive model for sorting of artificially and naturally ripened mangoes. In: Bhateja V, Peng SL, Satapathy SC, Zhang YD (eds) *Evolution in Computational Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing* 1176. Springer, Singapore.
- Sa'ad FSA, Ibrahim MF, Shakaff AYM, Zakaria A, Abdullah MZ (2015) Shape and weight grading of mangoes using visible imaging. *Computers and Electronics in Agriculture* 115: 51-56.
- Subedi PP, Walsh KB, Owens GP (2007) Prediction of mango eating quality at harvest using short wave near infrared spectrometry. *Postharvest Biology Technological* 43: 326-334.
- Sun W, Xu Z, Ibell P, Bally I (2021) Genetic and environmental influence on foliar carbon isotope composition, nitrogen availability and fruit yield of 5-year-old mango plantation in tropical Australia. *Journal of Soils and Sediments* 1614-7480.
- Tasie MM, Alemimi AB, Ali RM, Takeoka G (2020) Study of physicochemical properties and antioxidant content of mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *Eurasian Journal of Food Science and Technology* 4 (2): 91-104.
- Vannière H, Rey JY, Vayssieres JF (2013) Itinéraire technique mangue (*Mangifera indica* L.). www.coleacp.org/pip, Pp. 64.
- Wen Y, Su SC, Jia TT, Wang XN (2021) Allocation of photoassimilates in bud and fruit from different leaf nodes of camellia oleifera. *American Society for Horticultural Science* 1-9.

RESUME

En Côte d'Ivoire, la culture du manguier présente des atouts économiques et nutritionnels pour les zones de production. Les rendements sont toutefois faibles et confrontés à l'absence d'outils de mesure rapides et très fiables de la maturité et de la production, ce qui rend difficile les tentatives d'amélioration des performances du système de culture. Cette étude a été entreprise pour déterminer un intervalle minimum de temps entre la floraison et la récolte qui garantit un bon mûrissement post-récolte de la mangue 'Kent' et pour mettre au point une méthodologie plus précise et plus fiable pour estimer le rendement du manguier. L'étude a été conduite dans 21 vergers de manguiers situés dans la région du Poro, au nord du pays. A l'échelle du fruit, la qualité a été mesurée sur 240 mangues 'Kent' récoltées à quatre stades de maturité différente après la floraison, à raison de 60 mangues par stade. Pour chaque stade, une caractérisation morphologique et physicochimique a été réalisée sur 30 fruits à la récolte et sur 30 autres fruits après le mûrissement à température ambiante. À l'échelle de l'arbre, un réseau de neurones (Faster R-CNN) de détection de fruits, basé sur l'analyse d'images numériques assisté par modèle, a été mis au point pour estimer la production du manguier peu avant la récolte. Le réseau a été entraîné et validé sur 426 images obtenues sur 230 arbres en 2019 et 2020. A l'échelle du verger, quatre stratégies d'échantillonnage d'arbres adapter à la région du Poro, ont été évaluées pour estimer le rendement du verger. Les résultats, à l'échelle du fruit ont montré que les mangues récoltées à un intervalle de temps de 100 jours après la floraison ont présenté les meilleures caractéristiques morphologique et physicochimique. À partir de cette période, la mangue atteint de meilleures qualités organoleptiques et nutritionnelles au cours du mûrissement post-récolte. A l'échelle de l'arbre, le réseau de neurones a obtenu une efficacité globale (F1- score) de 0,88 et une précision de détection de 91 % des mangues présentes dans les images d'arbres. En comparant les performances du Faster R-CNN avec un comptage manuel de fruits dans les 230 d'arbres, un modèle efficace et fiable ($R^2 = 0,96$ et $NRMSE = 5,9\%$) a été mis au point pour estimer le rendement en mangues à partir d'images d'arbres. A l'échelle du verger, la méthode d'échantillonnage aléatoire simple d'arbres a obtenu de très bonne performance pour estimer la production. Cette méthode a nécessité un échantillonnage de 7 à 26 % des arbres du verger pour obtenir un taux d'erreur de moins de 10 % et une production estimée quasi-identique à la production réelle du verger. Cette étude offre de nouvelles perspectives pour pallier l'absence d'outils efficaces et plus fiables pour estimer la production du manguier et fournir des informations de grande importance pour l'organisation des récoltes de la filière de mangue en Afrique de l'ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire.

Mots-clés : Mangue, maturité, analyse d'image, rendement, stratégie d'échantillonnage, Côte d'Ivoire

ABSTRACT

In Côte d'Ivoire, mango cultivation has economic and nutritional advantages for the production areas. However, yields are low and faced with the absence of rapid and highly reliable maturity and production measurement tools, which makes it difficult to attempt to improve the performance of the cropping system. This study was undertaken to determine a minimum time interval between flowering and harvest that ensures good post-harvest ripening of 'Kent' mango and to develop a more accurate and reliable methodology for estimating mango yield. The study was conducted in 21 mango orchards located in the Poro region in the north of the country. At the fruit level, quality was measured on 240 'Kent' mangoes harvested at four different stages of maturity after flowering, with 60 mangoes per stage. For each stage, morphological and physicochemical characterization was performed on 30 fruits at harvest and on another 30 fruits after ripening at room temperature. At the tree level, a neural network (Faster R-CNN) for fruit detection, based on model-assisted digital image analysis, was developed to estimate mango production shortly before harvest. The network was trained and validated on 426 images obtained on 230 trees in 2019 and 2020. At the orchard scale, four tree sampling strategies adapted to the Poro region were evaluated to estimate orchard yield. Results at the fruit scale showed that mangoes harvested at a time interval of 100 days after flowering presented the best morphological and physicochemical characteristics. From this period, the mango reached better organoleptic and nutritional qualities during post-harvest ripening. At the tree level, the neural network obtained an overall efficiency (F1- score) of 0.88 and a detection accuracy of 91% of the mangoes present in the tree images. By comparing the performance of the Faster R-CNN with manual fruit counting in the 230 tree images, an efficient and reliable model ($R^2 = 0.96$ and $NRMSE = 5.9\%$) was developed to estimate mango yield from tree images. At the orchard scale, the simple random tree sampling method performed very well in estimating production. This method required a sampling of 7 to 26% of the trees in the orchard to obtain an error rate of less than 10% and an estimated production that was almost identical to the actual production of the orchard. This study offers new perspectives to overcome the lack of efficient and more reliable tools for estimating mango production and provides information of great importance for the organization of the mango industry in West Africa and particularly in Côte d'Ivoire.

Key words : Mango, maturity, image analysis, yield, sampling strategy, Côte d'Ivoire