



A collage of six photographs showing various stages of a field experiment, all framed within a map of India. The photos include: 1) A white digital scale on the ground. 2) A person in a red shirt holding a yellow label. 3) A person in a blue shirt working in a field. 4) A person in a green shirt using a red tool on a plant. 5) A person in a black shirt using a red tool on a plant. 6) A person in a black shirt using a red tool on a plant.

JUILLET 2025





REPUBLIC DE CÔTE D'IVOIRE
UNION – DISCIPLINE – TRAVAIL

**LE MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE (MINEDDTE) À TRAVERS LA DIRECTION DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES ET DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (DLCCTE)**

EN COLLABORATION AVEC



PRÉSENTE

**MESURE, NOTIFICATION ET VÉRIFICATION (MNV)
D'AGROFORESTERIE ACACIA COMOÉ AU NIVEAU LOCAL**

CONCEPTION ET MANUELS D'UTILISATEUR



CONTRIBUTIONS

Co-financeurs :

Ce projet est cofinancé par l'Union européenne et le Ministère Fédéral Allemand de la Coopération Economique et du Développement (BMZ).

Mise en œuvre par :

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn
Allemagne

Auteurs:

Gernot Ruecker, Gerald Kapp, Dirk Kloss, Jörg Seifert-Granzin, Stefanie I. Korswagen, Milène Koutouan-Kontchoi, Antoine Tano Kouakou Servais, Brice Polnaud Déclemence Nehoun.

Présenté par :

HEAT GmbH
Seilerbahnweg 14
61462 Königstein /Ts.
Allemagne

En consortium avec :

GFA Consulting Group GmbH
Eulenkrußstraße 82
22359 Hamburg
Allemagne

Publié par :

Le Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de la Transition Ecologique (MINEDDTE) à travers la Direction de la Lutte contre les Changements Climatiques et de la Transition Ecologique (DLCCTE)
Abidjan
Côte d'Ivoire
<https://changementsclimatiques.gouv.ci>

Clause de non-responsabilités :

Ce document est conçu à des fins de formation et d'information. Toutes les informations dans le document sont formulées par les auteurs et ne reflètent pas nécessairement les opinions de la DLCCTE, du MINEDDTE, de l'UE, du BMZ et de la GIZ.

La DLCCTE, le MINEDDTE, l'UE, le BMZ et la GIZ déclinent toute responsabilité légale quant à l'utilisation de ce document et des informations privilégiées par d'autres parties, ainsi que tous les dommages résultant de cette action.

Abidjan, Juillet 2025



AVANT-PROPOS

La lutte contre les changements climatiques est un défi mondial au regard des nombreuses conséquences observées, notamment : l'insuffisance alimentaire, l'érosion côtière, les inondations, la perte de la biodiversité, la sécheresse, etc. Le phénomène constitue ainsi une forte menace pour l'ensemble de l'humanité et risque de compromettre tous les efforts de développement des pays surtout ceux en en voie de développement. Notons que l'Afrique, continent le moins polluant au regard de ses émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), évaluées à moins de 5% des émissions mondiales, demeure le plus vulnérable aux effets néfastes des changements climatiques.

En Côte d'Ivoire, les variations climatiques sont de plus en plus perceptibles à tous les niveaux et dans tous les secteurs d'activités. A cela, s'ajoute les diverses pressions anthropiques et les risques de catastrophes naturelles de plus en plus récurrents. Le pays subit ainsi les effets néfastes du réchauffement climatique à travers, entre autres, la dégradation des forêts, les graves inondations qui chaque année, occasionnent des pertes en vies humaines, des dégâts matériels, l'érosion progressive des côtes maritimes, l'avancée des zones arides et la perte d'environ 200 000 hectares de forêt par an.

C'est avec raison, consciente des risques que font peser les impacts de ce fléau sur son développement que la Côte d'Ivoire a ratifié la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique en novembre 1994, le Protocole de Kyoto en avril 2007, l'adoption de l'Agenda 2030 en 2015 avec ses 17 Objectifs de Développement Durable et l'Accord de Paris en octobre 2016.

Ainsi, dans le respect de ses engagements vis-à-vis de cet Accord de Paris, le pays a travaillé à la mise en place d'un système de Suivi-Evaluation dénommé Mesure Notification Vérification (MNV) à travers le Projet Agroforesterie Comoé mis en œuvre dans les régions Nord-Est, Centre-Nord et Nord de la Côte d'Ivoire depuis 2020. Ce projet vise, entre autres, à l'estimation du carbone séquestré par le système agroforestier promu autour du Parc national de la Comoé à travers la collecte de données dans le cadre global de la réalisation du «Programme de Gouvernance et Gestion durable des Ressources Naturelles dans les espaces Comoé et Taï en Côte d'Ivoire» (Pro2GRN). Aussi, le Projet s'est-il engagé à faire la promotion d'un système agroforestier de jachère améliorée à l'acacia avec pour objectif de contribuer à l'amélioration de la fertilité du sol, de développer et de mettre en œuvre une initiative pilote de Suivi-Evaluation de l'impact des activités d'agroforesterie sur la réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre.

La Côte d'Ivoire est donc déterminée à jouer sa partition dans la protection de notre planète tout en assurant son développement économique. Elle a préparé et présenté à l'ensemble des parties prenantes du projet, trois (03) rapports des différentes activités qui ont été menées ces dernières années.

C'est dans cette dynamique que la Côte d'Ivoire est heureuse de présenter son premier rapport de l'ensemble du processus et des procédures qui visent à collecter et rapporter des informations factuelles (notamment des données pour l'estimation de l'évaluation de la biomasse aérienne, souterraine et du bilan carbone). Ce rapport fournit des informations scientifiques sur le système de Suivi- Evaluation (MNV) pour l'Agroforesterie en Côte d'Ivoire, les méthodes et procédures qui permettent d'informer toutes les parties prenantes pour comprendre tous les aspects du MNV local et la manière dont le projet a eu un impact à travers les plantations agroforestières des différents producteurs.



Nous espérons que les acteurs du climat, les universitaires, les chercheurs, les organisations de la société civile, les acteurs de l'industrie et le secteur privé trouveront dans ce rapport des informations de référence et d'orientation utiles.

Le Gouvernement de la République de Côte d'Ivoire continuera à renforcer les acquis et à assurer une mise à l'échelle dynamique en vue d'accroître la résilience de sa population à court, moyen et long terme

Directeur Général du Développement Durable
et de la Transition Écologique



Dr. ABOUA Gustave



REMERCIEMENTS

Cette publication vient clore le premier parcours du Projet Agroforesterie Comoé (PAC) dont les résultats sont le fruit d'une collaboration fructueuse entre l'Etat de Côte d'Ivoire à travers le Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de la Transition Ecologique (MINEDDTE), le Ministère d'Etat, Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Productions Vivrières (MEMINADERPV), le Ministère des Eaux et Forêts (MINEF) et un ensemble de partenaires techniques et financiers que sont : l'Union Européenne (UE), le Ministère Fédéral Allemand de la Coopération Economique et du Développement (BMZ), la Coopération Internationale Allemande (GIZ) et l'équipe du consortium HEAT-GFA chargée d'accompagner le processus de mise en œuvre du système de Mesure Notification Vérification (MNV).

Nous tenons à vous exprimer notre profonde gratitude pour le travail acharné que vous avez déployé pour les avancées notables dans la mise en œuvre du projet Agroforesterie Comoé dans son ensemble et du système MNV local en particulier.

Votre coopération et votre contribution ont été indispensables à la bonne exécution de ce projet ainsi que vos idées qui ont été essentielles à la réalisation de nos objectifs communs.

Merci de nous avoir donné l'opportunité de travailler avec vous et nous espérons poursuivre ce partenariat fructueux.

La réalisation des activités du MNV pendant ces quatre années a constitué une belle expérience d'apprentissage collectif et interactif. L'équipe composée d'une variété d'experts et d'apprenants s'est montrée professionnelle avec un sens d'éthique à chaque étape d'évolution du processus de collecte, de traitement et d'analyse des données qui doivent alimenter le système MNV Agroforesterie.

L'institution publique que nous sommes souhàite reconnaître les immenses contributions de tous ceux qui ont offert leurs services pour la préparation de ce rapport. Nous remercions l'UE et le BMZ pour leurs soutiens financiers au Projet Agroforesterie Comoé. Nous sommes aussi satisfaits du partenariat enthousiaste que nous avons eu avec le consortium HEAT-GFA et son équipe de soutien composée d'experts aguerris.

Pour ces résultats satisfaisants, nos remerciements vont particulièrement à l'endroit de toutes les parties prenantes au projet qui nous ont gratifiés de leur savoir-faire, de leur expertise et de leur disponibilité durant les différentes activités et ateliers.

Nos remerciements vont spécifiquement à l'endroit du Ministère d'Etat, Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Productions Vivrières qui assure la tutelle politique de ce projet.

C'est le résultat d'un processus national entièrement développé et mis en œuvre par les structures ivoirienne sous la houlette de la Direction de la Lutte contre les changements Climatiques et de la Transition Ecologique (DLCCTE). Les résultats, les interprétations et les conclusions présentés dans ce document sont pleinement ceux obtenus avec l'accompagnement de la GIZ à travers ses experts internationaux et nationaux du consortium HEAT-GFA.





TABLE DE MATIÈRE :

MESURE, NOTIFICATION ET VÉRIFICATION (MNV) D'AGROFORESTERIE ACACIA COMOÉ AU NIVEAU LOCAL

Liste des figures.....	XIII
Liste des tableaux.....	XX
Liste des Abréviations.....	XXI
Symboles et unités.....	XXIII
Résumé.....	XXV
Executive Summary.....	XXVII
Guide du lecteur.....	XXIX

SECTION I: CONCEPTION DU MNV LOCAL

I.1	Introduction.....	3
I.2	Exigences de base pour le système MNV.....	7
I.2.1	Qu'est-ce que le système MNV ?.....	7
I.2.2	Contraintes juridiques actuelles affectant les objectifs de conception du système MNV.....	8
I.3	Approches pour estimer les absorptions nettes des systèmes agroforestiers à l'échelle du paysage.....	9
I.3.1	Approche 1: Approche basée sur l'échantillonnage au niveau du champ ou de l'exploitation.....	9
I.3.2	Approche 2: Evaluation de la biomasse directe basée sur la télédétection au niveau du paysage..	10
I.4	Méthodes d'estimation des facteurs d'émission.....	11
I.5	Approche d'échantillonnage et de surveillance.....	13
I.5.1	Echantillonnage et surveillance des parcelles agroforestières.....	13
I.5.2	Echantillonnage à l'échelle du paysage.....	13
I.6	Échantillonnage sur le terrain.....	13
I.6.1	Échantillonnage de la végétation arborescente de la plantation d'Acacia sp.....	14
I.6.2	Échantillonnage de la végétation arborescente associée.....	14
I.6.3	Échantillonnage de la végétation non-arborescente.....	14
I.6.4	Échantillonnage du bois mort debout.....	15
I.6.5	Échantillonnage du bois mort couché.....	15
I.6.6	Échantillonnage de la litière.....	15
I.6.7	Échantillonnage du carbone du sol.....	15
I.7	Établissement d'équations allométriques.....	15
I.8	Calcul de la biomasse et des stocks de carbone.....	16
I.8.1	Calcul sur les parcelles agroforestières.....	16
I.8.2	Calcul de la biomasse des échantillons pour calibrer la biomasse au niveau de paysage.....	16



I.9	Cartographie à l'aide de drones.....	17
I.10	Cartographie à l'aide d'images satellites stéréo.....	19
I.11	Estimation des stocks dans les principaux réservoirs de carbone des plantations agroforestières.....	20
I.12	Taille de l'échantillon et stratégie d'échantillonnage.....	20
I.12.1	Stratégie sur les parcelles agroforestières.....	20
I.12.2	Stratégie pour obtenir un échantillon pour le calibrage des données au niveau de paysage.....	21
I.12.3	Echantillonnage des parcelles agroforestières.....	21
I.13	Cartographie du stock de carbone à l'aide du radar ALOS-2 au niveau du paysage.....	23
I.14	Suivi des données d'activité.....	24
I.15	Configuration et développement du système informatique MNV.....	27
I.16	Cadre institutionnel.....	30
I.16.1	Rôles et capacités institutionnels nécessaires pour le fonctionnement du système MNV local.....	30
I.16.2	Acteurs au sein du système MNV agroforestier.....	31
I.17	Résumé et perspectives.....	36

SECTION II: ÉVALUATION DE LA BIOMASSE EN SYSTÈMES AGROFORESTIERS D'ACACIA / MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 1

II.1	À propos de ce volume.....	39
II.2	Description des méthodes d'échantillonnage.....	40
II.2.1	Végétation arborescente de la plantation d'acacia.....	41
II.2.2	Végétation arborescente associée.....	44
II.2.3	Végétation non-arborescente.....	45
II.2.4	Bois mort debout.....	46
II.2.5	Bois mort couché.....	48
II.2.6	Litière.....	49
II.2.7	Carbone organique du sol.....	50
II.2.8	Procédure opérationnelle standard pour demander des analyses du laboratoire.....	51
II.3	Calculs du carbone dans les bassins de carbone échantillonnés.....	52
II.3.1	Végétation arborescente de la plantation d'acacia.....	52
II.3.2	Végétation arborescente associée.....	54
II.3.3	Végétation non-arborescente.....	55
II.3.4	Bois mort debout.....	56
II.3.5	Bois mort couché.....	57
II.3.6	Litière.....	58
II.3.7	Carbone organique du sol.....	59
II.4	Saisie des données mesurées sur le terrain avec l'outil QField et QGIS.....	59
II.4.1	Importer la base de données de base.....	59
II.4.2	Enregistrement des mesures.....	62
II.4.3	Guide pour le transfert des données QField vers un PC.....	67



II.5	Echantillonnage des arbres pour développer la relation de la biomasse et du stock de carbone avec le DHP et la hauteur totale.....	69
II.5.1	Sélectionner aléatoirement des arbres pour mesurer DHP et H.....	69
II.5.2	Mesurer le volume du tronc et des branches.....	70
II.5.3	Déterminer la masse spécifique du bois et de l'écorce.....	71
II.5.4	Disséquer les composantes principales de l'arbre.....	72
II.5.5	Peser la biomasse fraîche de ses composantes.....	73
II.5.6	Déterminer la biomasse sèche de ses composantes.....	74
II.6	Calcul de la biomasse et du stock de carbone des arbres disséqués et ses relations avec le DHP et la hauteur totale.....	75
II.6.1	Calculer les biomasses des composantes distinguées et les biomasses totales des arbres analysés.....	77
II.6.2	Analyser les relations polynomiales entre DHP et biomasse et entre H et biomasse, montrant les résultats dans les graphiques indiquant l'algorithme et le facteur de corrélation (R ²).....	80
II.7	Mesure des données d'activités.....	84
II.7.1	Enregistrement initial d'une parcelle.....	84
II.7.2	Liste des mesures à documenter.....	88
II.7.3	Cartographie des parcelles agroforestières.....	90
II.8	Informations et matériel additionnel pour Volume 1.....	90
II.8.1	Exemple des données du terrain et du calcul des résultats.....	90
II.8.2	Pièces d'Équipement pour la Mesure.....	90
II.8.3	Exemple de l'Utilisation d'un Dendromètre (NIKON Forestry 550).....	92

SECTION III: ANALYSE DES DONNÉES DE TERRAIN COLLECTÉES SUR LES PARCELLES AGROFORESTIÈRES POUR L'ESTIMATION DU BILAN CARBONE / MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 2

III.1	À propos de ce volume.....	95
III.1.1	Objectif spécifique.....	95
III.1.2	Public visé.....	95
III.2	Flux de travail.....	96
III.3	Saisie et préparation des données.....	96
III.3.1	Installation des extensions de QGIS.....	97
III.3.2	Configuration de la connexion avec la base des données.....	98
III.3.3	Exécuter l'outil d'importation de données QField.....	101
III.3.4	Données du laboratoire sur le sol et la litière.....	108
III.4	Analyse des données de terrain.....	110
III.4.1	Organisation du script R et des données d'entrée.....	110
III.4.2	Sorties.....	113



SECTION IV: ANALYSE DE DONNÉES / IMAGES À HAUTE RÉOLUTION PROVENANT DE DRONES ET SATELLITES POUR LE MNV LOCAL D'AGROFORESTERIE AVEC ACACIA / MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 3

IV.1	A propos de ce volume.....	125
IV.1.1	Objectif du manuel.....	125
IV.1.2	Public visé.....	125
IV.2	Partie 1 : Analyse des données des drones.....	126
IV.2.1	Phase de préparation.....	126
IV.2.2	Phase de collecte des données.....	127
IV.2.3	Phase de traitement et d'analyse des données.....	133
IV.3	Partie 2: Image satellite stéréo haute résolution.....	147
IV.3.1	Introduction.....	147
IV.3.2	L'obtention d'images.....	149
IV.3.3	Prétraitement.....	149
IV.3.4	Obtention d'un DEM de référence.....	151
IV.3.5	Script pour la génération d'un MNS.....	151
IV.3.6	Ajustement du géoréférencement des fichiers de sortie.....	156
IV.3.7	Interpolation de MNT.....	160
IV.3.8	Création du Modèle Numérique de hauteur de Canopée (MNC)	162
IV.3.9	Estimation de la biomasse d'acacia.....	162
IV.4	Conclusions et prochaines étapes recommandées.....	164
IV.5	Liste des annexes pour la Volume 3.....	165
IV.5.1	Instructions d'installation des logiciels de traitement.....	165
IV.5.2	Script pour le traitement des données des drones.....	165
IV.5.3	Script pour le traitement des données des satellites.....	165
IV.5.4	Exemple de termes de référence.....	165
	Bibliographie.....	166



LISTE DES FIGURES

Figure I-1 :	Schéma illustrant l'agroforesterie séquentielle (jachère améliorée à l'acacia), en commençant par la plantation d'Acacias.....	4
Figure I-2 :	Principales sources et processus d'émission/d'absorption de gaz à effet de serre dans les écosystèmes gérés (IPCC 2006).....	6
Figure I-3 :	Illustration conceptuelle de la méthodologie pour l'approche 1.....	12
Figure I-4 :	Illustration conceptuelle du flux de travail pour l'analyse des données des drones (adapté de Toffanin 2019)	17
Figure I-5 :	Illustration de produits obtenus des données des drones (village de Ségbéré, sous-préfecture Boniérédougou, janvier 2023).....	18
Figure I-6 :	Modèle numérique de la Canopée (MNC) produit avec les données du drone (échelle en m).....	18
Figure I-7 :	Illustrations de deux plantations d'Acacia, plantées en 2022 (contour rouge), et 2021 (contour bleu). Images prises par Skysat en mode stéréo en février 2023 à une résolution de 0,8 m. Village de Litiari, sous-préfecture Foubolo.....	19
Figure I-8 :	Carte des grappes pour la sélection des parcelles à échantillonner dans la zone du projet. Échelle 1:1,000,000. Vert : grappes d'échantillonnage ; orange : parcelles agroforestières.....	22
Figure I-9 :	Densité de la biomasse aérienne estimée à partir d'ALOS 2 PALSAR pour 2021 dans la zone du projet (Parcelles agroforestières aux contours magenta).....	23
Figure I-10 :	Densité de biomasse ALOS 2 PALSAR 2021 pour la même zone avec les changements entre 2019 et 2021 détectés de manière automatique.....	24
Figure I-11 :	Illustration de la configuration du réseau pour le MNV agroforesterie Comoé.....	27
Figure I-12 :	Logiciels utilisés pour le stockage, l'affichage et l'analyse du MNV agroforestier...	29
Figure I-13 :	Acteurs et rôles définis dans l'atelier de lancement, Dabakala, 2022 (Processus MNV, 1/2).....	32
Figure I-14 :	Acteurs du système MNV et Flux des données proposée En rouge : travail principalement sur le terrain. En vert : travail principalement au bureau.....	35
Figure II-1 :	Croquis de la mesure de hauteur (H) et DHP des Acacias plantés dans la parcelle.....	41
Figure II-2 :	Mesure de diamètre à hauteur de poitrine.....	41
Figure II-3 :	Mesure de la hauteur de l'arbre avec une barre fabriquée avec des tubes métalliques ou de PVC.....	42
Figure II-4 :	Utilisation d'un dendromètre à rayon de laser pour mesurer la hauteur des acacias.....	42
Figure II-5 :	Croquis de la trigonométrie de la hauteur d'un arbre.....	42



Figure II-6 :	Mesure de la hauteur totale (gauche), du DHP (centre) et un croquis du transect de mesure des arbres associées (droite).....	44
Figure II-7 :	Poser le cadre de 120x120 cm pour collecter en sachets la végétation non-arborescente.....	45
Figure II-8 :	Coupe de toute végétation aérienne dans un cadre.....	45
Figure II-9 :	Croquis du transect de mesure du bois mort aérien (orange = classe 1, bleu = classe 2).....	46
Figure II-10 :	Mesure de la hauteur d'un tronc mort avec une barre métallique graduée.....	46
Figure II-11 :	Mesure du DHP d'un tronc mort avec un ruban mètre.....	46
Figure II-12 :	Mesure du diamètre d'un bois mort couché avec un mètre pliant.....	48
Figure II-13 :	Illustration d'un bois mort couché avec un mètre rigide pour la mesure du diamètre.....	48
Figure II-14 :	Prélèvement de la litière dans un cadre d'échantillonnage fabriqué localement.....	49
Figure II-15 :	A gauche : Enfouissement d'un carottier pour le prélèvement d'un échantillonnage du sol. A droite : Vue en détail d'un carottier de fabrication locale.....	50
Figure II-16 :	Croquis de l'échantillonnage de végétation arborescente associée, bois mort, végétation non-arborescente, de litière et de sol.....	51
Figure II-17 :	Écran d'accueil de Qfield.....	60
Figure II-18 :	Vue initiale de la carte.....	61
Figure II-19 :	Information sur la parcelle.....	61
Figure II-20 :	Menu QField avec légende / table des contenus.....	62
Figure II-21 :	Sélection du mode d'édition pour la coche sélectionné (Bois mort debout).....	63
Figure II-22 :	Création d'un point de mesure.....	63
Figure II-23 :	Saisie des données de mesure du bois mort couché.....	64
Figure II-24 :	Saisie des données de mesure du bois mort debout.....	64
Figure II-25 :	Saisie des données de mesure sol et litière.....	65
Figure II-26 :	Saisie des données de mesure des arbres de plantation (d'Acacia).....	65
Figure II-27 :	Saisie des données de mesure du végétation non arborescente.....	66
Figure II-28 :	Saisie des données des autres arbres.....	66
Figure II-29 :	Croquis des mesures du volume du tronc et des branches.....	70



Figure II-30 :	Mesure de la longueur du tronc ≥ 3 cm diamètre et contrôle de la hauteur totale...	71
Figure II-31 :	Mesure de l'épaisseur de l'écorce d'une section de tronc à l'aide d'un pied à coulisse.....	71
Figure II-32 :	Ensemble d'échantillons de bois avant l'envoi au laboratoire.....	71
Figure II-33 :	Échantillons d'écorces de différents parts du tronc pour déterminer le poids sec avec l'étiquette pour le laboratoire placée à l'intérieur du sac de plastique.....	71
Figure II-34 :	Mesure du volume d'un échantillon de bois par la méthode de déplacement d'eau.....	71
Figure II-35 :	Sécateur et scie à main pour découper les composantes.....	72
Figure II-36 :	Échantillon de branches (< 3 cm et ≥ 1 cm) avec l'étiquette pour le laboratoire.....	72
Figure II-37 :	Échantillon de branches fines (< 1 cm) avec l'étiquette pour le laboratoire.....	72
Figure II-38 :	Échantillon de feuilles avec l'étiquette pour le laboratoire.....	72
Figure II-39 :	Pesée d'un échantillon de branches fines.....	73
Figure II-40 :	Exemple d'une balance suspendue électronique pour accrocher des poids jusqu'à 10kg.....	73
Figure II-41 :	Étiquetage des sacs destinés à contenir les différents échantillons.....	74
Figure II-42 :	Armoire de séchage au laboratoire.....	74
Figure II-43 :	Balance électronique de précision au laboratoire.....	74
Figure II-44 :	Tableau en MS Excel avec les données saisies des échantillons des parcelles.....	75
Figure II-45 :	Tableau en MS Excel avec les données pour le laboratoire saisi des échantillons des parcelles	76
Figure II-46 :	Calcul des volumes, biomasses et stocks de carbone du bois et de l'écorce en MS Excel	77
Figure II-47 :	Calcul des biomasses et stocks de carbone des branches, branches fines, feuilles, fleurs et fruits en MS Excel	78
Figure II-48 :	Calcul de la biomasse, du stock de carbone et du CO ₂ séquestré par arbre et par hectare.....	79
Figure II-49 :	Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre diamètres DHP et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia auriculiformis et Hybride.....	81



Figure II-50 :	Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre hauteurs totales et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia auriculiformis et Hybride.....	81
Figure II-51 :	Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre diamètres DHP et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia mangium.....	82
Figure II-52 :	Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre hauteurs totales et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia mangium.....	83
Figure II-53 :	Vue des parcelles voisines. À gauche : parcelle déjà brûlée où les petits arbres sont tués avant de commencer à cultiver ; à droite : parcelle destinée à être cultivée au cours du prochain cycle, où les activités de défrichage n'ont pas encore commencé.....	85
Figure II-54 :	Photographies géoréférencées des quatre coins de la parcelle prises lors de la visite sur le terrain. Les numéros renvoient aux numéros de la carte en Figure II-55.....	85
Figure II-55 :	Image satellite de la parcelle visitée avec les emplacements des photographies des quatre coins (étoiles rouges) prises lors de la visite de terrain. Les numéros se réfèrent aux photos prises. Les coordonnées sont en UTM, zone 30 N.....	86
Figure II-56 :	Biomasse accumulée des 1 a 20 arbres de différents diamètres et comparaison avec la biomasse des plantations d'acacias 3 ans (exemple de 1 ha).....	87
Figure III-1 :	Flux de travail pour la collecte et le traitement des données de terrain.....	96
Figure III-2 :	Ecran QGIS avec menu d'installation des extensions.....	97
Figure III-3 :	Ecran QGIS pour l'installation d'une extension depuis un ZIP.....	98
Figure III-4 :	Menu QGIS pour ouvrir le dossier du profil actif.....	98
Figure III-5 :	Dossier des extensions QGIS avec l'extension « uploadcarbonpool ».....	99
Figure III-6 :	Fichier « db-config.config » dans le dossier de l'extension « uploadcarbonpool »..	100
Figure III-7 :	Contenu de fichier « db-config.config » pour la configuration de la connexion à la base des données.....	100
Figure III-8 :	L'extension MNV Agroforesterie (= uploadcarbonpool) dans la boîte d'outils.....	101
Figure III-9 :	Écran d'importation des données dans la base de données MNV.....	102
Figure III-10 :	Configuration de l'écran d'importation des données dans la base de données MNV.....	103
Figure III-11 :	Écran de connexion avec la base des données MNV.....	104
Figure III-12 :	Tableaux et couches dans la base des données MNV (vue du Explorateur QGIS).....	105
Figure III-13 :	Parcelle agroforestière enregistrée dans la base de données MNV et consultation de l'ID unique avec l'i-Tool	106



Figure III-14 :	Message de l'outil d'importation après l'importation (avec des données vides, dans ce cas).....	107
Figure III-15 :	Outil d'importation des données de laboratoire.....	108
Figure III-16 :	Message de l'outil d'importation des données de laboratoire après l'importation....	109
Figure III-17 :	Interface utilisateur R pour l'exécution du document knitr markdown pour l'analyse des données de carbone sur le terrain avec l'information sur l'connexion à la base des données.....	111
Figure III-18 :	Sélectionner différents formats de sortie.....	112
Figure III-19 :	Contenu des mesures de la densité de la biomasse aérienne de l'acacia au niveau de l'arbre.....	113
Figure III-20 :	Contenu des estimations des densités de biomasse et de carbone (en t/ha).....	114
Figure III-21 :	Résultats sur la végétation arborescente associée.....	115
Figure III-22 :	Résultats de l'analyse du bois mort sur pied.....	116
Figure III-23 :	Résultats de l'analyse des données de terrain sur le bois mort couché.....	117
Figure III-24 :	Résultats de l'analyse pour la végétation non arborée.....	118
Figure III-25 :	Résultats de l'analyse du sol et de la litière.....	119
Figure III-26 :	Densité de carbone sur les parcelles agroforestières (t/ha) dans différents pools...	120
Figure III-27 :	Résumé des réservoirs de carbone (t/ha) dans les différents réservoirs.....	121
Figure III-28 :	Vue du rapport d'analyse des données de terrain.....	122
Figure IV-1 :	Flux de travail pour le traitement des données des drones.....	126
Figure IV-2 :	Drone utilisé pour la cartographie des parcelles agroforestières. La caméra est indiquée par le cercle rouge.....	127
Figure IV-3 :	Planification du vol du drone (exemples de trajectoires de vol pour l'acquisition d'images).....	128
Figure IV-4 :	Drone avant le lancement.....	129
Figure IV-5 :	Images séquentielles prises par le drone.....	132
Figure IV-6 :	Inspection visuelle des images de drone.....	132
Figure IV-7 :	Nuage de points denses colorés avec les couleurs naturelles des images.....	133
Figure IV-8 :	Structure conseillée pour les données d'apprentissage.....	135



Figure IV-9 :	Création d'un projet dans WebODM.....	135
Figure IV-10 :	Chargement des images dans webODM pour traitement.....	136
Figure IV-11 :	Options de création pour le traitement des données de drones dans Web ODM.....	136
Figure IV-12 :	Activation de la génération de MNS et de MNT dans WebODM.....	137
Figure IV-13 :	Options de création pour le filtrage du bruit dans WebODM.....	137
Figure IV-14 :	Traitement des images sur ODM.....	137
Figure IV-15 :	Vue d'une tâche WebODM une fois terminée.....	138
Figure IV-16 :	Orthophoto dans WebODM.....	138
Figure IV-17 :	MNS dans WebODM.....	138
Figure IV-18 :	Vue 3D du nuage de points dans WebODM.....	139
Figure IV-19 :	Téléchargement de données à partir de WebODM.....	139
Figure IV-20 :	Inspection visuelle des orthophotos.....	140
Figure IV-21 :	Modèle numérique de surface avec légende (hauteur en mètres au-dessus du niveau de la mer).....	141
Figure IV-22 :	Dérivation d'un MNC à partir d'un MNS et d'un MNT (hauteur du MNC en m).....	141
Figure IV-23 :	Illustration du concept de modèle de hauteur de la canopée ($MNC = MNS - MNT$).	142
Figure IV-24 :	Identification des acacias plantées en R et manuellement. Le modèle de la canopée des arbres se trouve en dessous. Les points sont les cimes des arbres identifiées à partir du modèle de hauteur de la couronne. Les lignes rouges montrent les données vectorielles utilisées pour exclure les arbres autres que les acacias.....	144
Figure IV-25 :	Flux de calcul pour estimer la densité de la biomasse et de carbone d'acacia à partir de drones.....	144
Figure IV-26 :	Graphique en boîte montrant la médiane (ligne noire épaisse), les quantiles de 25 % et 75 % (limites supérieure et inférieure de la boîte) et les valeurs aberrantes de la hauteur des arbres et de la biomasse d'une parcelle.....	146
Figure IV-27 :	Contenu du dossier avec les résultats de l'analyse des drones.....	146
Figure IV-28 :	Illustration du concept de traitement des images stéréoscopiques.....	147
Figure IV-29 :	Deux images (montrant le village de Ségberé) se chevauchant largement et utilisées pour l'analyse stéréoscopique.....	148
Figure IV-30 :	Flux de travail pour le traitement des images stéréoscopiques.....	148



Figure IV-31 :	Structure du Dossier de l'image L1a de Base de Skysat.....	150
Figure IV-32 :	Exemple de Contenu de Fichier RPC.....	150
Figure IV-33 :	Image panchromatique utilisée pour l'analyse stéréoscopique montrant une zone agricole et de savane	151
Figure IV-34 :	Structure des dossiers pour le traitement de Skysat sous Linux.....	152
Figure IV-35 :	Output structure du dossier du traitement Skysat sous Linux (à gauche) et Windows (à droite).....	153
Figure IV-36 :	L'orthophoto traitée superposée sur une image satellite de Bing maps. L'examen des routes sur les deux images montre que l'orthophoto n'est pas encore géoréférencée avec précision.....	156
Figure IV-37 :	Image multispectrale Skysat sur des cartes Bing visualisées dans QGIS.....	157
Figure IV-38 :	Utilitaire de géoréférence avec points de rattachement pour une simple transformation linéaire.....	157
Figure IV-39 :	Les points de rattachement de la Figure IV-38 sur l'image multispectrale de référence Skysat.....	158
Figure IV-40 :	Fenêtre de géoréférencement utilisant les points de rattachement de la Figure IV-38 pour corriger le géoréférencement du MNS.....	158
Figure IV-41 :	Orthophoto corrigée sur l'image multispectrale Skysat et l'image Bing maps en arrière-plan.....	159
Figure IV-42 :	MNS corrigé sur l'image multispectrale Skysat et cartes Bing en arrière-plan (hauteur en m au-dessus du niveau de la mer).....	159
Figure IV-43 :	A gauche : Image NDVI illustrant l'état de la végétation utilisée pour masquer les points hors sol. Les zones en vert foncé ont une couverture végétale vigoureuse (NDVI élevé), les zones en vert clair ont une faible couverture végétale verte (NDVI faible).....	160
Figure IV-44 :	Illustration de l'interpolation par spline de plaque fine : les points rouges sont les points de hauteur du sol connus. La surface est la surface du sol interpolée.....	161
Figure IV-45 :	MNT interpolé (à gauche) et MNS (à droite). Hauteur en mètres au-dessus du niveau de la mer.....	162
Figure IV-46 :	CHM pour les parcelles des plantations d'acacias.....	163
Figure IV-47 :	Gros plan sur les zones où poussent des acacias vivants.....	163



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 :	Attributs des parcelles de plantation.....	24
Tableau I-2 :	Informations collectées sur les données d'activités lors des visites sur le terrain.....	26
Tableau I-3 :	Principales responsabilités pour le fonctionnement du système MNV proposées par les institutions locales et nationales concernées.....	33
Tableau II-1 :	Fiche de collecte de données de diamètre (DHP) et hauteur totale (H) des arbres....	43
Tableau II-2 :	Fiche de collecte de données du bois mort debout.....	47
Tableau II-3 :	Données d'activités et données supplémentaires collectées dans les différentes phases de plantation.....	88
Tableau II-4 :	Fiche de collecte des données sur les arbres préexistants et les arbres laissées après le défrichement d'une parcelle.....	89



LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFAT	Agriculture, Foresterie et Autres Affectations des Terres
AH	Acacia auriculiformis & Hybride
ALOS	Satellite avancé d'observation de la terre (Advanced Land Observing Satellite en anglais)
ALS	Système LiDAR aéroporté
AM	Acacia mangium
ANADER	Agence Nationale d'Appui au Développement Rural
ANSUT	Agence Nationale du Service Universel des Télécommunications
ASP	AMES Stereo Pipeline
BA	Biomasse Aérienne (Above ground biomass, AGB en anglais)
BM	Bois mort
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BNETD	Bureau National d'Études Techniques et de Développement
BS	Biomasse Souterraine (Below ground biomass, BGB en anglais)
BUR	Rapport Biennal Actualisé (Biennial Update Report en anglais)
CCA	Conseil du Coton et de l'Anacarde
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CDN	Contributions Déterminées au Niveau National
CEOS	Comité pour l'observation de la Terre (Committee on Earth Observation, en anglais)
CIGN	Centre d'Informations Géographique et Numérique
CQ/AQ	Contrôle de Qualité / Assurance Qualité
CURAT	Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection
CV	Coefficient de variation
DD	Direction Départementale
DHP	Diamètre à Hauteur de Poitrine (Diameter at Breast Height, DBH en anglais)
DHS	Diamètre à Hauteur de Souche
DLCCTE	Direction de la Lutte contre les Changements Climatiques et de la Transition Ecologique
DR	Direction Régionale
ESA	Agence Spatiale Européenne
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food and Agriculture Organisation, en anglais)
GED	Enquête sur la dynamique de l'écosystème mondial (Global Ecosystem Dynamics Investigation, en anglais)
GES	Gaz à Effet de Serre (Greenhouse gas, GHG en anglais)
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC en anglais)
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH
GPS	Système de positionnement global (Global Positioning System en anglais)
H	Hauteur totale d'arbre



HS	Hauteur souche
INP-HB	Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
L	Litière
LiDAR	Détection et télémétrie par ondes lumineuses
MAG	Modèle Additif Généralisé
MEMINADERPV	Ministère d'Etat, Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Productions Vivrières
MINEDDTE	Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de la Transition Ecologique
MINEF	Ministère des Eaux et Forêts
MNC	Modèle Numérique de la Hauteur de la Canopée
MNS	Modèle Numérique de Surface (DSM en anglais)
MNT	Modèle Numérique du Terrain (DTM en anglais)
MNV	Mesure, Notification et Vérification (MRV en anglais)
ODM	OpenDroneMap
OIPR	Office Ivoirien des Parcs et Réserves
ONG	Organisation Non-Gouvernementale
PALSAR	Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar
PNC	Parc National de la Comoé
PNE	Production Nette de l'Écosystème
PNIA	Programme National d'Investissement Agricole
POS	Procédure Opérationnelle Standard (Standard Operational Procedure, SOP en anglais)
PPB	Production Primaire Brute
PPN	Production Primaire Nette
Pro2GRN	Programme Gouvernance et Gestion durable des Ressources Naturelles dans les espaces Comoé et Taï en Côte d'Ivoire
PVC	Polychlorure de vinyle (polyvinyl chloride en anglais)
REDD+	Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts, associées à la gestion durable des forêts, la conservation et l'amélioration des stocks de carbone forestier (Reducing emissions from Deforestation and forest Degradation, conservation of forest carbon stocks, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks)
RPC	Coefficients polynomiaux rationnels (Rational Polynomial Coefficients. en anglais)
SAR	Radar à synthèse d'ouverture (Synthetic Aperture Radar en anglais)
SEP-REDD+	Secrétariat Exécutif Permanent REDD+
SIG	Système d'Information Géographique (Geographic Information System, en anglais)
SOC	Carbone Organique du Sol (soil organic carbon en anglais)
SODEFOR	Société de Développement des Forêts
SPREF	Stratégie de Préservation et de Réhabilitation et d'Extension des Forêts
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TPS	Spline à plaque fine (Thin Plate Spline en anglais)
UFHB	Université Félix Houphouët-Boigny



SYMBOLES ET UNITÉS

Symboles chimiques des composés

C :	Carbone
CO ₂ :	Dioxyde de carbone ou Gaz carbonique
CH ₄ :	Méthane
N ₂ O :	Oxyde nitreux

Unités

ha :	hectare
m ² :	mètre carré
m ³ :	mètre cube
Mg :	Méga gramme
1 Mg = 1 t = 1000 kg = 1 000 000 g	
To :	Téraoctet (Anglais : terabyte)





RÉSUMÉ

Cette série de documents porte sur un système local de suivi notamment de Mesure, de Notification et de Vérification (MNV) pour les plantations agroforestières d'acacia dans l'espace Comoé.

Le paquet de documents est divisé en modules suivants :

- Document conceptuel : Ce document décrit l'objectif principal du système, les méthodes utilisées pour établir le système et le cadre institutionnel dans lequel le système doit fonctionner (SECTION I).
- Manuel de l'utilisateur : Le manuel de l'utilisateur est subdivisé en trois volumes :
 - o Vol 1 : Manuel des méthodes de terrain pour estimer les stocks de carbone (SECTION II) ;
 - o Vol 2 : Manuel d'analyse des données des mesures de terrain (SECTION III) ;
 - o Vol 3 : Méthodes de télédétection pour l'estimation des stocks de carbone (SECTION IV).

L'objectif principal du système MNV est de surveiller l'impact des activités agroforestières mises en œuvre dans la région rurale à l'ouest du Parc national de la Comoé et d'évaluer les changements associés au stock de carbone, ainsi que les gains potentiels obtenus grâce à la mise en œuvre du système agroforestier. Le MNV doit également pouvoir être étendu à d'autres types d'utilisation des terres et à d'autres régions de la Côte d'Ivoire.

Par conséquent, deux approches ont été présentées dans les documents décrivant le système MNV : une approche visant à obtenir la plus grande précision possible concernant les activités du projet d'agroforesterie, en particulier en ce qui concerne les plantations d'acacias, et une deuxième approche qui devrait fournir une solution économique et aussi précise que possible à l'échelle du paysage.

L'approche pour le MNV local se concentre donc sur les parcelles agroforestières. Les stocks de carbone d'un sous-ensemble représentatif de ces parcelles sont mesurés à l'aide de méthodes de terrain établies. Ces méthodes de terrain sont complétées par des observations faites à partir de drones. Sur un échantillon plus large de parcelles, des images satellites commerciales à très haute résolution sont acquises et analysées. Les données à l'échelle du paysage de la deuxième approche sont obtenues à l'aide de données de télédétection radar et LiDAR accessibles au public en exploitant la corrélation entre la biomasse aérienne, le retour du signal LiDAR et la rétrodiffusion radar.

Les méthodes d'échantillonnage et de télédétection ont pour but d'établir des facteurs d'émission. Ces facteurs d'émission sont utilisés pour calculer les bénéfices de carbone en conjonction avec les données d'activités liées à la gestion. Ces données d'activités sont saisies au niveau local documentant les activités liées aux parcelles agroforestières (par exemple, l'établissement de plantations, la mortalité, la récolte...). Pour que le système MNV soit opérationnel, un certain nombre d'outils informatiques sont nécessaires pour la saisie, l'analyse, le stockage, la distribution et la communication des données, qui sont également décrits de manière générale dans le document de conception.

Enfin, le cadre institutionnel est décrit et les contributions institutionnelles pour la mise en place d'un MNV au niveau local sont établies.

Les manuels d'utilisation s'adressent à la fois aux utilisateurs qui obtiennent des données de mesure sur le terrain et à ceux qui analysent ces données au bureau. Le premier volume contient une description détaillée de toutes les méthodes de terrain utilisées pour recueillir des données sur les parcelles agroforestières, ainsi qu'une description des formules mathématiques utilisées pour convertir ces mesures en estimation des stocks de carbone pour les différents réservoirs de carbone.



Le deuxième volume décrit l'analyse semi-automatique des données de mesure à l'aide du logiciel libre statistique et géospatial « R » et du logiciel du système d'information géographique « QGIS ».

Le troisième volume décrit l'utilisation de drones pour acquérir des données de télédétection au-dessus des parcelles. Il comprend des conseils sur la planification des vols et une description détaillée de la manière dont les données sont analysées à l'aide de R. La deuxième partie du manuel décrit comment une analyse similaire peut être effectuée avec des images satellitaires stéréoscopiques à très haute résolution.



EXECUTIVE SUMMARY

This series of documents is about a local monitoring, reporting and verification (MRV) system for acacia agroforestry plantations in the Comoé area.

The document package is divided in the following modules:

- Concept document: The document outlines the main purpose of the system, the methods used to establish the system, and the institutional framework within which the system is to function (SECTION I).
- User manual: The user manual is subdivided in three volumes:
 - o Vol 1: Manual for field methods to estimate carbon stocks (SECTION II)
 - o Vol 2: Manual for data analysis of the field measurements (SECTION III)
 - o Vol 3: Remote sensing methods for carbon stock estimation (SECTION IV)

The main objective of the MRV system is to monitor the impact of the agroforestry activities implemented in the region west of the Comoé National Park and assess the associated carbon stock changes, and potential gains, obtained through implementing the agroforestry system. The MRV shall also have the potential to be scaled up to other land use types and other regions of Côte d'Ivoire.

Therefore, two approaches have been presented in the volumes describing the MRV system: an approach aiming at obtaining the highest feasible accuracy regarding the agroforestry project activities, especially regarding the planting of Acacias, and a second approach that should provide a cost-effective, and as accurate as possible solution at the landscape scale.

The approach for the local MRV is therefore focused on the agroforestry parcels. Carbon stocks of a representative subset of these parcels are measured using established field methods. These field methods are supplemented by observations from drones. Over a larger sample of parcels, commercial very high resolution satellite images are acquired and analyzed. The landscape scale data for the second approach are derived using publicly available radar and LiDAR remote sensing data by exploiting the correlation between above ground biomass, LiDAR signal return and radar backscatter.

The sampling and remote sensing methods have the goal of establishing emission factors. These emission factors are used to calculate the carbon benefits in conjunction with the management-related activity data. These activity data are captured at local level, documenting the activities related to the agroforestry parcels (e.g., establishment of plantations, mortality, harvest...).

For the MRV system to be operational, a number of information technology tools are necessary for data capture, analysis, storage, distribution and reporting, which are also generally described in the concept document.

Finally, the institutional framework is described, and institutional contributions for establishing a local level MNV are established.

The user manuals are geared both towards users obtaining measurement data in the field and those who analyze these data in the office. The first volume contains a detailed description of all field methods used to collect data on the agroforestry parcels, and a description of the mathematical formulas used to convert these measurements into estimates of carbon stocks for the different carbon pools.



The second volume describes the semi-automated analysis of the measurement data using the statistical and geospatial software “R” and the geographic information system «QGIS».

The third volume describes the use of drones to acquire remote sensing data over the parcels. It includes advice on flight planning and a detailed description on how the data are analyzed using R. The second part of the third manual explains how similar analysis can be carried out with very high-resolution satellite stereo imagery.



GUIDE DU LECTEUR

Dans cette conception nous décrivons d'abord les considérations de base de la conception du système MNV au chapitre I.2, en commençant par les exigences énoncées par le mandat qui sous-tend ce travail. Nous expliquerons également les considérations légales et méthodologiques qui ont présidé à la conception du système.

Les chapitres I.3 et I.4 détailleront les méthodes utilisées pour obtenir les données sur le carbone stocké dans les parcelles (les facteurs d'émission, chapitre I.4) et les activités qui doivent être recensées afin d'effectuer la quantification pour la zone du projet (chapitre I.5 à I.14). Le chapitre I.15 décrira la conception d'un système d'information qui sera utilisé pour traiter, stocker et distribuer les données et les informations liées au système MNV. Le chapitre I.16 décrit le cadre institutionnel. La conception du MNV se termine par un résumé, une perspective des prochaines étapes et des recommandations tirées de l'expérience acquise jusqu'à présent.

Les sections II, III et IV suivants conformeront les 3 volumes du manuel de l'utilisateur. Le manuel s'adresse aux collègues des services publics de la Côte d'Ivoire qui s'intéressent aux mesures de carbone des systèmes agro-forestier, plus spécifiquement le carbone des boisements jeunes de 1 à 3 ans d'*Acacia auriculiformis*, d'*Acacia mangium* et les hybrides entre les deux espèces. Ces mesures de carbone, répétées dans les années suivantes, vont permettre d'estimer la séquestration du CO₂, le gaz principal à effet de serre.

Le premier manuel couvre le processus d'enregistrement d'une parcelle agroforestière et la saisie des données nécessaires pour rendre compte des activités (plantation, récolte, perturbations) sur le terrain. Le volume comprend des procédures pour l'élaboration d'équations allométriques permettant d'estimer la biomasse des jeunes Acacias.

Le deuxième manuel décrit et guide les utilisateurs dans l'analyse des données de stock de biomasse collectées sur le terrain à l'aide d'un script d'évaluation automatisé. Cette partie est une documentation sur les méthodes utilisées et un instrument de formation. Il vise à mettre à disposition les méthodes utilisées pour évaluer les données de terrain collectées lors de la campagne d'échantillonnage de terrain pour le MNV agroforestier local de la région de la Comoé.

Ce troisième manuel décrit et guide les utilisateurs dans l'application des méthodes de télédétection afin d'estimer l'absorption du carbone dans la biomasse aérienne des plantations d'acacia dans la zone à l'est du parc national de la Comoé. Les méthodes de télédétection sont utilisées pour compléter l'échantillonnage sur le terrain des différents stocks de carbone et réduire l'erreur d'estimation des moyennes. Il vise à mettre à disposition le raisonnement, la méthodologie, les étapes détaillées et les outils (logiciels) nécessaires à la collecte, au traitement et à l'analyse des données de télédétection acquises par des drones et des satellites.



SECTION I

CONCEPTION DU MNV LOCAL

AUTEURS

- Gernot Ruecker
- Prof. Gerald Kapp
- Dr. Milène Koutouan-Kontchoi
- Dirk Kloss
- Jörg Seifert-Granzin
- Brice Nehoun
- Antoine Tano Kouakou Servais





SECTION I: CONCEPTION DU MNV LOCAL

I.1 Introduction

La Côte d'Ivoire, pour répondre aux exigences de l'accord de Paris qu'elle a ratifié en 2016, s'est donnée, dans ses Contributions Déterminées au niveau National (CDN), un objectif de réduction de ses émissions nationales de gaz à effet de serre à 30,41 % en 2030, par rapport au scénario de référence tendanciel à la hausse de celles-ci (MINEDDTE-DLCCTE, 2022).

Pour mettre en œuvre sa politique bas carbone, elle se doit d'inverser la tendance des émissions dues à la déforestation et la dégradation des forêts, dont l'un des moteurs majeurs est l'Agriculture. En effet, cette dernière contribue à 62 % aux causes de déforestation (SEP REDD+, 2017a). Les inventaires de Gaz à Effet de Serre (GES) effectués dans le cadre des Communications Nationales (CN), du Rapport Biennal Actualisé (BUR), et du rapport sectoriel CDN en Foresterie, attestent que le secteur Agriculture, Foresterie et autres Affectations des Terres (AFAT) est le plus grand émetteur de GES. Cependant, il a le plus grand potentiel d'absorption de dioxyde de carbone (MINEDDTE-DLCCTE, 2022).

A cet effet, le gouvernement ivoirien a tracé un cadre d'orientation de réduction des émissions de GES dans des plans stratégiques et politiques nationales dans le secteur de l'AFAT. Il s'agit, notamment, de la Stratégie Nationale de Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts (SEP REDD+, 2017b), de la Stratégie Nationale de Préservation et de Réhabilitation et d'Extension des Forêts (SPREF; MINEF, 2019) et du Programme National d'Investissement Agricole de deuxième génération (PNIA, 2018), dans lesquels, il envisage la promotion à grande échelle des systèmes agroforestiers.

En effet, l'agroforesterie, outre son potentiel de réduction des émissions des GES par l'augmentation du stock de carbone de la biomasse végétale dans les exploitations agricoles, participe à la préservation des écosystèmes forestiers des parcs et réserves menacés par les riverains, tout en procurant des intérêts économiques à moyen terme pour les populations rurales.

Dans ce contexte, une initiative de développement d'un système agroforestier dans la région ouest du Parc National de la Comoé a été initiée en 2020, dans le cadre du programme «Gouvernance et Gestion durable des Ressources Naturelles des espaces Comoé et Taï (Pro2GRN)», mis en œuvre par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), sur financement de l'Union Européenne et du Ministère fédéral allemand de la Coopération Economique et du Développement (BMZ). Sur la base d'un protocole convenu avec le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable et de la Transition Ecologique (MINEDDTE), le projet a permis à la Direction de la Lutte contre les Changements Climatiques et de la Transition Ecologique (DLCCTE) du MINEDDTE, le développement et la mise en œuvre d'une initiative pilote de Mesure, de Notification et de Vérification (MNV) de l'impact des activités d'agroforesterie sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre et le renforcement de la résilience face aux changements climatiques.

L'action proposée est d'appuyer les producteurs villageois à convertir temporairement leurs champs en plantation de jachères forestières améliorées utilisant en majorité les espèces d'*Acacia auriculiformis* A.Cunn. ex Benth. (Fabaceae) mais aussi d'*Acacia mangium* Wild (Fabaceae). La population d'acacias sera à nouveau reconstituée grâce à une régénération semi-naturelle après le brûlage des terres qui interviendra juste après l'abattage des arbres. Ainsi, commencent spontanément les cycles agroforestiers sans avoir recours à une pépinière.



La biomasse produite par les Acacias présents sur les terres agricoles laissées en jachère, représente une quantité de stock de carbone organique emmagasinée dans la plantation. Ce système de valorisation de la jachère par le maintien de sa fertilité devrait limiter la pénétration croissante des activités agricoles dans les forêts et ainsi les préserver.

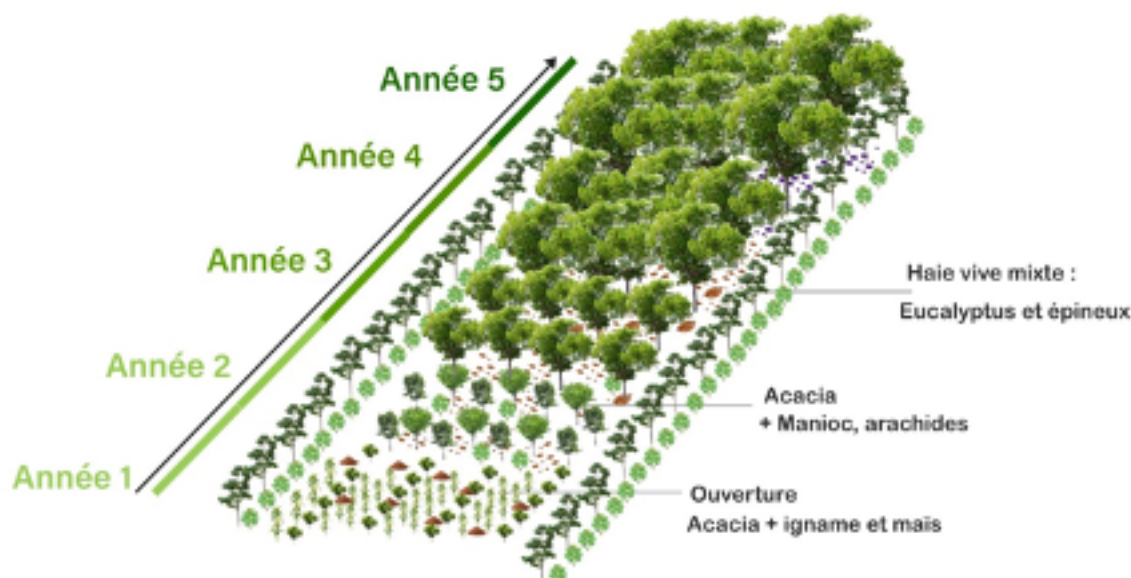


Figure I - 1: Schéma illustrant l'agroforesterie séquentielle (Jachère améliorée à l'acacia), en commençant par la plantation d'Acacias.

Le système agroforestier, à la fin de 2023, est mis en œuvre dans 14 sous-préfectures, 150 villages, avec plus de 1 200 producteurs impliqués. L'objectif à la fin de la cinquième année du projet est d'atteindre 5 000 ha de plantations d'Acacias. Pour ce faire, les campagnes faisant la promotion des systèmes agroforestiers à base d'Acacias, se multiplient de plus en plus en vue d'augmenter chaque année le nombre d'adhérents volontaires au projet, d'où l'augmentation systématique de la superficie des terres.

Les sites sont répartis sur deux (02) départements avec une superficie d'environ 18 820 km² à l'ouest du Parc National de la Comoé (PNC).

En plus de la présence de plantes annuelles cultivées (*Dioscorea* sp. (Dioscoreaceae), *Manihot esculenta* Crantz (Euphorbiaceae), *Solanum torvum* Sw (Solanaceae), etc.) et spontanées (*Chromolaena odorata* (L.) R. M. King & H. Rob. (Asteraceae), etc.) rencontrées sur les parcelles de production, les Acacias se mêlent très souvent à certaines cultures de rentes (*Anacardium occidentale* L. (Anacardiaceae), *Gossypium* sp. (Malvaceae), etc.), à certains arbustes indigènes préservés (*Crossopteryx febrifuga* (Afz ex G. Don) Benth. (Rubiaceae); *Bauhinia thonningii* Schumacher. (Fabaceae), etc.) et arbres (*Vitellaria paradoxa* C. F. Gaertn. (Sapotaceae), *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don. (Mimosaceae), *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (Bombacaceae), *Azizelia africana* Sm. ex Pers. (Fabaceae), *Khaya senegalensis* (Desv.) A. Juss. (Meliaceae), etc.), offrant ainsi, une variabilité considérable dans la configuration de ces systèmes agroforestiers. Les superficies plantées ont été géoréférencées et les activités de plantation initiales enregistrées. Selon les conditions du site, les taux de croissance et de survie des plantes varient considérablement.

L'un des avantages attendus du système agroforestier est l'augmentation du stockage du carbone dans le paysage où il est pratiqué.



La biomasse des plantes - souterraine et aérienne - est la principale voie d'absorption du dioxyde de carbone (CO_2) depuis l'atmosphère. De grandes quantités de CO_2 sont transférées entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres, en grande partie grâce à la photosynthèse et la respiration.

L'absorption de CO_2 par la photosynthèse est la Production Primaire Brute (PPB). Environ la moitié de la PPB est respirée par les plantes, et rendue à l'atmosphère, avec le reste, constituant la Production Primaire Nette (PPN), qui représente la production totale de biomasse et de matière organique morte par an.

La PPN moins les pertes dues à la respiration hétérotrophe (décomposition de la matière organique en litière, bois mort et sols) est égale aux variations nettes des stocks de carbone d'un écosystème, et - en l'absence de pertes dues à des perturbations - est nommée Production Nette de l'Ecosystème (PNE).

L'activité humaine a entraîné des altérations substantielles du cycle naturel du carbone, principalement en raison des combustibles fossiles (par exemple, des plantes fossilisées sous forme de charbon), libérant ainsi de grandes quantités de CO_2 et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère, notamment le méthane (CH_4) et le oxyde nitreux (également connu comme gaz hilarant, N_2O). Un autre processus important par lequel les humains modifient l'atmosphère est le changement d'utilisation des terres, principalement la conversion des forêts (où les arbres et les sols stockent beaucoup de carbone) en agriculture, où le stockage du carbone dans la végétation et les sols est beaucoup plus réduit. La Figure 1 - 2 illustre les principaux processus et flux de gaz à effet de serre dans un écosystème rural.

L'amélioration attendue du système agroforestier peut être obtenue par les moyens suivants :

- Un stockage de carbone accru sur les parcelles agroforestières. Même si les parcelles doivent être récoltées après cinq (05) ans, puisque la plantation est continue, il y aura en moyenne une plus grande quantité de carbone contenue dans les acacias que sans les acacias. En outre, la quantité moyenne de carbone du sol peut augmenter en raison de l'apport accru de litière par les arbres.
- Une fertilité accrue des parcelles après la récolte peut entraîner des cycles de jachère plus courts et une pression agricole moindre sur les forêts restantes. De plus, la fourniture de bois de chauffage ou de charbon de bois par la parcelle récoltée peut réduire la pression sur les forêts restantes.

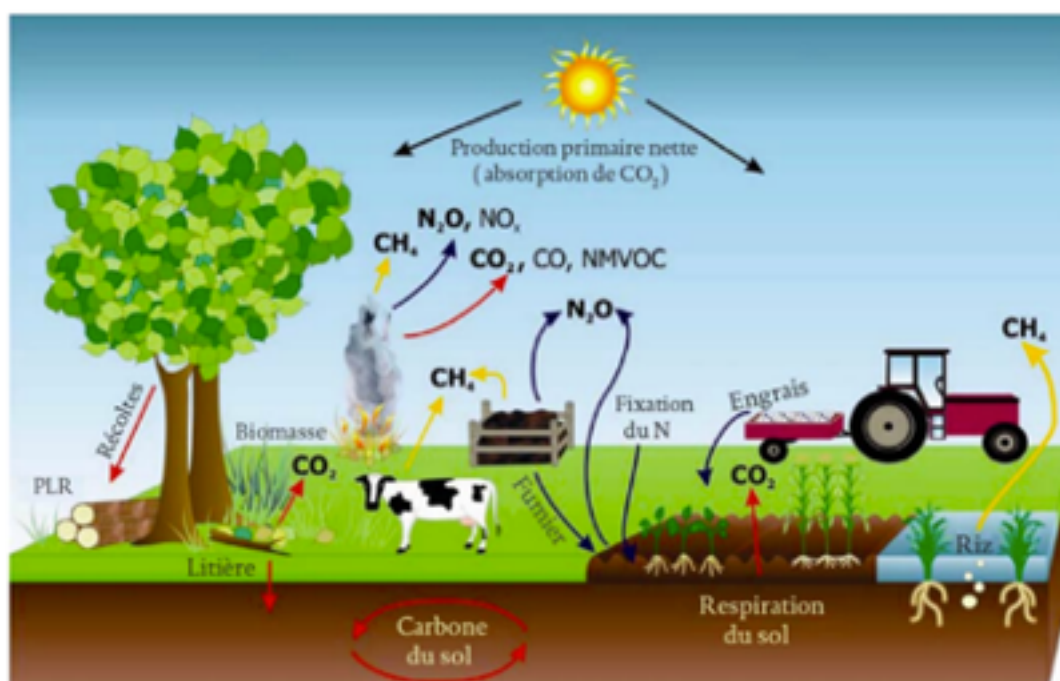


Figure I - 2 : Principales sources et processus d'émission/d'absorption de gaz à effet de serre dans les écosystèmes gérés (IPCC 2006)

Mais comment savoir si ces avantages escomptés se concrétisent vraiment et si nous pouvons réellement quantifier le stock de carbone séquestré et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre associée ?

Et de plus, une telle quantification permettra-t-elle d'inclure les activités d'agroforesterie dans les objectifs de réduction des émissions de la Côte d'Ivoire, et par conséquent aidera éventuellement à générer des avantages financiers liés à des accords internationaux ou à des activités du secteur privé ?

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire de mettre en place un système de mesure et de rapport, basé sur une méthodologie solide et vérifiable. C'est ce que le système de Mesure, Notification et Vérification (MNV) décrit ici est censé faire.



I.2 Exigences de base pour le système MNV

I.2.1 Qu'est-ce que le système MNV ?

MNV signifie Mesure, Notification et Vérification. Le système MNV des gaz à effet de serre (GES) décrit : a) le processus de mesure (et de surveillance) des émissions de GES ; b) la compilation et la déclaration de ces informations dans un système, un programme ou un organisme ; c) la soumission de ces données déclarées à un processus d'examen et de vérification par une troisième partie.

Les Parties à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), ont convenu de mesurer, notifier et vérifier les émissions et les absorptions des GES au niveau national de manière transparente et normalisée (Art. 13, Accord de Paris, 2015, UNFCCC 2016).

Les principaux objectifs de la conception du système MNV de l'agroforesterie de la Comoé se trouvent indiqués ci-dessous.

Le système MNV doit être capable d'évaluer :

1. L'impact des activités du projet en cours sur la réduction des émissions de GES ;
2. L'impact potentiel d'une extension des activités du projet sur les émissions de GES.

Le système devrait être conforme aux approches et aux processus concernant les Communications Nationales relatives aux Contributions Déterminées au niveau National (CDN).

Le système MNV doit être basé sur une méthodologie solide, mais en même temps, les rôles et les responsabilités pour son utilisation doivent être clarifiés avec les différents acteurs. La conception finale du système MNV devra donc contenir, à la fois une description claire de la méthodologie sous-jacente pour mesurer, notifier et vérifier et une description du cadre institutionnel, par exemple les rôles et responsabilités pour le fonctionnement au niveau local, ainsi que l'intégration des données au niveau national pour le rapportage des CDN.

Le système MNV local autour du PNC a pour vision de :

- Quantifier l'impact des activités agroforestiers du modèle amélioré à jachère à acacia proposé autour du PNC sur la réduction des émissions de GES.
- Suivre la contribution de l'agroforesterie à l'atténuation des effets des GES
- Contribuer à améliorer le système MNV national de l'agriculture, la foresterie et les autres affectations des terres (AFAT)
- Permettre la reproduction et l'extension des efforts d'atténuation climatique de l'agroforesterie et leur suivi MNV.
- Faciliter la quantification de co-bénéfices environnementaux de l'agroforesterie.

Les méthodologies de mesure doivent être conformes aux lignes directrices du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (IPCC 2006, IPCC 2019).



Leurs évolutions de stocks de carbone doivent être suivies, ce qui nécessite :

- Données sur les activités (données sur l'ampleur d'activités humaines génératrices d'émissions ou d'absorptions) : Paramètres de l'arborescence (espèce, nombre des arbres plantés, mortalité) et pratiques de gestion sur place.
- Facteurs d'émissions (Coefficient qui quantifie les émissions ou les absorptions d'un gaz par unité de donnée d'activité) pour les principaux réservoirs de carbone.

I.2.2 Contraintes juridiques actuelles affectant les objectifs de conception du système MNV

Les contraintes légales et les options pour la conception du système MNV et les conséquences pour les activités agroforestières seront brièvement résumées ici pour clarifier la logique de conception de l'approche d'échantillonnage. Les points suivants devront être examinés :

- L'objectif est clairement de faire en sorte que les activités agroforestières participent aux initiatives bas carbone de la Côte d'Ivoire et que cela soit notifié dans les rapports sur les CDN, et d'effectuer ceci dans le cadre des activités, notamment dans les rubriques qui se réfèrent au boisement/reboisement. Cependant, à l'heure actuelle, les systèmes agroforestiers avec un cycle de rotation court ne sont pas qualifiés comme forêt. Pour ce faire, la réglementation actuelle et la définition de « forêt » dans le Code Forestier de la Côte d'Ivoire devront être adaptées.
- En outre, pour générer des paiements basés sur les résultats de REDD+ par le biais de systèmes de paiement connexes, les activités devraient répondre à la définition légale de la forêt. Les exigences en matière d'incertitude doivent être respectées, ce qui augmente les exigences en matière de suivi. Les sauvegardes s'appliquent, ce qui a son tour peut affecter l'éligibilité des plantations d'acacias établies avec des espèces exotiques potentiellement envahissantes (Koutika and Richardson 2019).
- Le développement d'un projet pour le marché volontaire du carbone ne serait pas limité par la définition légale de la forêt. Un tel projet devrait répondre à des normes élevées en matière de rapports et la conception de l'activité devrait être adaptée pour se conformer aux méthodologies établies. En outre, une activité impliquant des espèces exotiques pourrait rencontrer des difficultés quant à son éligibilité dans le cadre de ces programmes.

Pour atteindre l'objectif selon lequel la généralisation des activités agroforestières développées constituera effectivement une contribution significative aux CDN, un certain nombre d'exigences devront être satisfaites:

1. Envisager que la conception du système agroforestier soit applicable à grande échelle (paysages). Cela nécessitera des ajustements (sélection des espèces, plantation, gestion, cycle et schéma de récolte) pour améliorer les performances d'atténuation des GES.
2. Les contributions à l'atténuation doivent être prises en compte dans l'inventaire national des GES et donc être reflétées dans le suivi des CDN.
3. Envisager que l'agroforesterie soit éligible en tant qu'activité contribuant aux objectifs des CDN. Soit les objectifs des CDN pourraient être modifiés, soit l'agroforesterie doit être encadrée de manière à rendre ses systèmes éligibles en tant qu'activités de renforcement des stocks de carbone forestier dans le cadre de la REDD+.



Afin d'atteindre une précision acceptable pour déclencher des paiements basés sur les résultats (à la fois dans le cadre des mécanismes REDD+ et d'un projet de marché volontaire), les facteurs d'émission locaux de niveau 3 du la GIEC doivent être dérivés en utilisant des techniques d'inventaire forestier approfondies.

Alors que ces problèmes doivent être encore résolus, d'autres étapes de conception en vue de l'établissement d'un système MNV devaient être prises en compte.

Au moment de la rédaction de ce document de conception, comment les exigences et les contraintes décrites ci-dessus seront satisfaites et dépend également de diverses décisions (par exemple, adapter le code forestier, ou définir un CDN pour l'agroforesterie) qui ne seront pas prises à l'échelle de temps imposée par le plan du projet, la conception méthodologique ultérieure du système MNV reflète cette incertitude. Cependant, les connaissances acquises lors des visites sur le terrain et des discussions avec les parties prenantes (par exemple, lors de l'atelier de lancement du système MNV du 22 novembre 2022 à Dabakala), ainsi qu'une estimation des coûts de la mise en œuvre des deux (02) options de surveillance offrent la possibilité de développer davantage de deux options, et de satisfaire aux deux exigences suivantes :

1. surveiller l'activité agroforestière avec des incertitudes suffisamment faibles pour se conformer aux exigences de marchés carbone basées sur les résultats dans les systèmes applicables (REDD+, marchés volontaires) ;
2. s'étendre à l'échelle du paysage et à l'échelle infranationale lorsque les programmes agroforestiers remplissent les conditions pour être qualifiés de catégorie clé pour la déclaration des CDN.

I.3 Approches pour estimer les absorptions nettes des systèmes agroforestiers à l'échelle du paysage

Les deux options développées pendant la phase de conception sont basées sur des données de télédétection et l'échantillonnage sur le terrain. Alors que l'approche 1 vise à mesurer les activités du projet avec un haut niveau de précision ; l'approche 2 est conçue pour fonctionner au niveau du paysage et à travers différentes catégories d'utilisation du sol, tout en étant moins spécifique concernant les activités du projet.

I.3.1 Approche 1 : Approche basée sur l'échantillonnage au niveau du champ ou de l'exploitation

Cette approche est basée sur l'échantillonnage des sites existants. L'échantillonnage est réalisé en combinant des techniques de terrain et la télédétection à partir de drones et d'images satellites à haute résolution. Sur le terrain, la biomasse aérienne (BA) est enregistrée sur un échantillon d'arbres. En appliquant des techniques de « structure à partir du mouvement » (structure from motion) aux données des drones et une analyse stéréoscopique aux images satellites, on obtient la hauteur de la végétation. Comme les drones et les satellites couvrent un plus grand nombre de parcelles, la taille de l'échantillon est ainsi augmentée tout en préservant le contrôle des incertitudes.



Cette approche est basée sur l'échantillonnage des sites existants. L'échantillonnage est réalisé en combinant des techniques de terrain et la télédétection à partir de drones et d'images satellites à haute résolution. Sur le terrain, la biomasse aérienne (BA) est enregistrée sur un échantillon d'arbres. En appliquant des techniques de « structure à partir du mouvement » (structure from motion) aux données des drones et une analyse stéréoscopique aux images satellites, on obtient la hauteur de la végétation. Comme les drones et les satellites couvrent un plus grand nombre de parcelles, la taille de l'échantillon est ainsi augmentée tout en préservant le contrôle des incertitudes.

Sur le terrain, le carbone organique du sol, le bois mort, la végétation non-arborescente, et la litière sont échantillonnés.

Pour les arbres de la plantation, le stock de carbone de la biomasse aérienne est dérivé par des équations allométriques locales, obtenues par un échantillonnage destructif.

Les autres arbres dans les parcelles et la végétation non-arborescente sont également échantillonnés, et leur biomasse est dérivée par des équations allométriques.

La hauteur de la végétation est utilisée conjointement avec les équations allométriques pour estimer le BA des acacias sur les parcelles à l'aide de la télédétection.

Toutes les activités agroforestières futures seront documentées et suivies à l'aide d'un modèle de données standardisé qui est décrit dans la dernière section de ce volume.

Avant la récolte et la fin du premier cycle, un deuxième inventaire est effectué. Nous recommandons un échantillonnage supplémentaire avant la récolte la cinquième année et après la récolte la sixième année.

1.3.2 Approche 2 : Evaluation de la biomasse directe basée sur la télédétection au niveau du paysage

La cartographie de la densité de la Biomasse Aérienne de la végétation ligneuse à l'aide d'un radar à synthèse d'ouverture (Synthetic Aperture Radar, SAR) s'est avérée réalisable dans les habitats forestiers secs (Mermoz, Le Toan et al., 2014, Joshi, Mitchard et al., 2015, Bouvet, Mermoz et al., 2018, McNicol, Ryan et al., 2018). Certaines solutions visent des produits à résolution moyenne (100 m) ou plus grossière (1 km) au niveau national ou continental (Mermoz, Le Toan et al., 2014, Joshi, Mitchard et al., 2015), mais des implémentations ayant une résolution spatiale de 25 ou 50 m sont également disponibles pour certaines années. (Bouvet, Mermoz et al., 2018, McNicol, Ryan et al., 2018).

En 2018, deux instruments LiDAR (Light Detection And Ranging) spatiaux sont devenus disponibles¹. Le LiDAR permet de mesurer la hauteur de la canopée. Cependant, le LiDAR spatial n'échantillonne la canopée qu'en certains points épars, distants de plusieurs kilomètres les uns des autres. La résolution spatiale de l'empreinte du faisceau du LiDAR à bord du GEDI est de 25 m et donc beaucoup plus grossière que celle d'un LiDAR aéroporté.

Récemment, le Comité sur les satellites d'observation de la Terre (Committee on Earth Observation, CEOS) a publié des bonnes pratiques et des protocoles sur la validation des produits de la biomasse ligneuse aérienne (Duncanson, Disney et al., 2021).

¹ GEDI : <https://gedi.umd.edu/mission/mission-overview/> et ICESAT : <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/mission>



En bref, le LiDAR et le SAR spatiaux doivent être calibrés avec des mesures terrestres in situ et, idéalement, avec des mesures laser aéroportées (Airborne LiDAR System, ALS) afin de produire des cartes de densité BA adéquates à des fins d'établissement de rapports dans le cadre de la CCNUCC.

Ainsi, pour obtenir une carte de la biomasse à l'échelle du paysage et des séries temporelles, les données ALOS-2 seront utilisées. Celles-ci seront calibrées avec des parcelles d'échantillonnage de la biomasse d'une taille de 1 ha. Pour l'étalonnage, les meilleures pratiques et protocoles convenus pour les évaluations directes de la biomasse (Duncanson, Disney et al. 2021) doivent être suivis, en accord avec les protocoles établis par la FAO et le SEP-REDD+ pour le Niveau de Référence de la Côte d'Ivoire (FAO, SEP-REDD+ 2017). Sur les parcelles, la BA est mesurée en couvrant le gradient BA en agroforesterie et en forêt naturelle.

Cette approche d'estimation de la biomasse à l'échelle du paysage a été analysée et approfondie par la campagne de collecte de données effectuée entre avril et juin 2023.

I.4 Méthodes d'estimation des facteurs d'émission

La méthodologie d'estimation des facteurs d'émission du système MNV local de l'agroforesterie est décrite ci-après. Après avoir énoncé quelques considérations de conception, les éléments du travail de terrain pour la mise en œuvre de l'approche 1 sont décrits. L'approche d'échantillonnage s'appuie également sur l'expérience acquise lors d'une campagne d'échantillonnage de préféabilité en novembre 2022.

La Figure I - 3 décrit l'approche d'échantillonnage utilisée pour le système MNV de l'agroforesterie locale (approche 1). La base est l'échantillonnage des réservoirs de biomasse pertinents in situ. Il s'agit de la tâche la plus exigeante en termes de main-d'œuvre et de la mesure la plus précise possible.

L'utilisation de drones et de techniques de traitement d'images photogrammétriques permet de couvrir une plus grande surface et d'estimer la biomasse aérienne à partir de modèles tridimensionnels des parcelles. De manière très similaire, mais avec une résolution plus grossière, des images satellites commerciales sont utilisées pour couvrir une zone encore plus grande qu'avec des drones.

Un quatrième niveau, typiquement à une résolution moins détaillée, peut être obtenu en utilisant des images satellitaires du domaine public qui peuvent être calibrées avec les données acquises lors des étapes précédentes, ce qui permet une couverture complète de toutes les parcelles.

La corrélation des mesures à tous les niveaux (voir Figure I - 3) permet de contrôler dans une large mesure les erreurs de mesure qui y sont associées.

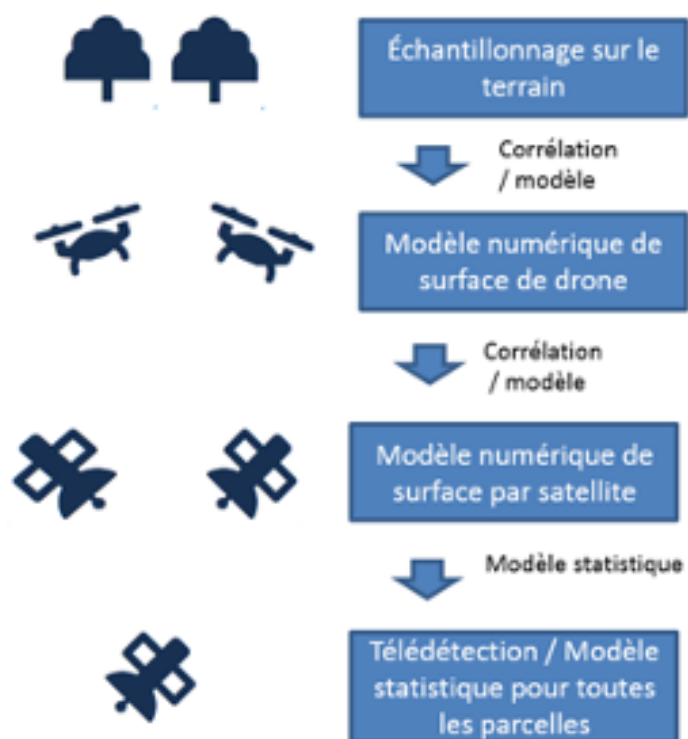


Figure I - 3 : Illustration conceptuelle de la méthodologie pour l'approche 1



I.5 Approche d'échantillonnage et de surveillance

I.5.1 Echantillonnage et surveillance des parcelles agroforestières

L'approche du système MNV local vise à quantifier les facteurs d'émission liés aux activités d'agroforesterie pour concevoir un système MNV capable d'évaluer l'impact des activités du projet en cours sur la réduction des émissions de GES.

Pour répondre à cette exigence et compte tenu de la couverture aérienne limitée des activités agroforestières du projet, ainsi que de la petite taille générale des parcelles (75 % des parcelles sont inférieures à 1 ha), une haute résolution spatiale est nécessaire pour réduire l'incertitude de nos mesures. En outre, au moment de la conception du système, seule une petite partie des parcelles plantées a atteint l'âge de trois ans, à savoir l'âge auquel nous attendons à avoir un impact mesurable de la séquestration du carbone par les acacias plantés.

Pour répondre à ces exigences, une combinaison d'échantillonnage sur le terrain, de mesures par drone et d'observations satellitaires de très haute résolution a été utilisée.

Étant donné les difficultés concernant l'inclusion directe des activités du projet dans les CDN de la Côte d'Ivoire, l'échantillonnage est conçu de manière à se conformer à la prochaine norme du « Verified Carbon Standard (VCS) » sur le boisement, le reboisement, et la revégétalisation (Verra 2023) tout en tenant compte des directives du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre dans le secteur forestier (IPCC 2006, IPCC 2019).

I.5.2 Echantillonnage à l'échelle du paysage

Bien que les mêmes méthodologies ou des méthodologies très similaires s'appliquent à l'échantillonnage pour l'analyse à l'échelle du paysage, le schéma et la stratégie d'échantillonnage seront différents. Un échantillon aléatoire de parcelles est nécessaire pour l'agroforesterie afin de caractériser au mieux les parcelles d'âge différent. Pour l'étalonnage des données de télédétection à l'échelle du paysage, cependant, une gamme de types d'utilisation des terres sera échantillonnée. Ces types d'utilisation des sols présenteront une large gamme de densités de biomasse aérienne (par exemple, proche de 0 à > 80 t/ha). Les parcelles d'un hectare doivent être représentatives et relativement homogènes afin de réduire l'erreur dans la fonction d'étalonnage.

I.6 Échantillonnage sur le terrain

Les réservoirs ou bassins de carbone normalement distingués dans les méthodologies du système MNV sont la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, la litière, le bois mort et le carbone organique du sol. Pour l'échantillonnage sur le terrain, les sept réservoirs de carbone suivants sont mesurés :

- a) Végétation arborescente de la plantation d'acacia ;
- b) Végétation arborescente associée ;
- c) Végétation non-arborescente ;
- d) Bois mort debout ;
- e) Bois mort couché ;
- f) Litière ;
- g) Carbone organique du sol.



Les réservoirs de carbone a), b) et c) correspondent à la biomasse aérienne et les réservoirs d) et e) correspondent au bois mort. La biomasse ligneuse souterraine n'est pas mesurée, mais elle est estimée à partir des ratios racines-pousses de la littérature (par exemple IPCC 2006). La méthodologie suit les méthodes décrites dans le manuel « Sourcebook » de BioCarbon Fund/Winrock (Pearson, Walker et al., 2013) avec des adaptations en utilisant des outils localement disponibles et suivant les méthodes d'inventaire de la FAO et le SEP-REDD+ (2017).

Ensuite, chaque méthode d'échantillonnage de chaque réservoir de carbone est brièvement décrite. Toutes les méthodes sont expliquées et décrites en détail dans le manuel d'utilisateur.

1.6.1 Échantillonnage de la végétation arborescente de la plantation d'Acacia sp.

Un échantillonnage aléatoire systématique est appliqué aux parcelles agroforestières. À l'intérieur de chaque parcelle, des transects sont tracés à partir du point d'entrée de la parcelle. Sur les parcelles variant généralement de 0,5 à plus d'un hectare, les transects sont établis tous les 12 mètres. Les arbres de bordure sont exclus des transects. Sur les transects, des points d'échantillonnage sont établis tous les 12 mètres et l'arbre le plus proche de chaque point d'échantillonnage est mesuré. Pour chaque arbre, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) est enregistré et la hauteur de l'arbre (H) est enregistrée à chaque cinquième arbre d'échantillonnage. Si l'arbre le plus proche du point d'échantillonnage est mort ou s'il n'y a pas d'arbre à proximité, cela est noté et les arbres morts ne sont pas mesurés. L'espèce des arbres échantillonnés est enregistrée (*A. auriculiformis* ou *A. mangium*). Ainsi, au total, sur une parcelle d'un hectare, environ 50 arbres de la plantation sont mesurés.

1.6.2 Échantillonnage de la végétation arborescente associée

La végétation arborescente associée est constituée de tous les arbres fruitiers ou des autres arbres locaux à partir d'une hauteur de 1,3 m présents sur la parcelle. Sur un transect de 100 m x 10 m, l'espèce, le DHP et la hauteur totale de ces arbres sont enregistrés (Pearson, Walker et al., 2013)².

1.6.3 Échantillonnage de la végétation non-arborescente

La végétation non-arborescente est constituée par toutes les plantes herbacées ou en cas des plantes ligneuses avec une hauteur de moins que 1,3 m. Cette végétation a été échantillonnée en utilisant un cadre d'échantillonnage de 120 * 120 cm aux endroits où la litière et le sol ont été échantillonnés. Toute cette végétation qui couvre ces superficies de 1,44 m² est coupée et pesée (Pearson, Walker et al., 2013).

²Pour améliorer la précision de l'échantillonnage des arbres autres que les acacias, la technique d'échantillonnage pourra être légèrement adaptée à l'avenir.



I.6.4 Échantillonnage du bois mort debout

Selon la norme VCS (Verra 2023) le bois mort debout doit être échantillonné en suivant les lignes directrices établies (par exemple Avery and Burkhart 2015). Sur un transect de 100 m x 10 m tous les bois morts debout d'un DHP ≥ 10 cm sont relevés avec leur classe (1= avec rameaux, classe 2=sans rameaux), leur diamètre de base (à 10 cm hauteur) et leur DHP et la hauteur du tronc (maximum jusqu'aux branches de la couronne).

I.6.5 Échantillonnage du bois mort couché

Le bois mort couché doit être mesuré en utilisant la méthode d'échantillonnage par intersection de lignes (Warren and Olsen, 1964 et Van Wagner, 1968). Dans cette méthode, trois classes de décomposition sont définies : 1=bois en bon état, 2=bois moyennement décomposé, 3=bois largement pourri. Une ligne de 100 m, pliée dans des sections de 25 m et 50 m, est définie. Le diamètre de tous les bois morts couchés qui coupent cette ligne est relevé, s'il est ≥ 10 cm.

I.6.6 Échantillonnage de la litière

La litière a été échantillonnée en utilisant un quadrant d'échantillonnage de 50 * 50 cm aux points où le sol a été échantillonné. Dans ces surfaces de 0,25 m² toute la litière (feuilles, rameaux < 10 cm diamètre, morceaux des feuilles ou des rameaux) est collectée, séchée dans le laboratoire à 70 °C et pesé (Verra, 2023).

I.6.7 Échantillonnage du carbone du sol

Selon les normes VCS (Verra, 2023), les 30 premiers centimètres du sol doivent être échantillonnés. Le sol est échantillonné en cinq (05) points placés au long du transect. Un carottier de 30 cm de long est utilisé pour extraire les échantillons.

I.7 Établissement d'équations allométriques

La biomasse aérienne de chaque arbre échantillonné sera estimée à l'aide d'équations allométriques. Une première version des équations allométriques spécifiques pour *Acacia mangium* et *Acacia auriculiformis* a été déterminée par échantillonnage destructif des arbres.

En général, et de même dans notre cas, les équations allométriques basées uniquement sur le DHP, qui est plus facile à échantillonner sur le terrain, sont suffisamment précises pour estimer la biomasse des arbres. Comme les méthodes de télédétection ne mesurent pas le DHP mais la hauteur de l'arbre, des équations allométriques basées sur la hauteur de l'arbre seront également établies. Ces équations sont comparées aux équations disponibles dans la littérature. Les détails de la méthode sont expliqués dans l'annexe.



I.8 Calcul de la biomasse et des stocks de carbone

I.8.1 Calcul sur les parcelles agroforestières

Tous les échantillons des différents réservoirs de carbone décrits ci-dessus doivent être convertis en biomasse et en densités de carbone (t/ha).

Selon le puits de carbone, différentes méthodes sont utilisées pour convertir les résultats des mesures en densité de carbone. Pour les arbres vivants et morts sur pied, la principale méthode consiste à suivre les étapes suivantes :

1. Mesurer le DHP et la densité des arbres.
2. Déterminer les équations allométriques.
3. Calculer la biomasse moyenne des arbres de chaque parcelle.
4. Calculer la densité de biomasse (biomasse * densité).
5. Calculer la densité de carbone (biomasse * 0.49).

Pour la litière et la végétation non ligneuse, la moyenne des échantillons est calculée, convertie en tonnes par hectare et multipliée par la teneur en carbone (0,49).

Pour obtenir la teneur en carbone du sol, le carbone de la fraction de terre fine (< 2 mm de diamètre) est multiplié par la densité apparente, et corrigé pour la fraction de matériaux grossiers.

La biomasse de bois mort est la somme des réservoirs de bois mort et elle est calculée selon les méthodes décrites dans les documents de Pearson, Walker et al. (2013) et de la FAO, SEP-REDD+ (2017). Pour obtenir la densité de carbone totale, les densités de carbone de tous les réservoirs sont additionnées. L'analyse de la densité de carbone pour la zone du projet sera ensuite basée sur la stratification utilisée dans l'échantillonnage (zone et classe d'âge).

I.8.2 Calcul de la biomasse des échantillons pour calibrer la biomasse au niveau de paysage

Ce calcul se fait de la même manière que celui de la biomasse des parcelles utilisées pour l'étalonnage des données de télédétection et pour l'estimation des stocks à l'échelle du paysage. Ici, la biomasse des arbres est généralement calculée selon les équations données par Chave, Réjou-Méchain et al., (2014).

Les méthodes appliquées sont étroitement orientées vers celles données par la FAO, SEP-REDD+, (2017).



I.9 Cartographie à l'aide de drones

Des drones sont utilisés pour obtenir des images photogrammétriques à très haute résolution (environ 8 à 10 cm) pour un sous-ensemble de parcelles. Cette imagerie permet de déduire la hauteur de la canopée et éventuellement la densité des arbres.

Pour obtenir des images utiles aux applications stéréoscopiques, de grandes parties des photographies obtenues doivent se chevaucher. L'approche permettant de dériver le modèle de hauteur de la canopée utilisé pour calculer la biomasse est appelée « structure-from-motion ». Pour extraire le modèle numérique d'élévation et le Modèle Numérique de Canopée (MNC), le logiciel open source OpenDrone Map est utilisé. Le processus de traitement est illustré ci-dessous :

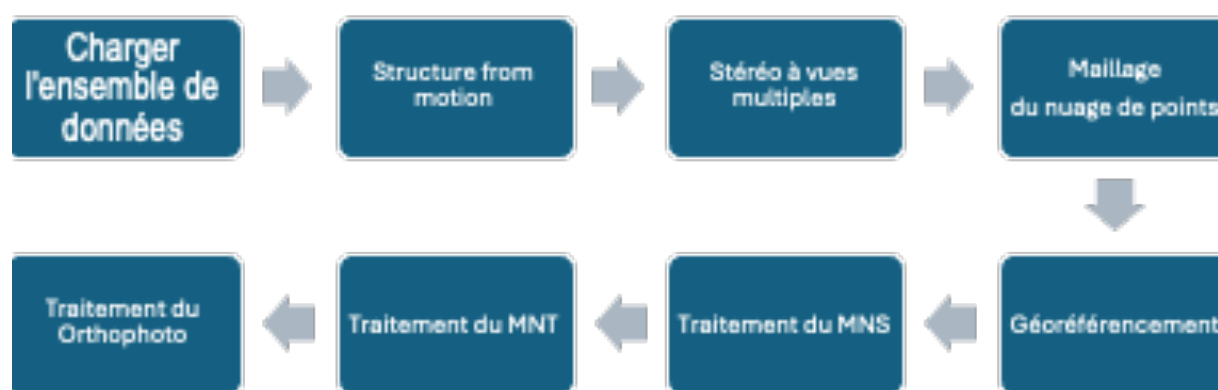


Figure I - 4 : Illustration conceptuelle du flux de travail pour l'analyse des données des drones (adapté de Toffanin, 2019)



Sur la base de l'image 3D, un modèle de hauteur de la canopée est dérivé, et à l'aide de méthodes d'extraction automatisées, les hauteurs des arbres sont estimées. En utilisant les équations allométriques, le carbone des acacias et des arbres non-acacias est estimé.



Figure I - 5 : Illustration de produits obtenus des données des drones (village de Ségbéré, sous-préfecture Boniérédougou, janvier 2023).

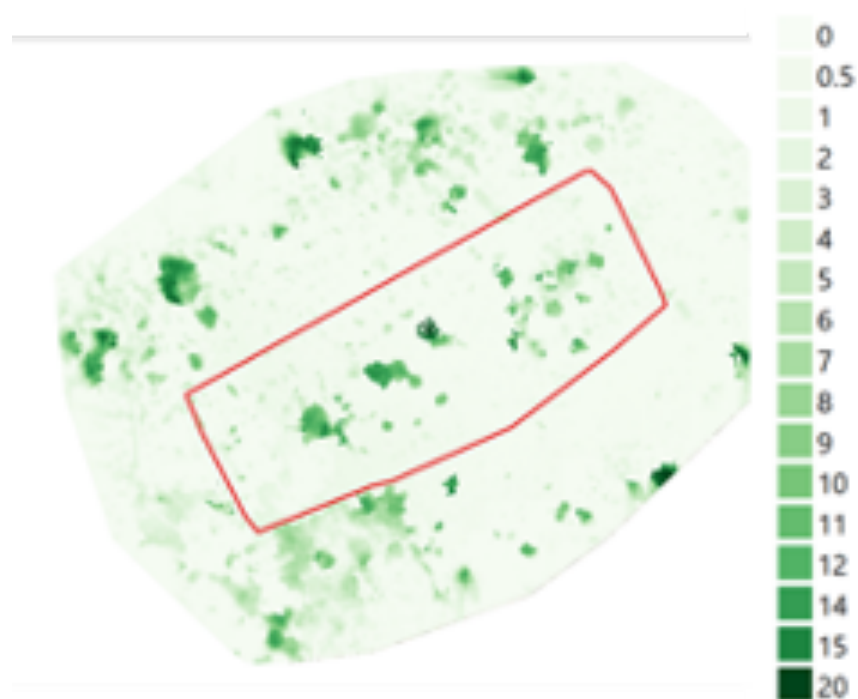


Figure I - 6 : Modèle numérique de la Canopée (MNC) produit avec les données du drone (échelle en m)



I.10 Cartographie à l'aide d'images satellites stéréo

A une résolution spatiale haute, les satellites peuvent fournir des MNCs par le biais de multiples (deux ou trois) acquisitions de la même zone cible à partir de différents angles de vue. Les satellites commerciaux ayant une résolution spatiale inférieure à un mètre peuvent obtenir de telles données qui peuvent être traitées à l'aide de logiciels libres (Bhushan, Shean et al, 2021). Un échantillon de parcelles doit être analysé selon cette approche. Bien que l'imagerie satellitaire commerciale soit coûteuse, l'acquisition d'images satellitaires peut être une option plus économique que les méthodes décrites ci-dessus, étant donné qu'aucun déplacement sur le terrain n'est nécessaire.

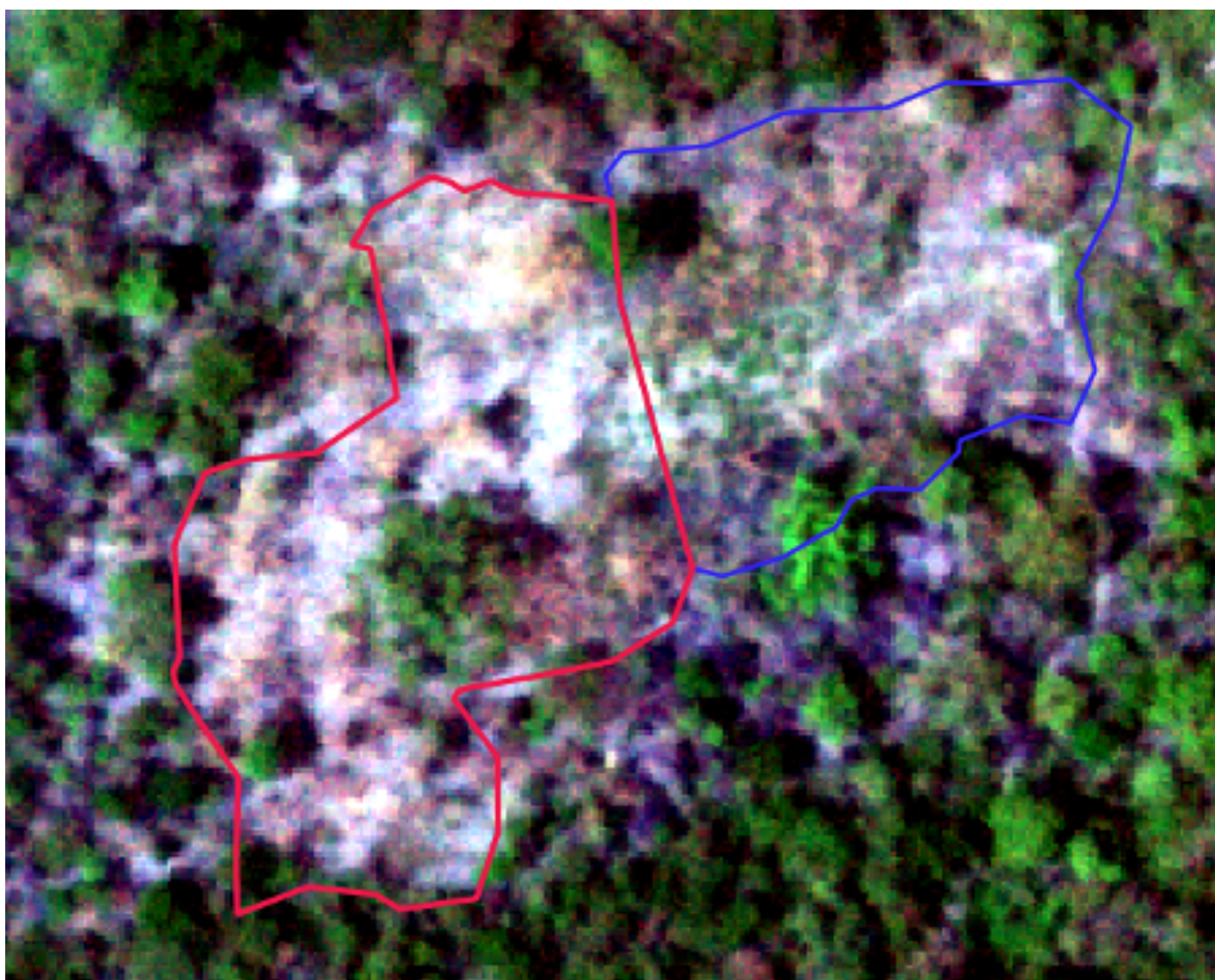


Figure I - 7 : Deux plantations d'Acacia, plantées en 2022 (contour rouge), et 2021 (contour bleu). Images prises par Skysat en mode stéréo en février 2023 à une résolution de 0,8 m. Village de Litiari, sous-préfecture Foubolo.



I.11 Estimation des stocks dans les principaux réservoirs de carbone des plantations agroforestières

Les stocks de carbone et la variation des stocks sont calculés sur la base de l'échantillon mesuré sur le terrain. Pour mieux définir la variabilité et surveiller l'évolution des plantations agroforestières, les observations par drone et par satellite sont incluses dans l'estimation de la variabilité et de la variation des stocks.

Pour calculer les stocks de carbone, tous les bassins sont additionnés et les incertitudes calculées en suivant les règles de propagation de l'incertitude. Le changement des stocks est ensuite calculé en mesurant la différence entre les stocks de carbone pour différents pas de temps. Là encore, les incertitudes doivent être propagées lors de l'estimation des incertitudes liées à la variation des stocks afin de dériver correctement l'incertitude finale. Le changement des stocks de carbone est ensuite utilisé pour calculer les facteurs d'émission et d'adsorption liés aux activités de plantation.

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la recherche de financement sur les marchés volontaires du carbone est une option possible pour développer les activités du projet. Dans ce cas, il faut définir un critère de performance de séquestration du carbone. Cette référence de performance est dérivée des méthodes de télédétection. Pour obtenir cette référence, le stock de carbone sur des parcelles similaires est estimé à l'aide de méthodes de télédétection. Ces parcelles servent de référence pour un scénario de base comme « business as usual ». À l'aide d'images satellites historiques, les stocks de carbone sur les parcelles sont comparés avant le début des activités du projet et pendant le projet. Ce suivi de l'évolution des stocks peut être mis en œuvre à l'aide des méthodes de télédétection décrites dans l'approche paysage (voir I.13), et peut être davantage vérifié et complété à l'aide des méthodes de télédétection développées pour le système MNV local.

I.12 Taille de l'échantillon et stratégie d'échantillonnage

I.12.1 Stratégie sur les parcelles agroforestières

L'objectif principal de l'échantillonnage de terrain est d'obtenir des données de haute qualité sur les stocks de carbone qui peuvent ensuite être extrapolées à tout l'ensemble des parcelles agroforestières. Les données d'échantillonnage sur le terrain sont en outre nécessaires pour estimer l'incertitude des différentes parties du bilan carbone à établir. Par conséquent, une stratégie d'échantillonnage statistiquement robuste doit être développée. D'un autre côté, la mise en œuvre d'une telle stratégie doit être équilibrée avec les besoins pratiques car le temps et le budget pour l'échantillonnage sont limités. La taille de l'échantillon doit être suffisamment grande pour atteindre une incertitude des estimations suffisamment faible pour que l'activité du projet démontre un gain net de carbone suffisamment important.

L'étude de pré faisabilité fournit une première estimation de la variabilité qui sera rencontrée dans les parcelles concernant la BA. Pour estimer la taille de l'échantillon nécessaire, la variabilité au sein de chacune des trois parcelles échantillonnées a été analysée. Un estimateur simple de la taille d'échantillon requise est résumée dans la formule suivante (à un intervalle de confiance de 95%) (Avery and Burkhart, 2015) :

$$n = \left[\frac{2 * CV}{A} \right]^2$$



Dans cette formule CV est le coefficient de variation (écart-type divisé par la moyenne en pourcentage), A est la précision attendue, exprimée en pourcentage, et n est la taille de l'échantillon.

En appliquant cette formule sur la base de l'échantillon de l'étude de préfaisabilité, on estime qu'un échantillon d'environ 50 arbres par parcelle devrait être suffisant pour estimer le DHP des arbres d'une parcelle avec une précision de $\pm 10\%$. Si une plus grande précision est requise (par exemple 5 %), l'échantillon de 100 arbres devrait être maintenu.

L'analyse de régression du DHP par rapport à la hauteur des arbres montre que les deux paramètres sont fortement corrélés ($r^2 = 0,72$) et qu'un modèle linéaire peut être utilisé pour estimer l'un à partir de l'autre. Il devrait donc être suffisant d'échantillonner la hauteur des arbres sur un plus petit nombre de parcelles, et ceci seulement pour un sous-ensemble d'arbres, afin d'avoir une base plus solide pour le modèle de régression. Si le DHP est principalement échantillonné sur le terrain, la régression entre le DHP et la hauteur est importante, car les paramètres de télédétection ne font que mesurer la hauteur.

En ce qui concerne les équations allométriques, il faut développer à la fois une équation pour la hauteur de l'arbre et une équation pour le DHP. Il n'est pas nécessaire de développer une équation incluant les deux paramètres puisque les deux sont fortement corrélés.

I.12.2 Stratégie pour obtenir un échantillon pour le calibrage des données au niveau de paysage

La stratégie d'échantillonnage pour la calibration des données du radar ALOS PALSAR-2 est différente. Ici, un échantillon de parcelles relativement homogènes d'une taille de 1 ha couvrant une gamme de densités BA doit être obtenu. Il n'est pas nécessaire que cet échantillon soit pris de manière aléatoire, mais il est important qu'il soit réparti sur une large gamme de densités de la BA comprises entre près de zéro et environ 100 t/ha.

Pour la sélection des sites, les cartes de densité BA non calibrées de 2021 sont utilisées avec des images satellites optiques récentes à haute résolution (p. ex. Google maps).

I.12.3 Echantillonnage des parcelles agroforestières

Afin d'obtenir un échantillon aussi représentatif que possible tout en minimisant les coûts d'échantillonnage, une approche stratifiée et en grappes (clusters) a été choisie (voir Figure I-8), qui devrait également garantir la faisabilité économique de l'acquisition d'images satellite haute résolution sur les parcelles.

Il a été noté que les parcelles agroforestières semblaient être regroupées dans l'espace, un schéma qui est peut-être lié à l'intensité des activités du projet dans la région ou à la disponibilité de terres appropriées et d'agriculteurs intéressés. Une analyse en grappes des parcelles a permis de regrouper les parcelles en grappes d'au moins trois parcelles. Plus de 90 % des parcelles peuvent être affectées à de tels groupes.



Pour sélectionner les parcelles de l'échantillon, on a d'abord choisi des grappes par un échantillon aléatoire stratifié de grappes. Les grappes ont été stratifiées en fonction de la zone (Nord, Centre, Sud) de la majorité des parcelles au sein des grappes (en fait, une seule grappe comportait des parcelles de deux zones différentes). Pour des raisons pratiques, les grappes ou clusters avec moins de dix parcelles et les clusters qui n'avaient pas de parcelles de trois ans d'âge ont été omis pour la planification de la mission.

Un échantillon a été tiré de manière aléatoire et stratifiée à partir des grappes sélectionnées. La stratification était basée sur l'âge (deux ou trois ans en 2023). Les parcelles d'une année d'âge ne sont pas échantillonnées car la contribution de la biomasse d'acacia est négligeable. Pour chaque grappe, deux parcelles âgées de deux ans et deux parcelles âgées de trois ans ont été échantillonnées en 2023, et les mêmes parcelles encore en 2024 et 2025.

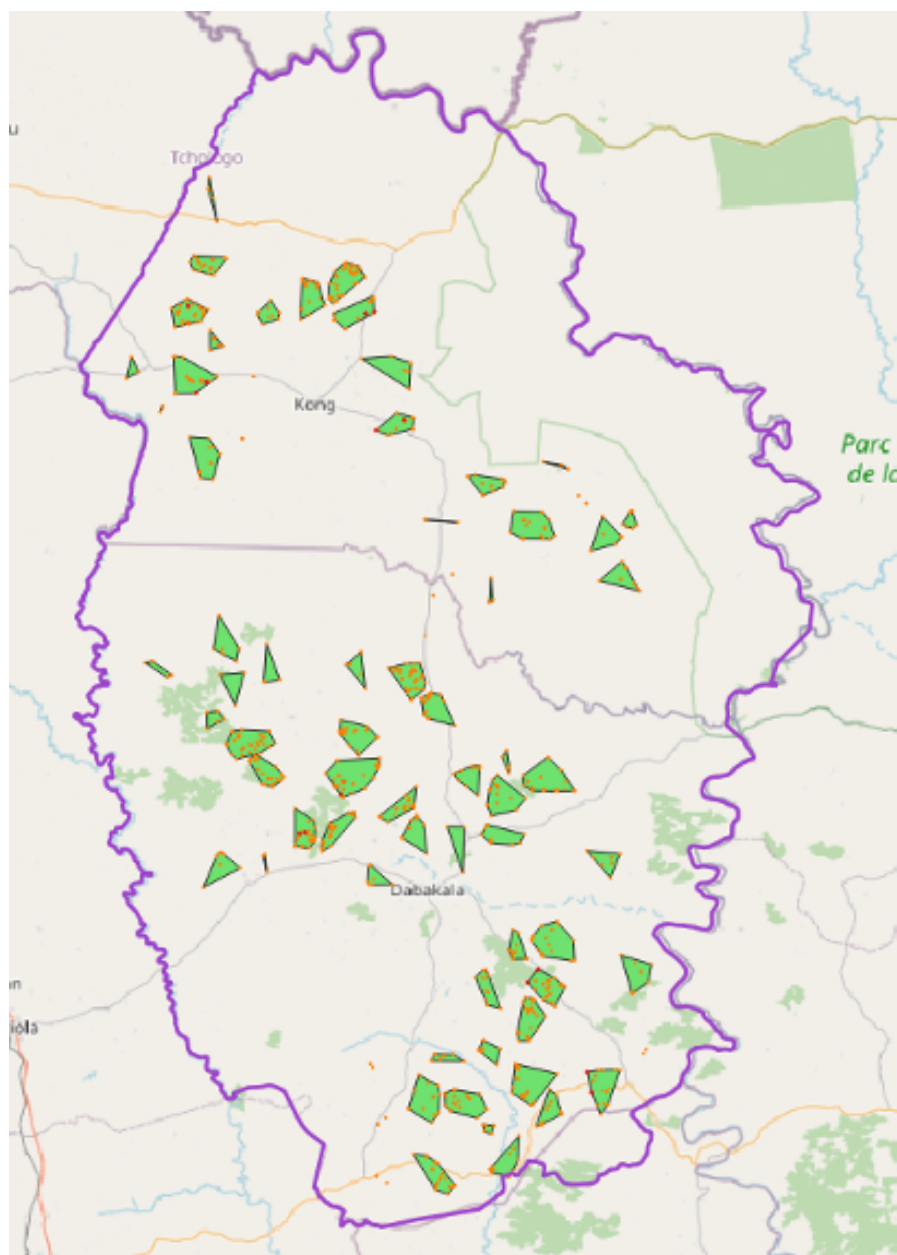


Figure I - 8 : Carte des grappes pour la sélection des parcelles à échantillonner dans la zone du projet.

Échelle 1:1 000 000. Vert : grappes d'échantillonnage ; Orange : parcelles agroforestières.



I.13 Cartographie du stock de carbone à l'aide du radar ALOS-2 au niveau du paysage

L'imagerie radar est obtenue à partir du capteur radar à synthèse d'ouverture en bande L à réseau phasé embarqué à bord du satellite avancé d'observation des terres de la JAXA (ALOS-PALSAR). La JAXA met à la disposition du public des mosaïques annuelles à une résolution de 25 m pour 2007-2010 (ALOS-1) et depuis 2015 (ALOS-2). La rétrodiffusion dans la bande L est connue pour être sensible à la densité de la biomasse ligneuse jusqu'à environ 75 Mg C / ha. Au-delà de ce seuil, le signal est saturé. Le produit mosaïque comprend des images obtenues tout au long de l'année (avril-décembre) et des corrections de terrain et radiométriques ont été appliquées. Les données numériques brutes sont converties en rétrodiffusion (rapport de la puissance renvoyée au capteur par rapport à l'énergie émise, exprimé sur l'échelle des décibels). Ils sont ensuite convertis en unités naturelles pour une analyse plus approfondie. Les images ont été filtrées pour réduire l'effet du chatoiement, un bruit de signal inhérent aux données radar.

A titre d'illustration, la Figure I - 9 montre une carte BA sur une partie de la zone d'étude.

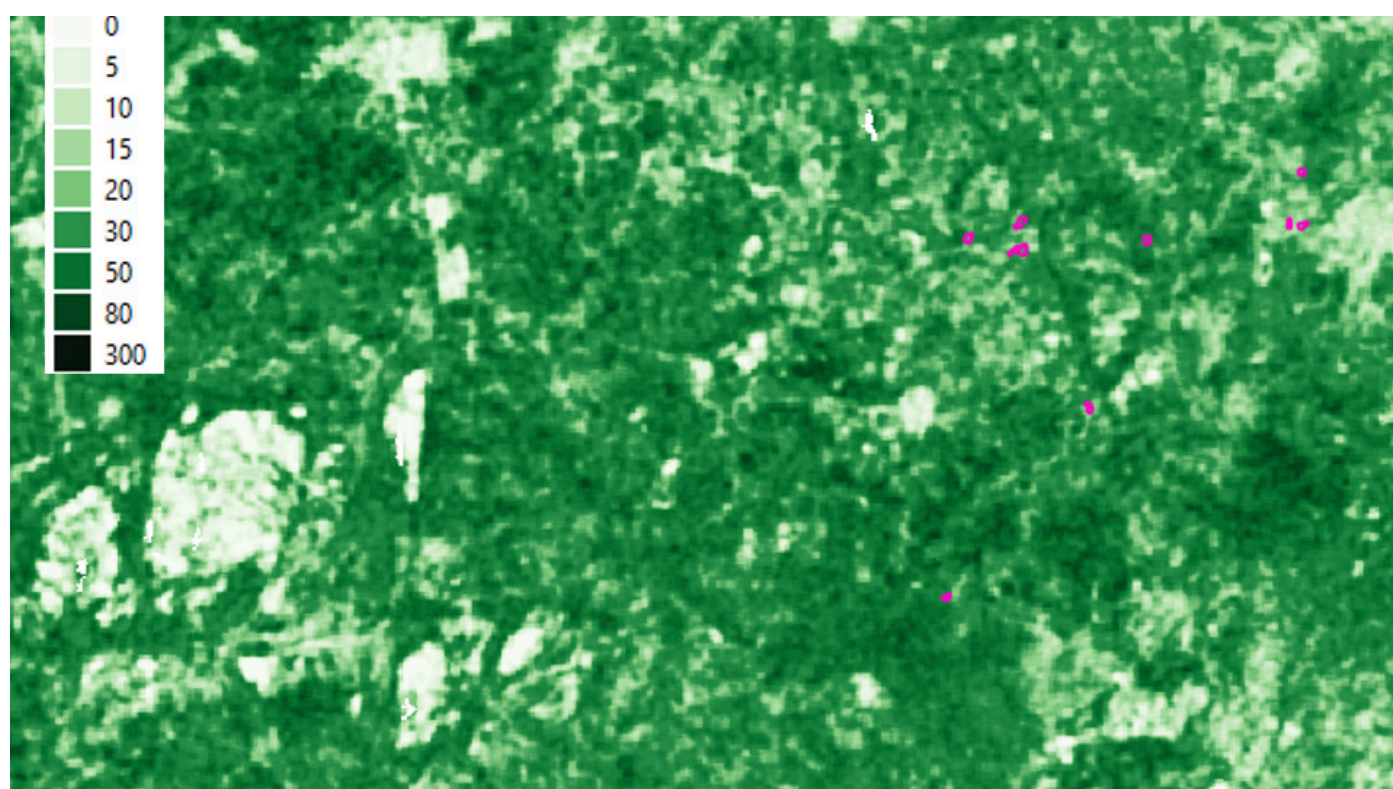


Figure I - 9 : Densité de la biomasse aérienne estimée à partir d'ALOS 2 PALSAR pour 2021 dans la zone du projet (Parcelles agroforestières aux contours magenta)

La Figure I - 10 montre la même zone superposée à une carte de changement, mettant en évidence les changements entre 2019 et 2021, avec la carte de densité BA en arrière-plan. Les changements sont calculés en appliquant des seuils de perte de biomasse.

Le traitement a été effectué à l'aide de la boîte à outils « biota »³. L'estimation de la BA est basée sur une corrélation entre la BA et la rétrodiffusion radar établie à partir d'échantillons de terrain en Afrique australe (McNicol et al. 2018). Il est recommandé de remplacer cette calibration par une calibration locale.

³ Disponible ici <https://github.com/smf-project/biota>

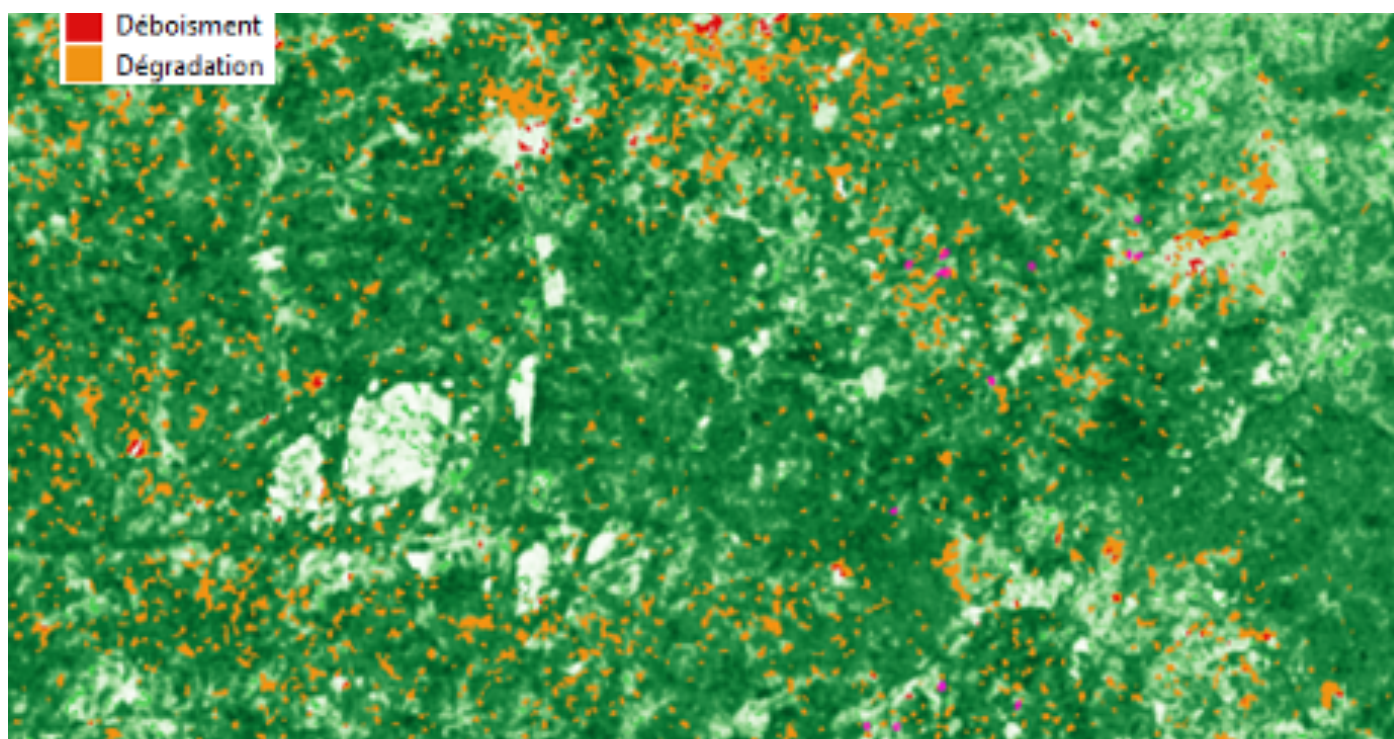


Figure I - 10 : Densité de biomasse ALOS 2 PALSAR 2021 pour la même zone avec les changements entre 2019 et 2021 détectés de manière automatique.

I.14 Suivi des données d'activité

La collecte des données décrite dans les chapitres précédents permet de calculer les facteurs d'émission (ou d'adsorption) du carbone. La collecte de données d'activité a un double objectif :

- Calculer les variations réelles du stock de carbone, avec les facteurs d'émission.
- Documenter les activités dans le système agroforestier (par exemple, pour éviter la déforestation non planifiée).

Pour chaque parcelle agroforestière, un certain nombre de données de base sont collectées et la parcelle est géoréférencée avec son périmètre capturé par un système de positionnement global (GPS) dans le système d'information géographique (SIG) (voir chapitre I.15). Les informations saisies à l'aide de cet ensemble de données sont présentées dans le Tableau I - 1.

Tableau I - 1: Attributs des parcelles de plantation

Nom de l'attribut	Description	Remarque
ID_Exploit	ID de la parcelle (unique)	
Année_pla	Année de plantation	
Zone	Zone géographique	Nord, Sud, Centre
Surface_ha	Surface en hectare	
Village	Village	
Code_Villa	Code du village	Code alphanumérique
sous_préfet	Sous-préfecture	
Département	Département	



Pour réussir à augmenter le stockage du carbone sur les parcelles agroforestières, il est important de minimiser les émissions lors de la préparation du site. En particulier, il est important d'éviter de couper les grands arbres sur la parcelle. L'élimination d'un nombre même restreint de grands arbres aura un impact négatif sur le bilan carbone d'une plantation d'acacias. Si un projet concernant l'acacia devait suivre les normes du marché volontaire du carbone, il est important de vérifier qu'il n'y a pas eu de déforestation sur la parcelle dix ou même vingt ans avant le début du projet. L'enlèvement des petits arbres de moins de 10 cm de diamètre tel qu'il est pratiqué sur la parcelle visitée n'influencera pas le budget carbone de manière significative.

Pour assurer un suivi adéquat des parcelles et une mise en œuvre réussie de la plantation, un certain nombre de visites sur le terrain sur la parcelle sont effectuées par les agences d'exécution :

1. Phase de validation : Avant d'inclure une parcelle dans le programme de plantation, la végétation préexistante est documentée lors d'une visite sur le terrain afin de s'assurer qu'il n'y a pas de déforestation non planifiée ou d'abattage d'arbres importants.
Des informations supplémentaires peuvent être obtenues à partir d'images satellites.
2. Phase de plantation : les visites suivantes sont effectuées au cours de cette phase :
 - a) Cartographie de la parcelle /1er visite de suivi ;
 - b) 2ème visite de suivi (2ème année) ;
 - c) 3ème visite de suivi (3ème année) ;
 - d) Visite avant la récolte ;
 - e) Visite après la récolte.

Au cours des visites, un certain nombre d'observations sont enregistrées (Tableau I - 2). Chaque visite est enregistrée avec la date de la visite.



Tableau I - 2 : Informations collectées sur les données d'activité lors des visites sur le terrain

Attribut	Phase
Date de chaque visite	
Commentaires/Observations	
Végétation précédente : Anacarde, cultures annuelles, bois, savane, ...	Validation
Prendre une photo de chaque coin de la parcelle (photo géoréférencé)	Validation
Nombre des arbres grands (dhp > 10 cm)	Validation
Estimation de la superficie de la parcelle	Validation
Type de parcelle proposée : plantation d'acacia (=jachère) ou reconversion d'ancien vergée d'anacarde	Validation
Identification unique de la parcelle, par exemple ID du producteur plus deux chiffres : 1542 01 ⁴	Validation
Biomasse enlevée avant plantation : Nombre et diamètre des arbres	Validation
Date de la plantation	Plantation
Mesure de la superficie d'Acacia plantée	Plantation
Haie vive espèce plantée	Plantation
Nombre et espèce des arbres acacia plantées	Plantation
Cultures agricoles utilisées année 1	Plantation (visite annuelle)
Cultures agricoles utilisées année 2	Plantation (visite annuelle)
Traitement d'engrais : Type d'engrais, quantité d'engrais	Plantation (visite annuelle)
Mortalité des arbres : - pourcentage, - cause	Plantation (visite annuelle)
Registrar la replantation des arbres mortes - Quantité par espèce de remplacement Date de remplacement	Plantation (visite annuelle)
Registrar la perte des autres arbres (quantifier des arbres non-acacia)	Plantation (visite annuelle)
Infestations (parasites, etc.)	Plantation (visite annuelle)
Quantité des arbres morts - acacia - non-acacia	Plantation (récolte)
Quantité des arbres récoltés - acacia - autres espèces Date	Plantation (récolte)
Quantités des arbres acacia et non-acacias plantées qui restent	Plantation (récolte)

⁴ Rechercher si les parcelles peuvent être identifiées par leur ID du cadastre foncier



I.15 Configuration et développement du système informatique MNV

Pour que le MNV soit un système vivant, il doit être soutenu par un système d'information. La tâche du système d'information est de stocker, traiter et mettre à disposition les données sous-jacentes du système MNV et d'aider à générer les rapports nécessaires. Le fait de conserver toutes les données dans un tel système d'information augmente également la transparence du système et favorise ainsi la vérification.

Les exigences du système stipulent qu'il doit s'agir d'un système local, axé sur l'agroforesterie. Le système doit également être extensible aux niveaux sous-nationaux ou nationaux et éventuellement à d'autres applications. Il doit être conforme à la législation et aux stratégies actuelles telles que les CDN. En outre, le système doit alimenter le système MNV national naissant géré par la DLCCTE.

Les types de données et les routines de traitement et de communication des données sont largement définis par les méthodes décrites dans les chapitres précédents.

La saisie, le traitement et l'utilisation des données seront effectués par différents acteurs, avec des compétences techniques, des besoins en informations et des ressources disponibles différents.

Un système basé sur le Web avec un nœud de traitement et de distribution des données plus centralisé a été proposé et développé, et un nombre - potentiellement important - d'utilisateurs qui pourront accéder au système, par exemple via un navigateur Web ou une application mobile.

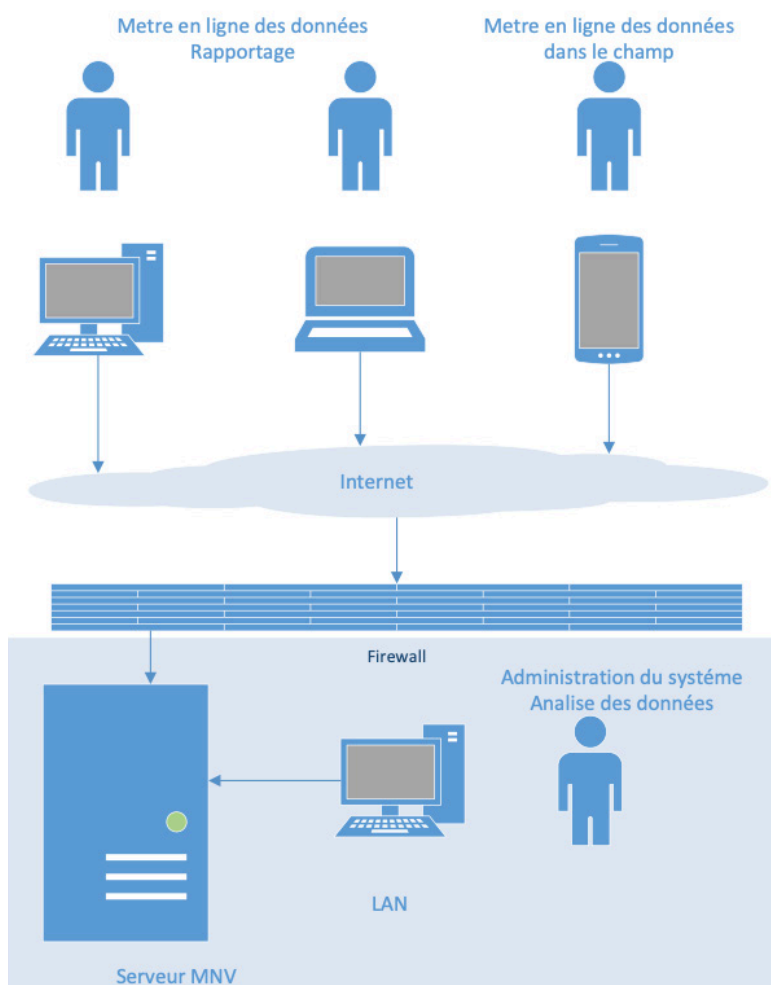


Figure I - 11 : Illustration de la configuration du réseau pour le MNV agroforestier de la Comoé



Les principaux éléments de ce système sont décrits en détail comme suit :

- Un système de base de données relationnelle à dimension spatiale stockant les données d'activité;
- Un système de stockage de données matricielles suffisamment grand (plusieurs To) pour stocker les images satellites (en partie temporelles);
- Des modules de téléchargement, de prétraitement et de traitement;
- Un serveur web;
- Un serveur de données géospatiales pour servir les données SIG sur le Web;
- Des services Web pour interagir avec le système, par exemple pour lancer des tâches de traitement;
- Des systèmes de sécurité, de cartographie web et d'interface utilisateur ;
- Une application web cliente ;
- Une application mobile cliente ;
- Un système SIG client et un logiciel d'analyse .

Ces éléments sont décrits plus en détail ci-dessous.

Un système de base de données relationnelle est un logiciel qui stocke et récupère systématiquement les données qui sont conservées dans une collection structurée (généralement des tables), qui ont des relations définies entre elles.

Ces systèmes de base de données ont des options pour stocker et gérer des données géographiques telles que les limites des parcelles.

Le système de base de données doit contenir toutes les données d'activité ainsi que des informations sur les facteurs d'émission. Le système doit s'assurer que ces données sont conservées sur un serveur central et qu'elles peuvent être utilisées par les utilisateurs locaux du système MNV.

Une partie des informations géospatiales qui alimentent le système MNV sont basées sur des données matricielles, c'est-à-dire des données qui sont stockées dans une grille régulière de valeurs, comme des images satellitaires ou de drones.

Certaines de ces données matricielles seront de nature temporaire, car, par exemple, les images satellites sont acquises et subissent une série d'étapes de prétraitement.

D'autres sont de nature permanente et seront mises à la disposition des utilisateurs sur le Web.

Les **données matricielles** ne seront pas stockées dans une base de données, mais celles qui sont servies sur le Web seront enregistrées dans la base de données, afin que le serveur de cartographie Web (décrit ci-dessous) sache comment les trouver.

Il faut donc prévoir un espace de stockage suffisant pour héberger les données matricielles temporaires et permanentes. Alors que pour le système MNV local, 2 à 5 To seront suffisants, un système MNV national avec des images satellites nécessitera beaucoup plus d'espace.

Les modules de téléchargement et de prétraitement se chargent des étapes de traitement automatisées ou semi-automatisées, notamment lors du traitement des données satellite, mais aussi lors du traitement des données de drones.



Souvent, des outils Open Source sont disponibles pour ces tâches. Mais pour garantir un flux de données gérable, ces outils doivent être connectés au système, et des scripts (petits programmes) doivent être écrits pour assurer cette connectivité.

Un **serveur géospatial** est un logiciel qui rend les données géospatiales disponibles sur Internet. Par exemple, si un utilisateur consulte une carte sur Internet, il y a généralement en arrière-plan un logiciel serveur qui fournit à l'utilisateur les données qu'il demande.

Les **services Web** sont un moyen normalisé de saisir des données ou d'interroger des données à partir d'un serveur Web. Ces services permettent à la fois une communication automatisée avec le serveur et la connexion de divers outils logiciels avec le serveur. Par exemple, un utilisateur avec une application mobile peut demander ou stocker des données à l'aide d'un service Web.

Un logiciel de **serveur Web général** est un logiciel qui sert les données fournies par les services web et le serveur géospatial.

L'utilisateur interagira avec le système à l'aide d'un système sécurisé, de **cartographie Web** et d'**interface utilisateur**. Ce composant permettra à l'utilisateur d'accéder aux données stockées dans le système (dans la base de données ou sous forme de données matricielles). Le système de sécurité contrôle qui a le droit d'accéder aux données, et quelles données un utilisateur autorisé peut voir, saisir, modifier ou supprimer.

Le composant cartographique permet l'affichage et l'interaction avec les données géographiques, c'est-à-dire l'affichage, la navigation sur une carte, la visualisation et la manipulation des données. Le composant général de l'interface utilisateur comprend tous les autres éléments (boutons, images, rapports, graphiques, etc.) avec lesquels l'utilisateur interagit.

Le client Web est l'endroit où s'affiche l'interface utilisateur. Aucun logiciel spécial n'est nécessaire, il suffit d'un navigateur normal tel que Chrome, Firefox, Edge. Le composant de l'interface utilisateur sera chargé depuis le serveur avec les données nécessaires.

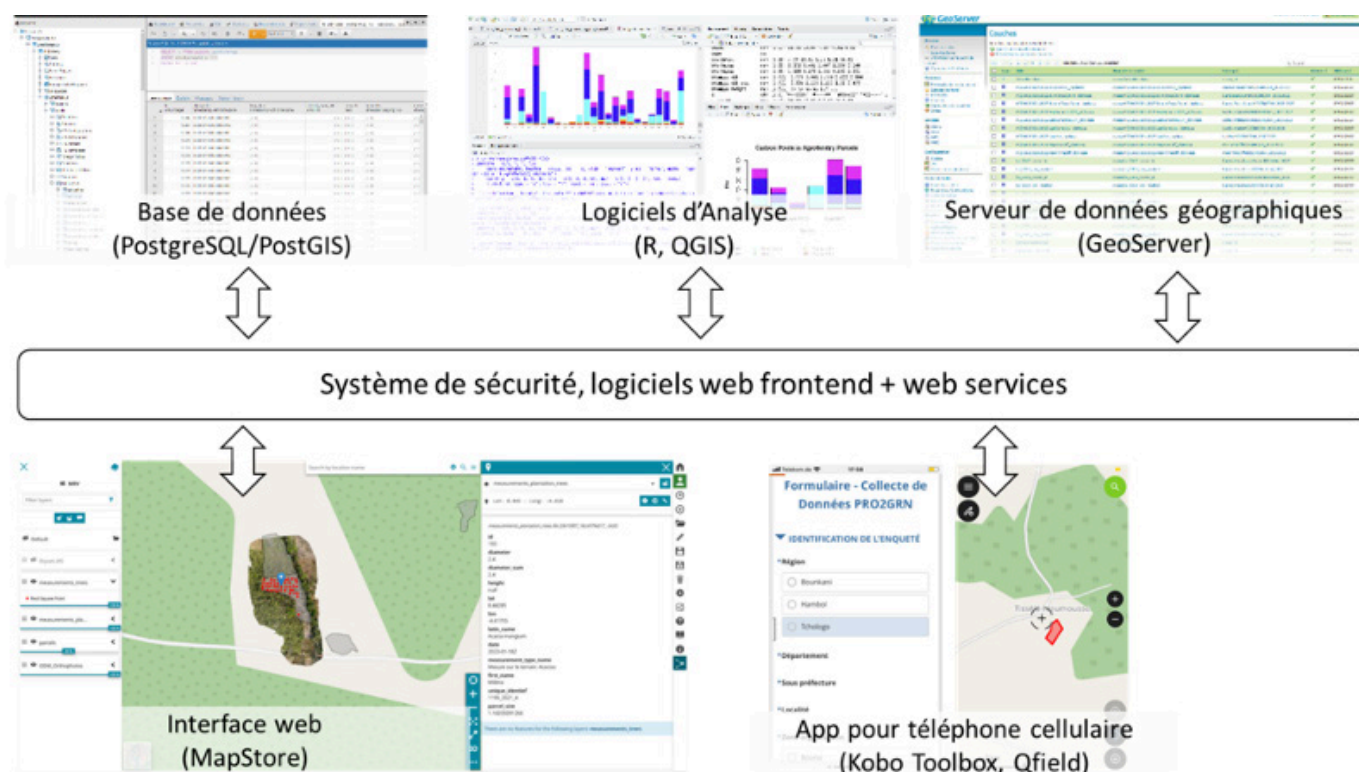


Figure I - 12 : Logiciels utilisés pour le stockage, l'affichage et l'analyse du MNV agroforestier.



Le client de l'application mobile accèdera également au serveur et chargera les données du serveur. L'application mobile est installée sur les téléphones portables dotés du système d'exploitation Android ou iOS, et elle permet de visualiser et de saisir les données hors ligne, notamment les données d'activité. Les utilisateurs peuvent ainsi accéder aux données parcellaires sur le terrain, saisir des observations, lier des photos à la parcelle, éventuellement numériser les limites des parcelles pour les nouvelles parcelles, etc.

Les utilisateurs experts souhaiteront peut-être accéder aux données du système en utilisant un client SIG (par exemple ArcGIS / QGIS). Ils accéderont directement aux données servies par le serveur de géo données et les utiliseront dans leur système SIG.

Un tel système permet une grande flexibilité et une intégration relativement facile de nouveaux composants et services. La plupart des composants décrits ci-dessus sont disponibles sous forme de logiciels libres et ouverts. Le système nécessite toutefois une certaine infrastructure, notamment :

- un serveur disposant d'une connexion rapide à l'Internet, et sécurisé par une technologie de pointe (pare-feu, etc.);
- un personnel qualifié pour l'exploitation (sécurité, mises à jour des logiciels, assistance en cas de problèmes, etc.).

Le système est basé sur la technologie Open Source. Figure I - 12 montre les outils logiciels utilisés pour les différentes parties du système (côté client et côté serveur). Grâce à l'utilisation de services Web, des outils analytiques comme QGIS et R peuvent être utilisés à la fois du côté client et du côté serveur.

I.16 Cadre institutionnel

I.16.1 Rôles et capacités institutionnels nécessaires pour le fonctionnement du système MNV local

Afin d'exploiter avec succès le système MNV agroforestier local, les données qui alimentent le système doivent être conservées et analysées en vue de l'établissement de rapports.

La saisie des données comprend des activités telles que :

1. Données d'activités :
 - L'enregistrement de nouvelles parcelles ;
 - La mise à jour des changements et des activités de gestion sur les parcelles.
2. Facteurs d'émission :
 - La saisie des données sur les stocks de carbone dans les différents bassins (mesures sur le terrain, données de télédétection, analyses en laboratoire...).

L'analyse des données se réfère à toutes les analyses nécessaires liées à l'établissement des rapports. Cela comprend les rapports destinés à des tiers, mais aussi une analyse du succès global des activités agroforestières qui est orientée vers la gestion et permet d'évaluer les activités de gestion passées et de soutenir la planification pour l'avenir. Les données collectées dans le cadre du système MNV sont une source d'information importante pour prendre des décisions de gestion qui peuvent également aller au-delà de l'objectif principal de l'évaluation du stock de carbone et de la variation du stock.

Les objectifs du projet agroforestier stipulent que le système MNV doit être formellement ancré au niveau local. Dans le même temps, le système doit assurer l'intégration avec les activités au niveau national, en particulier en ce qui concerne les rapports sur les CDN et le potentiel de mise à l'échelle.



Au niveau local, la saisie des données d'activité sera l'une des principales tâches des partenaires de mise en œuvre. La mesure des stocks de carbone dans les parcelles agroforestières en conformité avec les obligations de rapport est une autre tâche clé qui devrait être accomplie au niveau local. Idéalement, ces activités devraient être réalisées par les mêmes experts ou les mêmes institutions. Afin d'assurer un contact permanent avec les agriculteurs qui mettent en œuvre le projet, les forestiers et les ingénieurs agricoles ayant la possibilité de fournir des services de vulgarisation seraient qualifiés pour cette tâche.

1.16.2 Acteurs au sein du système MNV agroforestier

Le système MNV local doit être ancré au niveau national afin de garantir la compatibilité des approches et des interfaces de notification au niveau national. L'intégration correcte entre le niveau local et le niveau national détermine également les possibilités de déployer un système similaire à d'autres applications (par exemple différents systèmes agroforestiers) et à d'autres régions.

Dans le cadre de l'atelier de lancement du système MNV local à Dabakala en novembre 2022 et lors des réunions ultérieures, des acteurs potentiels au sein du système MNV agroforestier ont été identifiés. Une liste d'une quinzaine de principaux acteurs et institutions qui pourraient être concernés par le système MNV Agroforesterie Comoé, a été définie par les participants de l'atelier de lancement.

Il ressort donc de cette analyse, qu'ils existent au niveau local, des structures spécialisées dans la collecte des données en l'occurrence le ministère en charge de l'agriculture (MEMINADERPV) à travers le Chef de Zone de l'Agence Nationale d'Appui au Développement Rural (ANADER), le Ministère des Eaux et Forêts (MINEF). Toutes les données collectées pourraient être récupérées par la Direction Régionale du ministère en charge de l'environnement (MINEDDTE), qui les transmettrait à la Direction de la Lutte contre les Changements Climatiques et de la Transition Ecologique (DLCCTE) pour le traitement, la compilation et la validation des données.

Suite à l'atelier de lancement, les premiers entretiens avec les partenaires institutionnels potentiels ont eu lieu et il a été convenu d'impliquer particulièrement les partenaires locaux dès le début. Ainsi, l'ANADER, le MINEDDTE-DR, et le MINEF-DR ont participé activement aux formations et aux campagnes d'échantillonnage pour déterminer les stocks de carbone des parcelles agroforestières et des autres utilisations des terres. Une fois les documents conceptuels finalisés, des discussions approfondies ont eu lieu entre les différentes institutions impliquées dans le développement du système MNV, sous le pilotage de la DLCCTE.

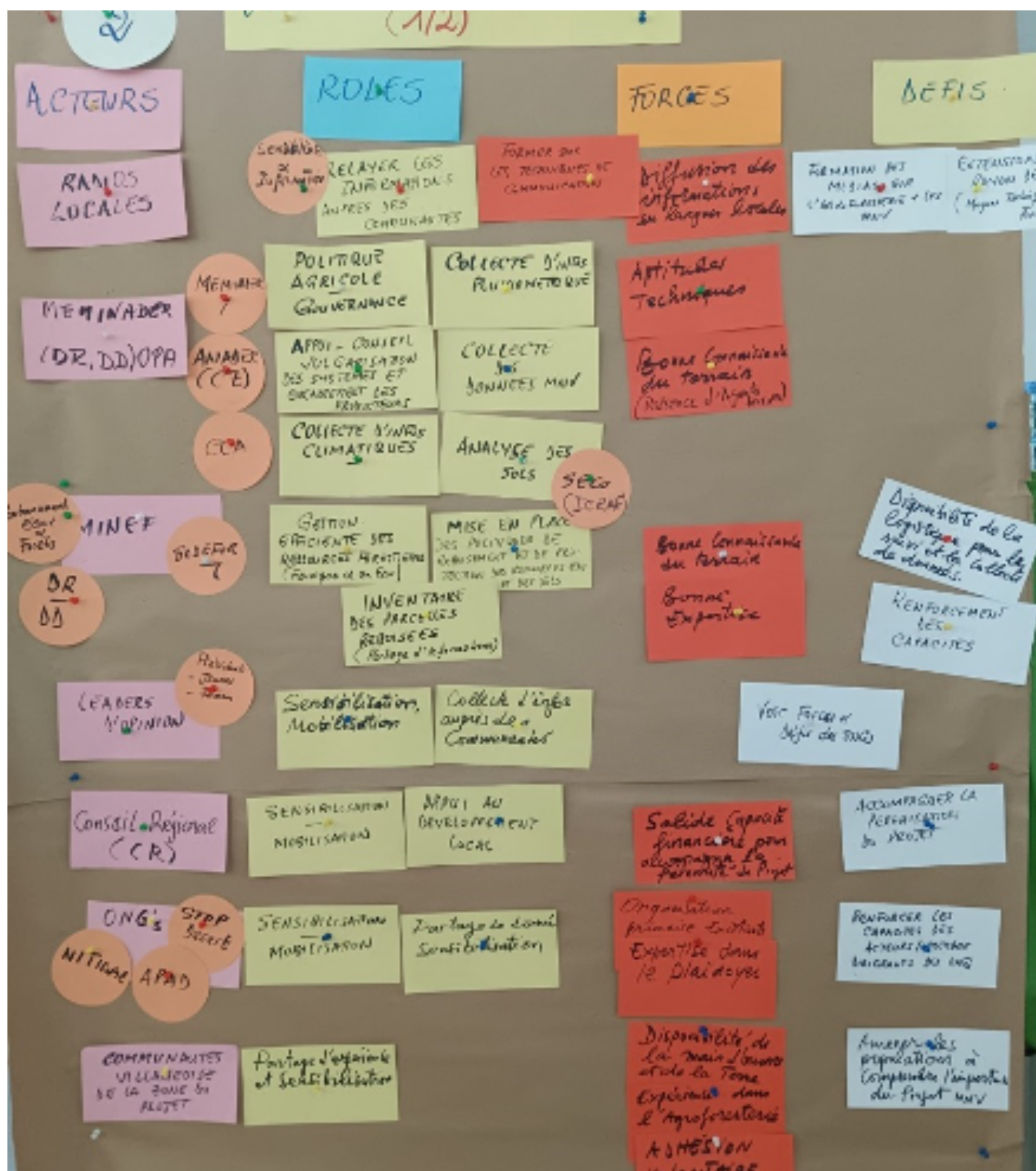


Figure I -13 : Acteurs et rôles définis dans l'atelier de lancement, Dabakala, 2022 (Processus MNV, 1/2)



À la fin de cette phase, le projet de rapport sur les dispositions institutionnelles a été diffusé parmi les parties prenantes pour commencer à construire une vue d'ensemble de la structure institutionnelle proposée. Cette vue d'ensemble a été complétée lors d'un atelier d'une journée sur les dispositions institutionnelles le 4 octobre 2023 et le 18 janvier 2024.

Le Tableau I - 3 résume les principales responsabilités proposées par les participants à l'atelier sur la base des discussions et des échanges en amont de l'atelier et des discussions de groupe lors de l'atelier. La Figure I - 14 plus bas illustre les rôles des acteurs du système et le flux de données.

Tableau I - 3 : Les principales responsabilités pour le fonctionnement du système MNV proposées par les institutions locales et nationales concernées

Domaines d'intervention	Tâches	Acteurs	Observations
Service d'extension	Capture des données initiales d'enregistrement d'une parcelle, capture des données d'activité	- MEMINADERPV – DD KONG & DABAKALA - Ministère des eaux et forêts (MINEF), cantonnements Dabakala et Kong - ANADER, zone Dabakala - ANADER, zone Ferkessédougou	Travail de terrain tel que proposé dans le flux des données
Cartographie des parcelles	Cartographie des parcelles agroforestières sur le terrain	- ANADER zone Dabakala - ANADER zone Ferkessédougou - CIGN (BNETD)	Travail de terrain
Equipe de mesure sur le terrain	Inventaire des stocks du carbone sur un échantillon des parcelles	- Ministère des eaux et forêts (MINEF), cantonnements Dabakala et Kong - MINEDDTE (DR Tchologo & DR Hambol) - ANADER zone Dabakala - ANADER zone Ferkessédougou - Main d'œuvre locale	Travail de terrain
Rapporteur	Transmettre de manière semi-automatique les données contrôlées à la DLCCTE & à SEP-REDD+ S'assurer de la qualité des données saisies Soutenir ANADER & MINEF dans la mise à jour périodique des données d'échantillonnage & d'allométrie des stocks de carbone	- DLCCTE - MINEDDTE (DR Tchologo & DR Hambol)	
Laboratoire d'analyse	Analyse des échantillons (sol, litière, densité de bios)	Laboratoire	Prestataire de service



Pilote de drones	Vol de drones pour la mesure des stocks de carbone	Pilotes drones	Prestataire de service (CURAT (UFHB))
Acquisition et traitement des images de drones et satellitaires	Traitement d'images satellites à haute résolution pour l'évaluation des stocks de carbone. Traitement des données des drones pour l'évaluation des stocks de carbone. Traitement des données ALOS PALSAR pour l'évaluation des stocks de carbone & des variations des stocks (en option)	- ANADER (siège) - CIGN (BNETD) - CURAT (UFHB)	Contrat de prestation de service
Administration du système	Assurer la sécurité du fonctionnement et l'accessibilité du serveur MNV	- DLCCTE / ANSUT	
Analyse des données	S'assurer de la qualité des données saisies (contrôle, comparaison avec les images satellitaires) Recevoir & examiner les données dont la qualité a déjà été contrôlée par la MINEDDTE-DR Effectuer des contrôles (éventuellement automatique) du caractère plausible & de la cohérence avec les images satellitaires disponibles	- DLCCTE - SEP-REDD+ - Prestataires divers	



Le fonctionnement du MNV Agroforesterie au niveau local comprend la saisie des données d'activité et l'évaluation des stocks de carbone sur le terrain. Les acteurs au niveau local sont marqués en rouge dans la Figure I-14.

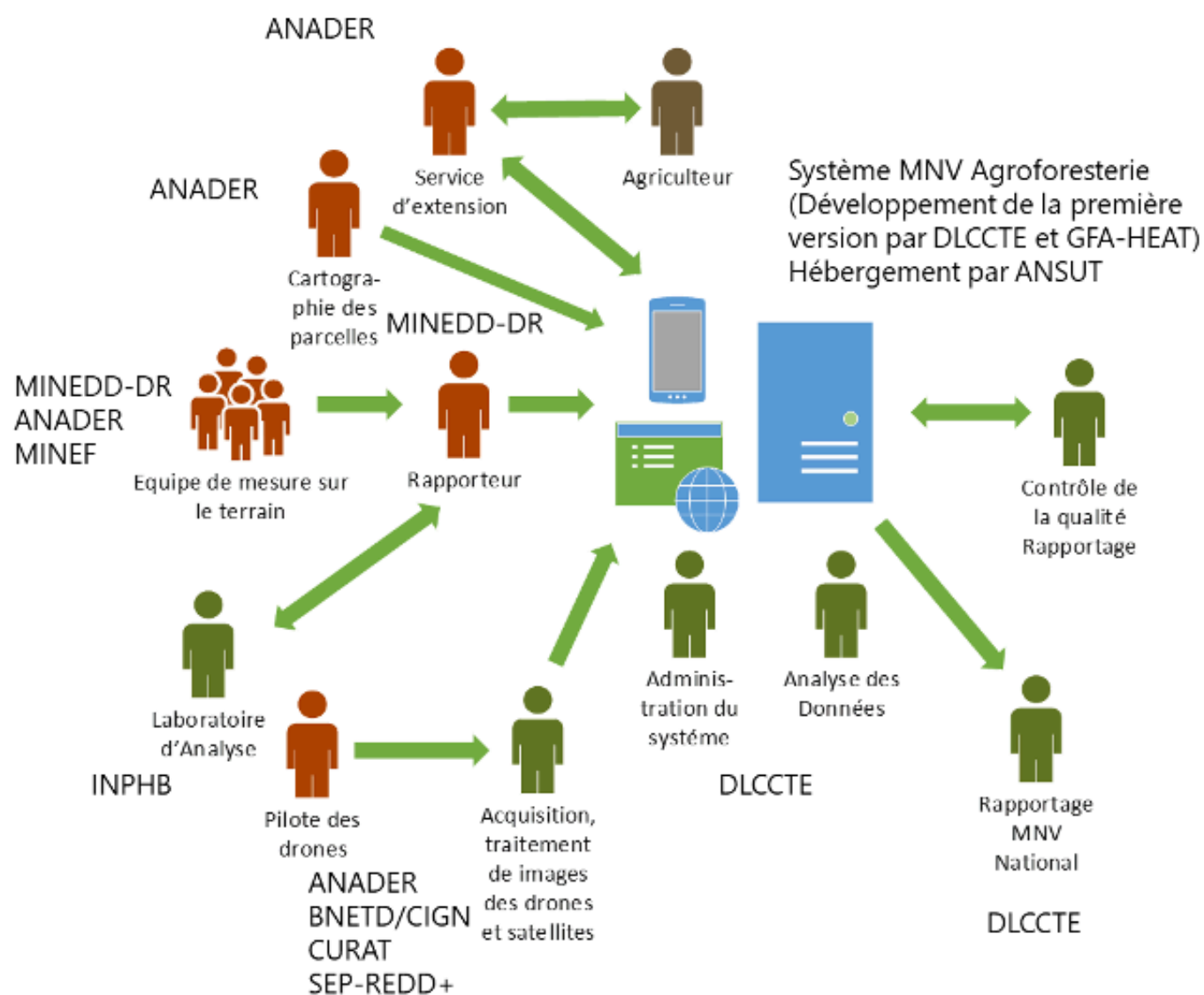


Figure I - 14 : Acteurs du système MNV et Flux des données proposés
En rouge : travail principalement sur le terrain. En vert : travail principalement au bureau



I.17 Résumé et perspectives

La conception du système MNV agroforestier local contient les principaux éléments suivants :

- Des méthodes de comptabilisation du carbone au niveau du projet agroforesterie, y compris un système permettant d'obtenir des mesures du stock de carbone grâce à une combinaison de technologies de terrain et de télédétection.
- Des spécifications préliminaires pour les données d'activité qui comprennent les principales informations de gestion à saisir dans le système pour calculer les variations des stocks.
- Un projet de description du système d'information nécessaire pour saisir, stocker, analyser et distribuer les données du système MNV.
- Une description générale du cadre institutionnel nécessaire pour rendre le système MNV opérationnel.

Un premier aperçu des stocks de carbone a pu être obtenu et les principaux partenaires locaux ont été initiés aux principales techniques de terrain pour l'inventaire des stocks de carbone et des forêts lors de l'étude de faisabilité.

La formation et l'intégration des partenaires garantissent que le système MNV est aligné sur les capacités et les structures locales, et que les partenaires sont bien préparés à prendre la direction du système.

Il est nécessaire qu'avant la récolte et la fin du premier cycle d'acacias, au minimum un deuxième inventaire soit effectué. Il est recommandé d'effectuer un échantillonnage supplémentaire avant la récolte de la cinquième année et après la récolte la sixième année. Il serait important d'obtenir des mises à jour annuelles de certaines mesures d'activités et caractéristiques, comme la culture plantée, l'engrais appliqué, la mortalité des arbres.

Outre l'analyse des flux de carbone associés à l'approche agroforestière, les données obtenues par le biais du système MNV peuvent fournir des informations supplémentaires qui peuvent être utilisées pour améliorer la composante agroforestière elle-même et ainsi préparer la mise à l'échelle de l'approche. A cet effet, il est suggéré de faire des modifications pour répondre aux exigences des standards internationaux, afin d'augmenter l'éligibilité d'un futur projet pour les CDN et pour le marché carbone. Par exemple, effectuer un suivi et évaluation régulier des activités et impacts du projet, remplacer les espèces allochtones, potentiellement invasives (Koutika and Richardson, 2019), par des espèces autochtones pour s'aligner avec les règles de bonne gouvernance (« do no harm ») et les sauvegardes des standards et conventions internationaux. Il s'agira aussi d'ajouter un mélange avec des espèces additionnelles pour augmenter la résilience écologique et les bénéfices pour la population rurale et de garder une partie des arbres sur un long terme, nécessaire à une séquestration réelle du carbone.

SECTION II

ÉVALUATION DE LA BIOMASSE EN SYSTÈMES AGROFORESTIERS D'ACACIA

MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 1

AUTEURS :

**Prof. Gerald Kapp - Gernot Ruecker - Dr. Milène Koutouan-Kontchoi
Dirk Kloss- Brice Nehoun -Antoine Tano Kouakou Servais**





SECTION II: ÉVALUATION DE LA BIOMASSE EN SYSTEMES AGROFORESTIERS D'ACACIA MANUEL D'UTILISATEUR - VOLUME 1

II.1 À propos de ce volume

Ce volume est la première partie du manuel de l'utilisateur qui adresse les méthodes MNV pour les systèmes agroforestiers dans les départements de Dabakala et Kong. Il décrit les méthodes de terrain et les équations permettant d'estimer le contenu en carbone des plantations agroforestières, plus spécifiquement le carbone des boisements jeunes d'*Acacia auriculiformis*, *Acacia mangium* et les hybrides entre les deux espèces. Ces mesures de carbone, répétées dans les années suivantes, vont permettre d'estimer la séquestration du CO₂, le gaz principal à effet de serre.

Ce manuel aussi comprend des procédures pour l'élaboration d'équations allométriques permettant d'estimer la biomasse des jeunes Acacias. Les équations allométriques pour les arbres âgés de trois ans maximum, dont le DHP est inférieur à 10 cm, sont actuellement (début 2024) disponibles. Pour le calcul de la biomasse des arbres plus âgés avec les diamètres à Hauteur de Poitrine (DHP) à partir de 10 cm, il faut répéter les dissections de quelques arbres et élaborer des propres algorithmes (voir chapitre II-6), ou chercher si on trouve un algorithme approprié dans la littérature⁵.

En supplément des méthodologies existantes, l'élaboration des méthodes décrites en bas était nécessaire à cause de deux difficultés : La première était que les méthodes existantes (voir par ex. Walker et al, 2012, Pearson et al, 2005, Hewson et al, 2014) comprennent seulement des arbres d'un diamètre DHP d'au moins de 10 cm et nos arbres des parcelles commençaient avec des diamètres de 3 cm. La deuxième difficulté était même dans la base de données mondiales des équations allométriques Globalometree on n'a pas trouvé des algorithmes appropriés pour *Acacia auriculiformis* qui relient les petites diamètres DHP ou la hauteur des arbres avec la biomasse aérienne des arbres. Une bonne base d'information pour le système MNV est contenue dans les publications du GIEC (IPCC 2006 et IPCC 2003) et FAO, SEP-REDD+ (2017).

Finalement, ce volume aussi couvre le processus d'enregistrement d'une parcelle agroforestière et la saisie des données nécessaires pour rendre compte des activités (plantation, récolte, perturbations) sur le terrain.

Ensuite les techniques de mesures et de calculs de tous les bassins de carbone dans les parcelles échantillonnées sont décrites en détail.

⁵ (p.ex. Globalallometree, <http://globalallometree.org>).



II.2 Description des méthodes d'échantillonnage

Sept (07) bassins de carbone ont été identifiés pour les mesures sur les parcelles agroforestières. Pour chaque bassin, une méthode d'échantillonnage spécifique, dénommée aussi procédures opérationnelles standard (POS), est décrite en détail.

- 1) Végétation arborescente de la plantation d'acacia (biomasse aérienne et souterraine)
- 2) Végétation arborescente associée (biomasse aérienne et souterraine)
- 3) Végétation non-arborescente
- 4) Bois mort debout
- 5) Bois mort couché
- 6) Litière
- 7) Carbone organique du sol

Les équations pour calculer le carbone basé sur l'échantillonnage des sept bassins sont expliquées dans le chapitre II.3.

Comme assurance de qualité des données un Contrôle Qualité / Assurance Qualité (CQ/AQ) doit être organisée sur 8% de l'ensemble des unités d'échantillonnage (FAO, SEP-REDD+ 2017) soit 1 parcelle pour 12 parcelles relevées). Dans les parcelles de contrôle une répétition des échantillons des 7 bassins et de l'installation sur la parcelle, doivent être réparties entre deux équipes mixtes de contrôle (ANADER, DR MINEDDTE, Universités ou centres de recherches ou consultants ou organisation de la société civile). Dans chaque parcelle, les informations relevées doivent être collectées et comparées avec l'échantillonnage original dans une période de moins que 2 mois après l'échantillonnage original. Chaque échantillon où le contrôle montre une déviation par rapport à l'échantillon original de $\geq 10\%$ doit être répété.



II.2.1 Végétation arborescente de la plantation d'acacia

Pour échantillonner les arbres d'acacia, des transects espacés de 12 m ont été tracés le long d'un côté de la parcelle, après avoir écarté un bord de 10 m pour éviter des effets de bordure sur la croissance des arbres. Les transects sont établis approximativement perpendiculaires du côté sélectionné. Le long de chaque transect, des points de mesure sont établis à un espacement de 12 m (Figure II-1). Pour chaque point de mesure, l'arbre situé à côté du point de mesure est mesuré. La mesure inclut l'espèce et le diamètre à la hauteur poitrine (DHP). Le DHP est mesuré avec un ruban mètre, un ruban à diamètre ou un compas forestier Figure II - 2. De chaque cinquième arbre, la hauteur totale des arbres jusqu'au bout du rameau le plus haut est mesurée et enregistrée.

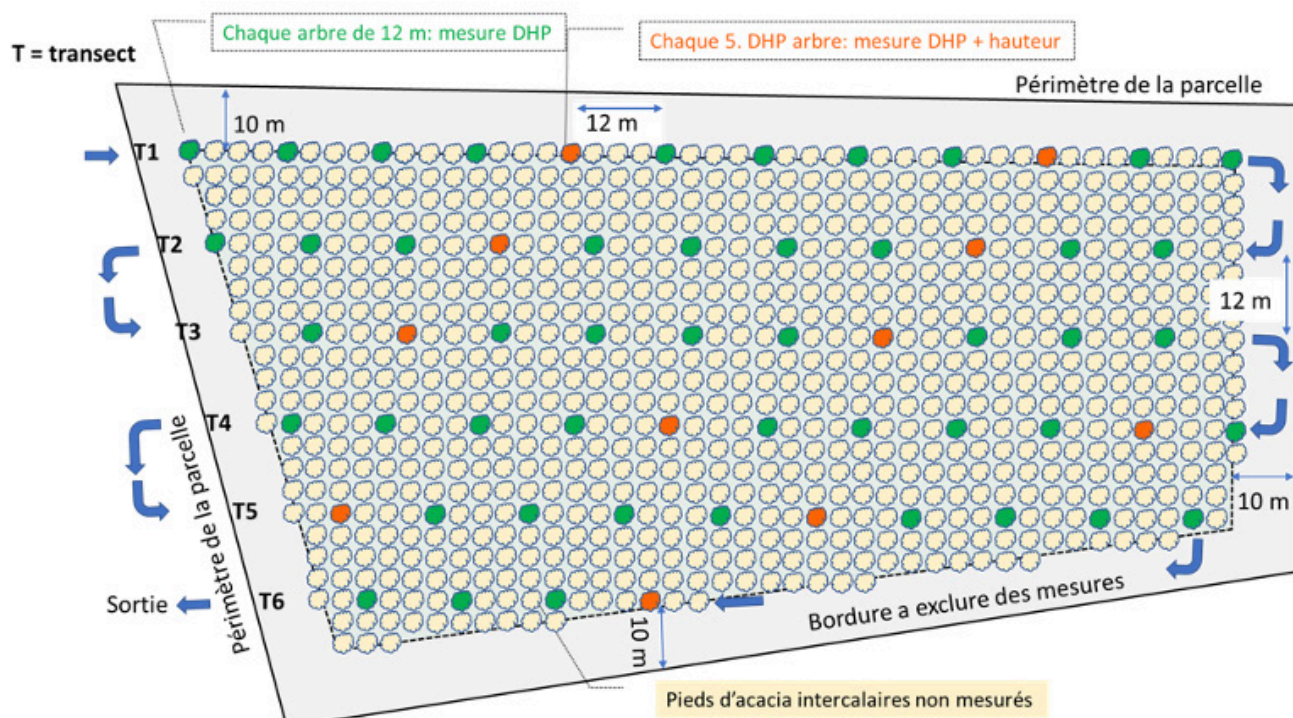


Figure II - 1 : Croquis de la mesure de hauteur (H) et DHP des Acacias plantés dans la parcelle



Figure II - 2 : Mesure de diamètre à hauteur de poitrine.



Pour mesurer la hauteur des petits arbres on peut utiliser une barre fabriquée avec des tubes métalliques, graduée au centimètre ou une barre télescopique forestière ou fabriquée soi-même avec des tubes de PVC intercalés (Figure II - 3). Une liste des instruments d'équipement se trouve en section II.8.2.



Figure II - 3 : Mesure de la hauteur de l'arbre avec une barre fabriquée avec des tubes métalliques ou de PVC



Figure II - 4 : Utilisation d'un dendromètre à rayon de laser pour mesurer la hauteur des acacias

Pour les grands arbres, des dendromètres mécaniques ou électroniques, permettent de mesurer la hauteur (Figure II - 4). Un exemple des instructions pour utiliser un dendromètre est donné en section II.8.4. Le calcul de la hauteur de l'arbre à partir des mesures de distance et d'angle est illustré dans la Figure II - 5. Normalement, les dendromètres effectuent ce calcul pour vous. Si l'on ne dispose que d'un clinomètre (pour mesurer les angles), on peut utiliser les formules trigonométriques fournies.

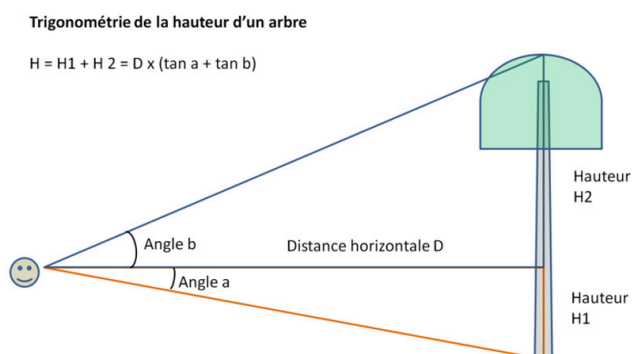


Figure II - 5 : Croquis de la trigonométrie de la hauteur d'un arbre



Dans le terrain de plain-pied, on peut simplement calculer $H = \text{Niveau des yeux} + D \times \tan b$.
Finalement, les données sont notées dans le formulaire suivant :

Tableau II - 1 : Fiche de collecte de données de diamètre (DHP) et hauteur totale (H) des arbres

BASSIN DE CARBONE 1	
Mesure de Hauteur (H) et Diamètre (DHP) des Acacias	
Date	
Zone (Département)	
Lieu (village)	
Personne ressource (Animateur GIZ)	
Nom du producteur	
Type de parcelle (Année, âge)	
Numéro de parcelle	
Superficie parcelle :	
Observations	

Preneur de notes
Noms des membres de l'équipe

N° transect	N° plante	GPS (Lat)	GPS (Lon)	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Espèce	Observations

..... /

Pour déterminer le nombre d'arbres d'acacia par hectare (si le nombre d'acacias sur la parcelle est inconnu), il faut compter le nombre d'arbre dans une bande de 100 m de longueur et 10 m de largeur, choisi avec une direction aléatoire d'une boussole et le multiplier par dix.



II.2.2 Végétation arborescente associée

La végétation arborescente associée est généralement constituée d'arbres fruitiers tels que *Parkia biglobosa* R. Br. ex G. Don. (Fabaceae) et autres espèces indigènes de bois d'œuvre telles que *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (Malvaceae) présents sur la parcelle d'échantillonnage, dont la hauteur minimale est de 1,3 m. Par hectare, sur un transect de 100 m x 10 m, l'espèce, le DHP et la hauteur totale de ces arbres sont enregistrés (Figure II - 6). La hauteur totale d'un arbre est définie comme la hauteur en mètres (avec une décimale) du sol jusqu'au bout de la branche la plus haute.

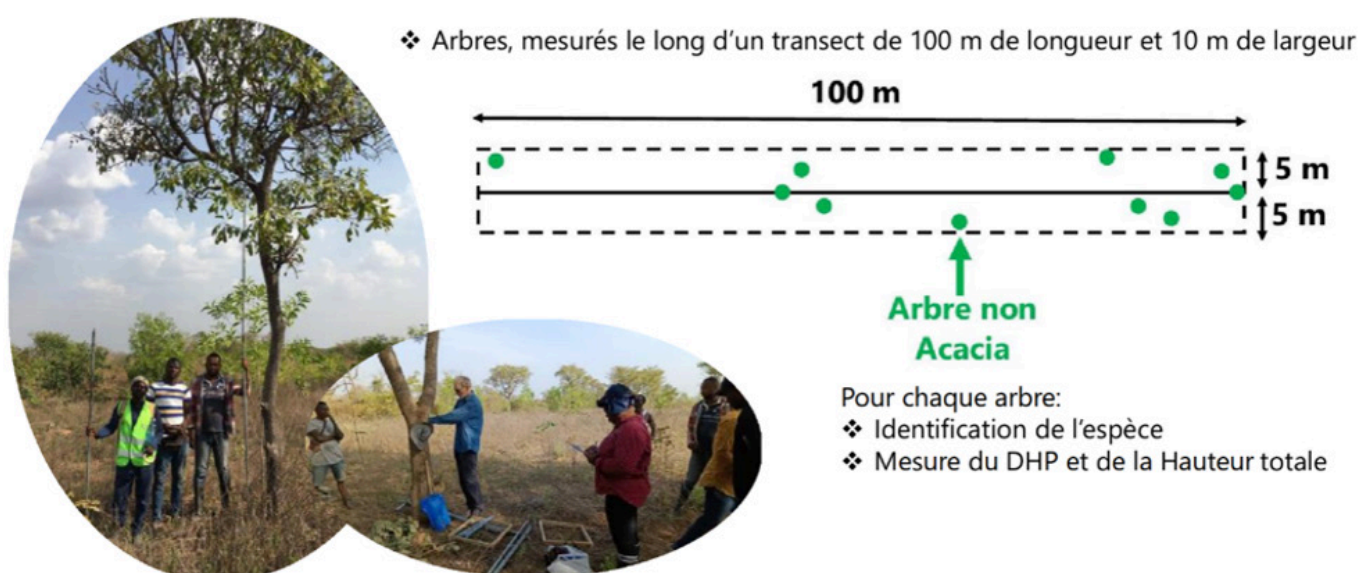


Figure II - 6 : Mesure de la hauteur totale (gauche), du DHP (centre) et un croquis du transect de mesure des arbres associés (droite).

Le Contrôle de Qualité/Assurance Qualité (CQ/AQ) est le même que pour la végétation arborescente de la plantation d'acacia chapitre II.2.2.



II.2.3 Végétation non-arborescente

La végétation non-arborescente aérienne se compose de toutes les plantes herbeuses ou plantes ligneuses ayant une hauteur de moins de 1,3 m. Cette végétation est échantillonnée en utilisant un cadre d'échantillonnage de 120 * 120 cm aux 5 endroits où sont aussi échantillonnés la litière et le sol (Figure II - 7, Figure II - 8).

Toute végétation comme définie, qui poussent à l'intérieur des superficies de 1,44 m², c'est-à-dire, dont la base des brins ou tiges est à l'intérieur, sont coupés et pesés. S'il y a beaucoup de biomasse, un sous-échantillonnage de 100-300 g (dépendant de la biomasse totale) est pesé et mis dans un sachet plastique. Pour économiser les frais, on doit préparer et peser un sous-échantillonnage des 5 échantillons de 100-300 g en mélangeant les biomasses obtenues. Ce sous-échantillon est envoyé au laboratoire pour déterminer le poids sec, c'est-à-dire le poids sans humidité.

Comme CQ/AQ les balances doivent être calibrées chaque jour avec des poids étalonnés.



Figure II - 7 : Pose du cadre de 120x120 cm pour collecter en sachet la végétation non-arborescente



Figure II - 8 : Coupe de toute végétation aérienne dans le cadre



II.2.4 Bois mort debout

Par hectare, sur un transect de 100 m x 10 m aléatoirement défini (Figure II 9), tous les bois morts debout d'un DHP ≥ 10 cm sont relevés en deux classes distinctes, leur diamètre de base (à 10 cm hauteur) et leur DHP et hauteur. Pour les arbres dont il ne reste que la souche, la hauteur de la souche est mesurée. Si la souche est plus basse que 1,3 m, le diamètre de la souche est mesuré au point le plus haut.

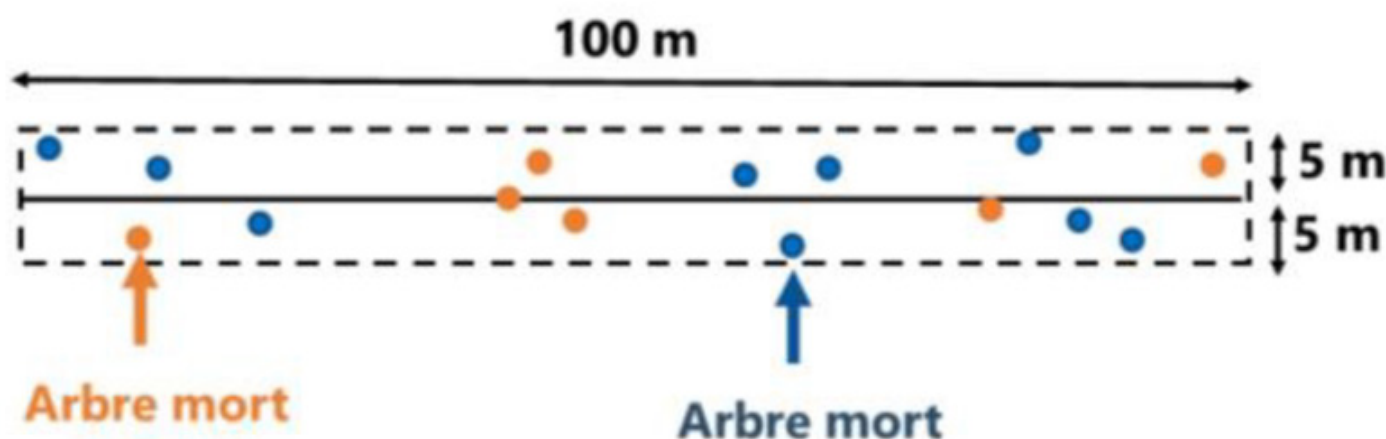


Figure II - 9 : Croquis du transect de mesure du bois mort aérien (orange = classe 1, bleu = classe 2)

De chaque côté de la ligne axiale du transect, les arbres morts debouts situés jusqu'à une distance de cinq mètres de la ligne font l'objet de ces mesures (Figure II - 9).

La classe de bois mort est également enregistrée. Les deux classes sont définies comme suit :

Classe 1 : arbres morts avec la plupart de ses branches (y compris les petites branches) conservées

Classe 2 : tous les autres arbres morts qui ont perdu leurs fines branches



Figure II - 10 : Mesure de la hauteur d'un tronc mort avec une barre métallique graduée



Figure II - 11 : Mesure du DHP d'un tronc mort avec un ruban-mètre



Une fiche de collecte de données est ajoutée ensuite :

Tableau II - 2 : Fiche de collecte de données du bois mort debout

BASSIN DE CARBONE 3

Mesure des Hauteurs et des Diamètres des Bois Mort Debout

Date		Preneur de notes Noms des membres de l'équipe
Zone (Département)		
Lieu (village)		
Personne ressource (Animateur GIZ)		
Nom du producteur		
Type de parcelle (Année, âge)		
Numéro de parcelle		
Superficie parcelle :		
Observations		

	GPS (Lat)	GPS (Lon)
Début de transect A		
Début de transect B		
Fin de transect A		
Fin de transect B		

N° du bois	GPS (Lat)	GPS (Lon)	Diam. DHP (cm)	Diam. Base DB (cm)	Hauteur Souche Hs (m)	Hauteur Top (m)	Diam. Top (Souche) (cm)	Classe 1= avec branches fines 2= sans branches fines

..... /.....

Comme CQ/AQ tous les instruments doivent être calibrés chaque jour. Pour déterminer sur les arbres la hauteur de poitrine, une perche d'une longueur de 1,3 m peut être utilisée.



II.2.5 Bois mort couché

Le bois mort est mesuré en utilisant la méthode d'échantillonnage par intersection de lignes. Selon FAO, SEP-REDD+ (2017), deux classes de décomposition sont différenciées pour le bois couché : intact et pourri. Par hectare, une ligne de 100 m, pliée dans des sections de 25 m et 50 m, est aléatoirement définie. Les diamètres ≥ 10 cm de tous les bois morts couchés qui coupent cette ligne sont relevés.

Le meilleur instrument pour mesurer les grands bois couchés est le compas forestier, parce qu'il évite de soulever le bois. L'estimation avec un mètre (pliant, rigide ou ruban) est moins précise, comme l'indiquent les photos suivantes (Figure II - 12, Figure II - 13).



Figure II - 12 : Mesure du diamètre d'un bois mort couché avec un mètre pliant



Figure II - 13 : Un bois mort couché avec un mètre rigide pour la mesure du diamètre

En ajoutant deux fils à plomb, la précision de la mesure avec un mètre rigide peut être améliorée. Les bois morts moins grands peuvent aussi être soulevés et mesurés avec un ruban à diamètre ou un ruban mètre. Comme contrôle CQ/AQ les rubans mètres et le compas forestier doivent être calibrés chaque jour.



II.2.6 Litière

Cinq échantillons de litière sont prélevés dans chaque parcelle. Les échantillons sont prélevés comme un dé qui compte cinq points : quatre échantillons près des coins et un échantillon au centre de la parcelle. Les échantillons sont prélevés aux points de mesure correspondant à cette disposition. Dans les parcelles non carrées, la conception peut être adaptée. Le point de mesure (le transect et le numéro du point sont enregistrés).

La litière est collectée à l'aide d'un cadre d'échantillonnage de 50 x 50 cm. La litière est toute la biomasse morte non attachée à une plante dont le diamètre est inférieur à 10 cm (Figure II - 14). Toute partie d'une branche ou d'une feuille morte qui se trouve dans le cadre d'échantillonnage est incluse dans l'échantillon. La partie d'une branche ou d'une feuille morte qui se trouve en dehors du cadre d'échantillonnage est coupée et n'est pas incluse dans l'échantillon. L'échantillon est prélevé à la main et conservé dans un sac en plastique. Il faut veiller à ne pas inclure de matériau de terre ou de petites pierres dans l'échantillon. Toutes les branches dont le diamètre est d'au moins 10 cm sont considérées comme du bois mort.



Figure II - 14 : Prélèvement de la litière dans un cadre d'échantillonnage fabriqué localement

Dans le cas de branches épaisses qui sont partiellement à l'intérieur du cadre d'échantillonnage, il est également possible de mesurer le diamètre de la branche et la longueur de la branche à l'intérieur du cadre d'échantillonnage et de l'enregistrer dans le protocole d'échantillonnage.



II.2.7 Carbone organique du sol

Les échantillons de sol sont prélevés au même point que les échantillons de litière (on prélève d'abord l'échantillon de litière, puis l'échantillon de sol).

L'échantillon est prélevé avec un carottier de sol jusqu'à 30 cm de profondeur. Il est important de prélever la quantité de sol non perturbé correspondant au volume du carottier (Figure II - 15). Pour ce faire, on peut prélever deux échantillons. Le premier échantillon en enfonçant le carottier jusqu'à ce que l'ouverture supérieure du carottier soit au niveau du sol. A l'aide d'une pioche, la terre est ensuite retirée autour du carottier (en veillant à ce qu'aucun matériau ne tombe dans le carottier), jusqu'à ce que le carottier puisse être retiré sans danger, en protégeant l'ouverture inférieure du carottier à la main pour éviter la perte de matériau. Pour le deuxième échantillon, cette procédure est répétée jusqu'à ce que la profondeur d'échantillonnage de 30 cm soit atteinte. Chaque échantillon est récupéré à l'aide d'un sac en plastique (les sacs poubelle de polyéthylène peuvent servir). Une étiquette est placée à l'intérieur de ce sac et une autre collée à l'extérieur du sac, donnant les informations nécessaires (voir le prochain chapitre II.2.11).



Figure II - 15 : A gauche : Enfoncement d'un carottier pour le prélèvement d'un échantillonnage du sol.
A droite : Vue en détail d'un carottier de fabrication locale

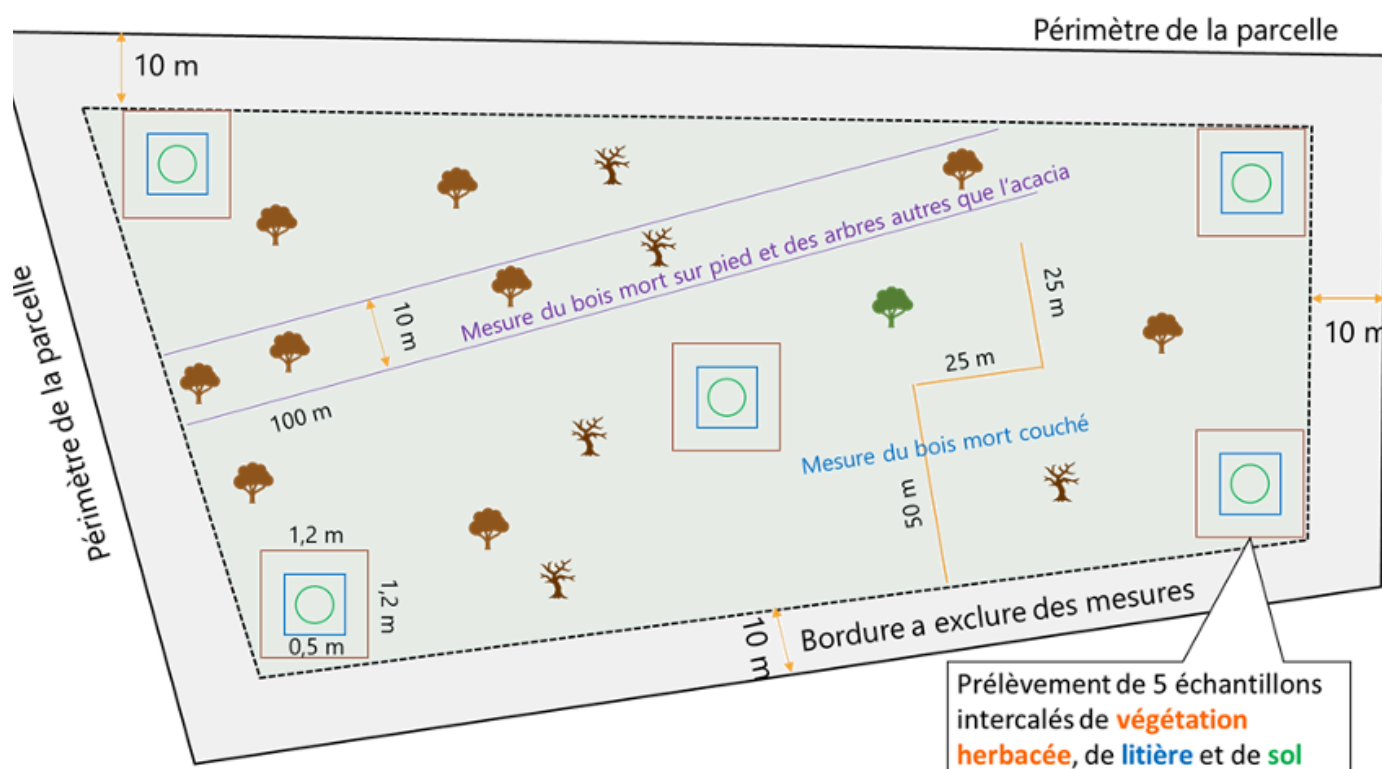


Figure II - 16 : Croquis de l'échantillonnage de végétation arborescente associée, bois mort, végétation non-arborescente, de litière et de sol.

II.2.8 Procédure opérationnelle standard pour demander des analyses du laboratoire

Les échantillonnages doivent être mis dans des récipients appropriés (normalement des sacs de plastique stable) avant de les envoyer dans un laboratoire. Si les échantillons sont périssables, il faut les sécher ou conserver ou les envoyer en temps voulu au laboratoire. Tous les récipients doivent être étiquetés à l'intérieur et à l'extérieur (p.ex. ruban adhésif de tapisserie).

Chaque échantillon est étiqueté par le client avec un identifiant unique. Cet identifiant doit être utilisé dans toutes les communications concernant un échantillon spécifique et dans toutes les fiches de résultats.

Les étiquettes doivent porter les informations suivantes :

- Identifiant unique
- Nombre (et adresse) d'expéditeur
- Date
- Détail d'analyse demandée
- Contenu d'Echantillon (Sol/litière/herbes/bois)
- Instructions supplémentaires

Les échantillons de sol prélevés doivent être analysés selon les procédures standard d'analyse des sols, recommandées par la FAO⁶. Tout écart par rapport à ces méthodes doit être approuvé par le client avant la mise en œuvre, et la référence bibliographique de l'analyse doit être fournie.

⁶ <https://www.fao.org/global-soil-partnership/glosolan-old/soil-analysis/standard-operating-procedures/en/>



II.3 Calculs du carbone dans les bassins de carbone échantillonnés

Les calculs sont expliqués pour les sept bassins de carbone identifiés dans les mesures sur les parcelles agroforestières.

1. Végétation arborescente de la plantation d'acacia
2. Végétation arborescente associée
3. Végétation non-arborescente
4. Bois mort sur pied
5. Bois mort couché
6. Litière
7. Carbone organique du sol

II.3.1 Végétation arborescente de la plantation d'acacia

Pour calculer la biomasse sèche aérienne (BA) et le carbone de la végétation arborescente, il faut d'abord séparer les mesures pour *Acacia auriculiformis* & Hybride (AH) d'un côté, et *Acacia mangium* (AM) d'un autre.

Des équations allométriques alternatives ont été développées (développées et reprises du chapitre II.4) en se basant soit sur la hauteur des arbres échantillonnés, soit sur le DHP des arbres échantillonnés. L'équation basée sur la hauteur est utilisée pour estimer la teneur en carbone des Acacias lorsque seules des mesures de hauteur à partir de drones sont disponibles.

Pour chaque fraction, on peut utiliser les équations suivantes :

Acacia auriculiformis & Hybride (AH) :

$$BA(AH) = 0,2951 \times DHP^2 - 0,2493 \times DHP + 0,5996$$

$$BA(AH) = 0,5195 \times H^2 - 2,7786 \times H + 5,3583$$

Acacia mangium (AM) :

$$BA(AM) = 0,1403 \times DHP^2 - 1,8489 \times DHP - 8,5705$$

$$BA(AM) = 0,6373 \times H^2 - 6,1843 \times H + 19,321^7$$

avec:

BA = Biomasse sèche aérienne par arbre (kg)

DHP = Diamètre à hauteur de 1,3 m de poitrine (cm)

H = Hauteur total des arbres (m)

⁷Calcul alternatif avec hauteurs de repérage à distance.



Au cas où des arbres sont bifurqués ou multifurqués au-dessous du DHP, l'on va mesurer plusieurs diamètres et calculer un DHP moyen pour l'arbre, basé sur le concept du tronc moyen de la surface terrière, selon l'équation :

$$\text{DHP} = (\text{DHP}_1^2 + \text{DHP}_2^2 + \text{DHP}_n^2)^{0,5}$$

avec:

DHP = Diamètre moyen d'arbres bifurqué ou multifurqué à hauteur de 1,3 m de poitrine (cm)

DHP_{1,2,n} = Diamètre à hauteur de 1,3 m de poitrine (cm) de la tige 1, tige 2, jusqu'à la dernière tige n

Pour calculer la biomasse sèche souterraine (BS) à base de la biomasse aérienne (AGB), on peut utiliser un facteur pour les forêts tropicales sèches (cités après Mokany et al., 2006 en IPCC 2006, p. 4.49) :

$$\text{BS} = \text{BA} \times \text{R}$$

Avec:

R = 0,56 pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de <20 tonnes / ha

0,28 pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de >20 tonnes / ha

La biomasse totale sèche (B) d'un arbre (Acacia auriculiformis, Hybride ou Acacia mangium) (B, kg) :

$$\text{B} = \text{BA} + \text{BS}$$

La masse du carbone d'un arbre (C, kg) :

$$\text{C} = \text{B} \times \text{Cc}$$

Avec

Cc = Contenu de carbone⁸.

La masse du carbone de l'arbre moyen (CarbM, kg) :

$$\text{CarbM} = \sum_1^n \text{C} / n$$

avec:

n = Numéro des arbres échantillonnés

La masse totale du carbone des arbres plantés par hectare (Ctot, tonnes/ha) :

$$\text{Ctot} = \text{CarbM} \times 10^{-3} \times \text{N}$$

avec

N = Numéro des arbres par hectare

⁸Estimation : 0,47. Source : Feldpausch et al., 2004, cités en IPCC 2006, p. 4.48 et FAO, SEP-REDD+ 2017, p. 31



II.3.2 Végétation arborescente associée

Pour calculer la biomasse sèche aérienne de la végétation arborescente associée à la plantation des acacias, la suivante équation est utilisée après le modèle 4 de l'équation de Chave, Réjou-Méchain et al. (2014), cité dans FAO, SEP-REDD+ (2017, p 28), car elle est prétendue être plus robuste, récente et couvre un large éventail de types de végétation, inclue africaine, pour un total de 4.004 arbres dont le diamètre du tronc varie de 5-212 cm, et elle inclut les données d'autres équations pantropicales :

$$BA_{ara} = 0,0673 \times (\rho \times DHP^2 \times H)^{0.976}$$

avec:

BA_{ara} = Biomasse sèche aérienne estimée de l'arbre associé (kg)

DHP = Diamètre à hauteur de poitrine (cm)

H = Hauteur totale de l'arbre (m)

ρ = Densité spécifique du bois (g/cm³) : 0,58 g/cm³ est la valeur moyenne pour l'Afrique tropicale⁹

Pour des espèces d'arbres identifiées, une correspondance au niveau de l'espèce doit être recherchée dans le Global Wood Density Database¹⁰ et une densité moyenne du bois associée à chaque arbre, au niveau le plus bas (espèce, genre ou famille).

Dans les cas où la hauteur totale de l'arbre est difficile à mesurer ou inaccessible, une équation alternative peut être appliquée pour calculer la biomasse sèche aérienne pour les arbres avec un DHP jusqu'à 63 cm en climat tropical subhumide (900 - 1 500 mm de pluie par an), publiée en Pearson et al. 2005, p. 43 :

$$BA_{ara} = 0,2035 \times DHP^{2.3196}$$

Récemment, Aabeyir et al. (2020) ont développés des algorithmes de biomasse spécifiquement pour la zone de transition entre la forêt et la savane au Ghana, basés sur le DHP, ρ, et H, qui pouvaient présenter une option en plus. Autres modèles de biomasses pantropicaux basés sur des analyses destructives de 1816 arbres des forêts humides tropicales de l'Afrique, Asie et Amérique Latine sont publiés par Feldpausch et al. (2012).

Pour calculer la biomasse sèche souterraine (BS) en base de la biomasse sèche aérienne (BA) on peut utiliser un facteur pour les forêts tropicales sèches (IPCC 2006, p. 4.49) :

$$BS = BA \times R$$

avec

R = 0,56 pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de <20 tonnes / ha

0,28 pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de >20 tonnes / ha

⁹ (Reyes et al., 1992)

¹⁰ <http://datadryad.org/handle/10255/dryad.235>



La biomasse totale sèche d'un arbre associé (BT_{arb} , kg) :

$$B_{ara} = BA + BS$$

La masse du carbone par arbre (C_{ara} , kg) :

$$C_{ara} = B_{ara} \times Cc$$

avec

Cc = Contenu de carbone¹¹.

La masse totale du carbone des arbres plantés par hectare (C_{tot} , tonnes/ha) est le total de tous les arbres associés rencontrés dans l'échantillon divisé par 1000 (pour transformer kg en t) et par la superficie de l'échantillon (1000 m²) et multiplié par 10 000 m² :

$$C_{atot} = \sum_1^n C_{ara} \times 10^{-2}$$

avec

n = Numéro des arbres rencontrés sur l'échantillon de 100 × 10 m

II.3.3 Végétation non-arborescente

Pour calculer la biomasse sèche aérienne de la végétation non-arborescente aérienne en kilogramme par hectare on doit totaliser les 5 échantillons de chaque parcelle, à multiplier avec leur contenu sec, à diviser par leur surface (7,2m²), à multiplier par 10 000 m² et à diviser par 1000 :

$$BVNA_{ta} = \sum_1^5 BVNA_{ech} \times CS \times 10/7,2$$

avec

$BVNA_{ta}$ = Biomasse sèche aérienne totale de la végétation non-arborescent (kg/ha)

$BVNA_{ech}$ = Biomasse sèche aérienne de la végétation non-arborescent de l'échantillon (g/1,44 m²)

CS = Contenu sec (poids sec des échantillons divisé par leur poids fraîche)

Pour calculer la biomasse souterraine sèche ($BVNA_{tb}$) en base de la biomasse sèche aérienne ($BVNA_{ta}$) on peut utiliser un facteur pour les forêts tropicales sèches (cités après Mokany et al., 2006 en IPCC 2006, p. 4.49) :

$$BVNA_{tb} = BVNA_{ta} \times R$$

avec

R = 0,56 pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de <20 tonnes / ha

¹¹ Estimation : 0,47. Source : Feldpausch et al., 2004, cités en IPCC 2006, p. 4.48 et FAO, SEP-REDD (2017), p. 31



La biomasse totale sèche par hectare (BVN_{At} , kg/ha) :

$$BVNA_t = BVNA_{ta} + BVNA_{tb}$$

La masse du carbone par hectare ($CVNA_t$, tonnes /ha) :

$$C_{BVNA_t} = BVNA_t \times Cc \times 10^{-3}$$

avec

Cc = Contenu de carbone. Estimation : 0,47¹².

II.3.4 Bois mort debout

La biomasse sèche aérienne du bois mort debout (sauf les souches) est obtenue par le modèle 4 de Chave, Réjou-Méchain et al. (2014), selon l'application de FAO, SEP-REDD (2017), divisée par 1000 (pour transformer kg en t). L'équation est ci-dessous :

$$BMD_{arb} = BA_{arb} \times FR \times 10^{-3}$$

avec

BMD_{arb} = Biomasse sèche aérienne du bois mort debout d'un arbre (tonnes)

BA_{arb} = Biomasse sèche aérienne estimée de l'arbre (kg) (voire chapitre II.3.2 pour les détails)

FR = Facteur de réduction selon la classe de décomposition. $FR = 0,976$ pour la classe 1, c'est à dire pour les arbres morts qui n'ont perdu que des feuilles et des brindilles et $FR = 0,800$ pour la classe 2, ceux qui ont aussi perdu des branches < 10 cm de diamètre (adapté du IPCC 2003, section 4.3.3.5.3)

Pour le bois mort en forme des **souches**, la formule ci-dessous est appliquée (FAO, SEP-REDD+, 2017, p. 30) :

$$BMD_{arb} = \pi/4 \times DHS^2 \times HS \times \rho \times \beta$$

avec

BMD_{arb} = Biomasse du bois mort (t) pour les souches

π = 3,14159... (Pi)

DHS = Diamètre à hauteur de la souche (m)

HS = Hauteur de la souche

ρ = Densité basique du bois est égale à 0.58 g/cm³ (Reyes et al., 1992)

β = Facteur de réduction de la densité basique du bois :

0,8 pour le bois mort intact et 0,45 pour le bois mort pourri

Pour calculer la masse sèche du bois mort souterrain (BM_{BG-arb}) en base de la biomasse du bois mort debout sèche (BM_{Darb}) on peut utiliser un facteur pour les forêts tropicales sèches (cités après Mokany et al., 2006, en IPCC 2006, p. 4.49) :

¹² Source : Feldpausch et al., 2004, cités en IPCC 2006, p. 4.48



$$BM_{BG-arb} = BMD_{arb} \times R$$

avec:

R = 0,56 pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de <20 tonnes/ha
0,28 pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de >20 tonnes/ha

La masse du carbone du bois mort debout aérien et souterrain par arbre (CMD_{arb} , t) :

$$CMD_{arb} = [BMD_{arb} \times (1 + R)] \times Cc$$

avec

Cc = Contenu de carbone¹³.

La masse totale du carbone du bois mort par hectare (CMD_{ta} , tonnes/ha) est le total de la masse du carbone de tous les arbres morts rencontrés sur l'échantillon divisé par la superficie de l'échantillon (1000 m²) et multiplié par 10.000 m² :

$$CMD_{ta} = \sum_{i=1}^n CBM_{arb} \times 10$$

avec

n = Numéro des arbres rencontrés sur l'échantillon de 100 × 10 m

II.3.5 Bois mort couché

La biomasse sèche du bois mort couché est déterminée pour les deux classes de décomposition séparément, comme suite (Pearson et al. 2005, p. 28-29, FAO, SEP-REDD+ 2017, p. 30) :

$$BMC_1 = \pi^2/8L \times (d_1^2 + d_n^2 + \dots d_n^2) \times \rho \times \beta_1$$

$$BMC_2 = \pi^2/8L \times (d_1^2 + d_n^2 + \dots d_n^2) \times \rho \times \beta_2$$

avec :

BMC₁ = Biomasse du bois mort (t/ha) pour le bois mort couché intact

BMC₂ = Biomasse du bois mort (t/ha) pour le bois mort couché pourri

π = 3,14159... (Pi)

L = longueur de la ligne (m) : 100 m (Pearson et al. 2005), 200 m (FAO, SEP-REDD+ 2017)

d₁, d₂..d_n = Diamètres (cm) mesurés des bois morts couchés sur la ligne définie

ρ = Densité basique du bois est égale à 0.58 g/cm³ (Reyes et al., 1992)

β₁ = Facteur de réduction de la densité basique du bois avec 0,8 pour le bois mort intact

β₂ = Facteur de réduction de la densité basique du bois avec 0,45 pour le bois mort pourri

¹³ Estimation : 0,49 (biomasse morte). Source : IPCC 2003, section 3.2.2.2.1 et FAO, SEP-REDD+ 2017, p. 31



La biomasse sèche du bois mort couché BMC (t/ha) est la somme des deux classes de décomposition (voir II.2.5) :

$$\mathbf{BMC = BMC_1 + BMC_2}$$

La masse du carbone du bois mort couché (CMC, t/ha) :

$$\mathbf{CMC = BMC \times Cc}$$

avec :

Cc = Contenu de carbone¹⁴.

II.3.6 Litière

La biomasse de la litière des 5 échantillons prises dans chaque parcelle peut être calculée avec les équations suivantes :

$$\mathbf{BL = \sum_{i=1}^5 BL_{ech} \times 8}$$

avec:

BL = Biomasse de la litière (t/ha)

BL_{ech} = Biomasse sèche de chaque zone d'échantillonnage de 0,5 m × 0,5 m (kg)

8 = $1 / (5 \times 0,25 \text{ m}^2) \times 10.000 \text{ m}^2 / 1.000$

La masse du carbone de la litière peut être estimée comme suite :

$$\mathbf{CML = BL \times Cc}$$

avec:

CML = Masse du carbone de la litière (t/ha)

BL = Biomasse de la litière (t/ha)

Cc = Contenu de carbone¹⁵.

¹⁴ Estimation : 0,49. Source : IPCC 2003, section 3.2.2.2.1 et FAO, SEP-REDD+ 2017, p. 31

¹⁵ Estimation : 0,49. Source : IPCC 2003, section 3.2.2.2.1 et FAO, SEP-REDD+ 2017, p. 31



II.3.7 Carbone organique du sol

Pour déterminer le stock de carbone organique (t C/ ha) du sol, les échantillons de sol sont analysés dans un laboratoire de science du sol qualifié. Le laboratoire mesure la teneur en carbone organique, la densité apparente et la fracturation des matériaux grossiers (d'un diamètre supérieur à 2 mm).

Pour calculer la teneur en carbone du sol en t/ha, la teneur en carbone organique du sol est multipliée par la densité apparente et corrigée de la teneur en matières grossières.

La formule est la suivante (voir, par exemple Tadiello et al., 2022) :

$$C_{org} = C_{org_perc} \times DA \times MF \times PE \times 10.000$$

avec:

C_{org} = stock de carbone organique en t C/ha

C_{org_perc} = Pourcentage de carbone organique dans le matériau du sol fin

DA = Densité apparente (g/cm³ ou t/m³)

MF = Pourcentage de matériel du sol fin

PE = Profondeur d'échantillonnage (normalement 0,3 m)

Conformément à un exemple tiré de l'étude de préfaisabilité, le stock de carbone est calculé comme suit pour une teneur en carbones organiques de 1,16 %, une densité apparente de 1,496 g/cm³, une profondeur d'échantillonnage de 0,1 m et 100 % de matériaux fins : $0,0116 \times 1 \times 1,496 \times 0,1 \times 10.000 = 17,35$ t/ha.

II.4 Saisie des données terrain avec QField et QGIS

L'outil QField est un logiciel conçu pour l'utilisation des données SIG sur le terrain et la saisie de données géographiques avec une tablette ou un téléphone portable. Il est disponible pour les systèmes d'exploitation Android et iPhone, mais toutes les fonctionnalités ne sont disponibles que sur Android. Pour télécharger QField, on peut utiliser Google Play pour Android ou l'AppStore d'Apple pour iOS. Pour Android, l'outil est également disponible sur des sites alternatifs.

Cette section traite de la saisie des données avec QField. La configuration de QField se fait auparavant à l'aide du logiciel gratuit QGIS.

II.4.1 Importer la base de données de base

Pour importer les données, il faut copier le fichier zip mis à disposition sur le téléphone. Ensuite, il faut ouvrir QField et sélectionner l'option «ouvrir une fiche locale» (Figure II - 17).

Le fichier zip avec les données de base peut être envoyé par e-mail ou Messenger ou téléchargé depuis un serveur.



Figure II - 17: Écran d'accueil de QField

Une fois ouverte, la carte apparaît en vue d'ensemble. Le bouton en haut à gauche permet d'ouvrir le menu et la légende de la carte. Le bouton en bas à droite permet de zoomer sur l'emplacement actuel (si le GPS est connecté) (Figure II - 18).

Si vous êtes déjà sur une parcelle, celle-ci est visible à l'écran et votre position est marquée. En cliquant (en touchant) la parcelle, les informations correspondantes apparaissent (Figure II - 19).

La légende de la carte présente les différentes couches associées à chaque puits de carbone mesuré sur le terrain (Figure II - 20):

- Bois mort couché
- Bois mort debout
- Sol et litière
- Autres arbres
- Arbres de plantation d'acacia.

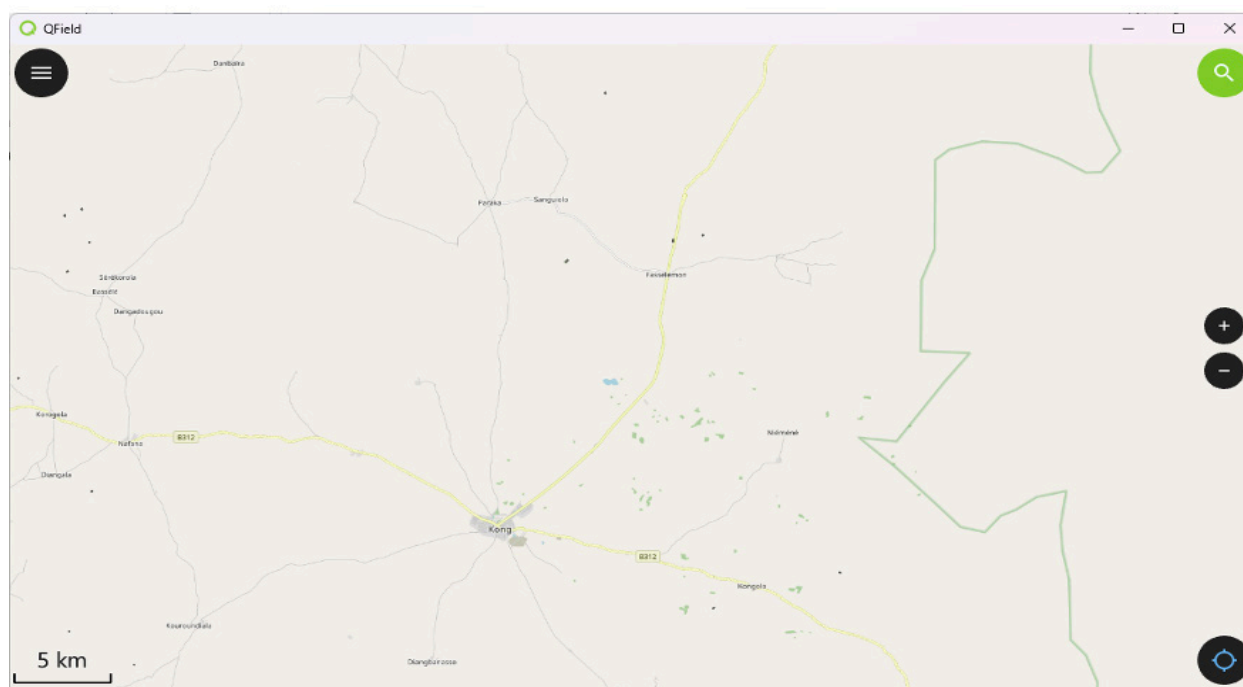


Figure II - 18 : Vue initiale de la carte.

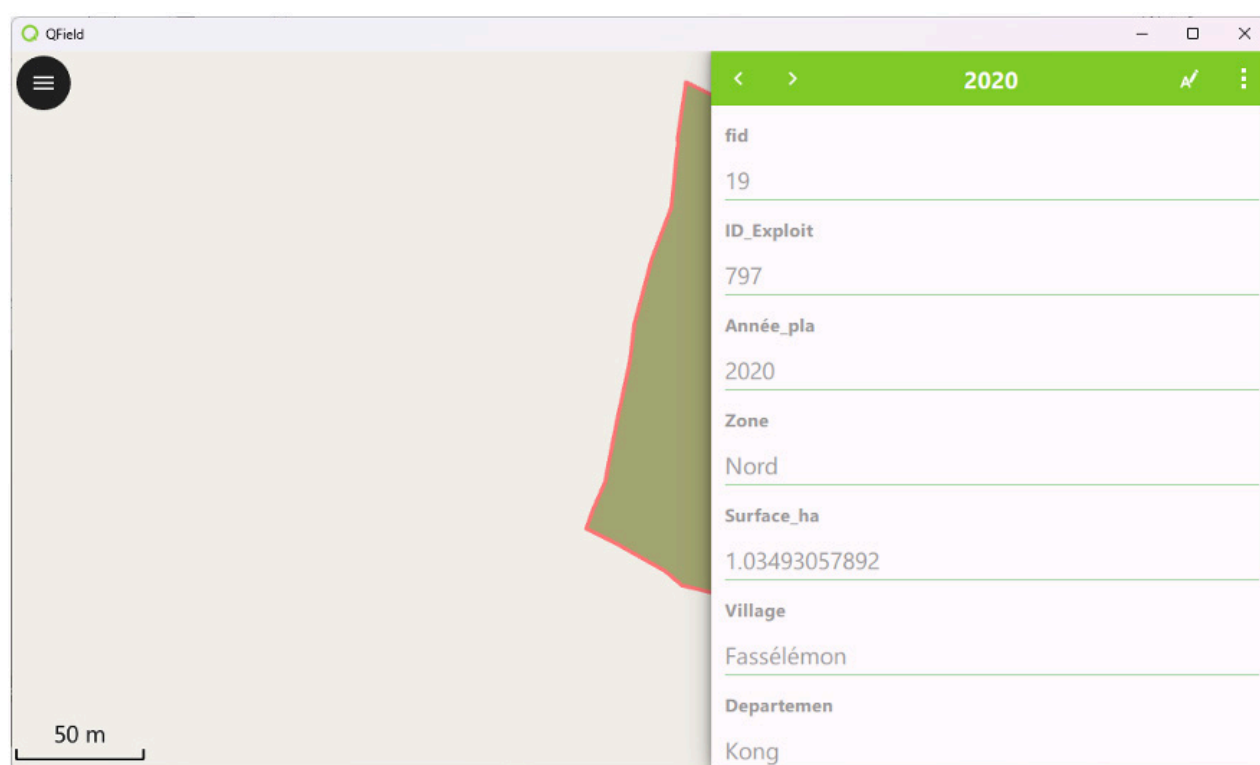


Figure II - 19 : Information sur la parcelle.

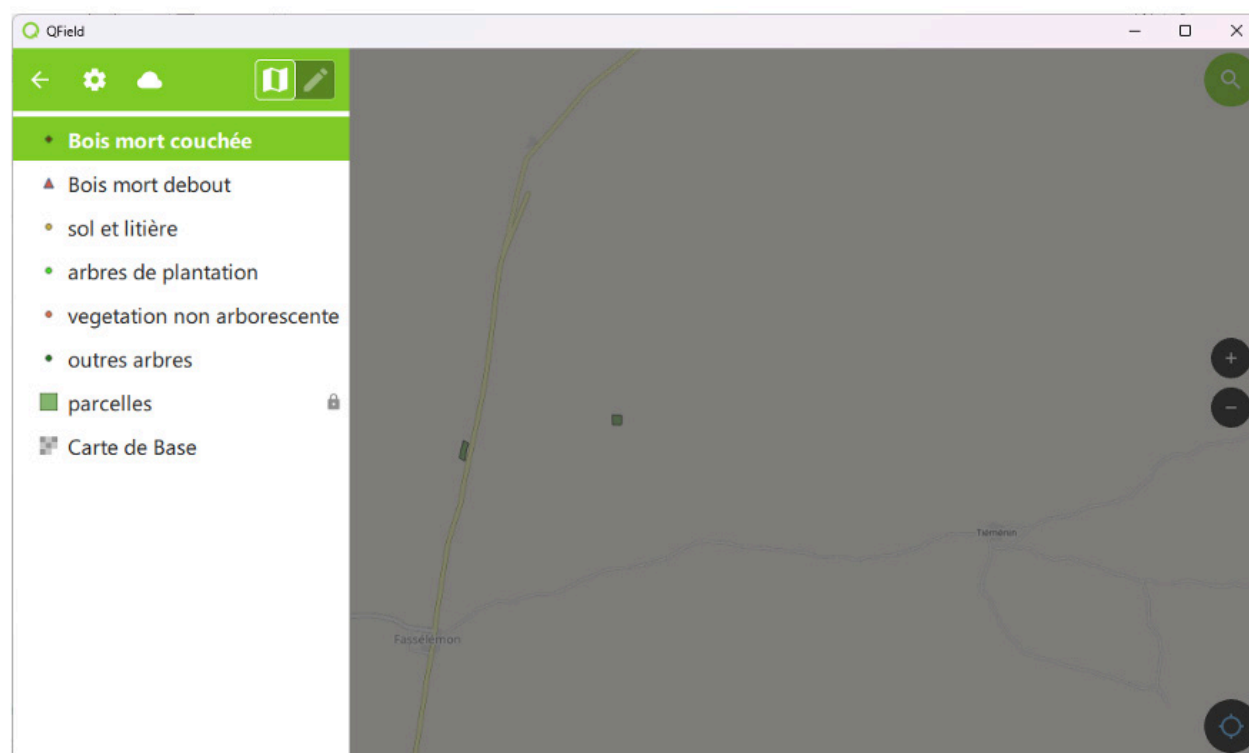


Figure II - 20 : Menu QField avec légende / table des contenus

II.4.2 Enregistrement des mesures

Pour enregistrer une nouvelle mesure, sélectionnez la couche à éditer. Ensuite, cliquez sur le bouton «Mode d'édition». L'information apparaît alors que la couche est maintenant éditable (Figure II - 21).

L'on peut alors, en cliquant dans la carte, créer une nouvelle mesure. On peut aussi créer une nouvelle mesure en cliquant sur le bouton au-dessus de l'icône GPS. Le point de mesure est alors créé à la position GPS actuelle. En cliquant sur le bouton sous l'icône GPS, le point de mesure est déplacé au centre de la carte (Figure II - 22) .

Après la création du point de mesure, une fenêtre de saisie des données s'affiche. C'est ici qu'il faut saisir les données de mesure décrites dans le chapitre pour le point.

Le numéro de parcelle est saisi comme suit : <numéro de l'agriculteur>-<année de plantation> .

Les figures Figure II - 23 - Figure II - 28 illustrent les différents types de données de mesure pour chaque couche.

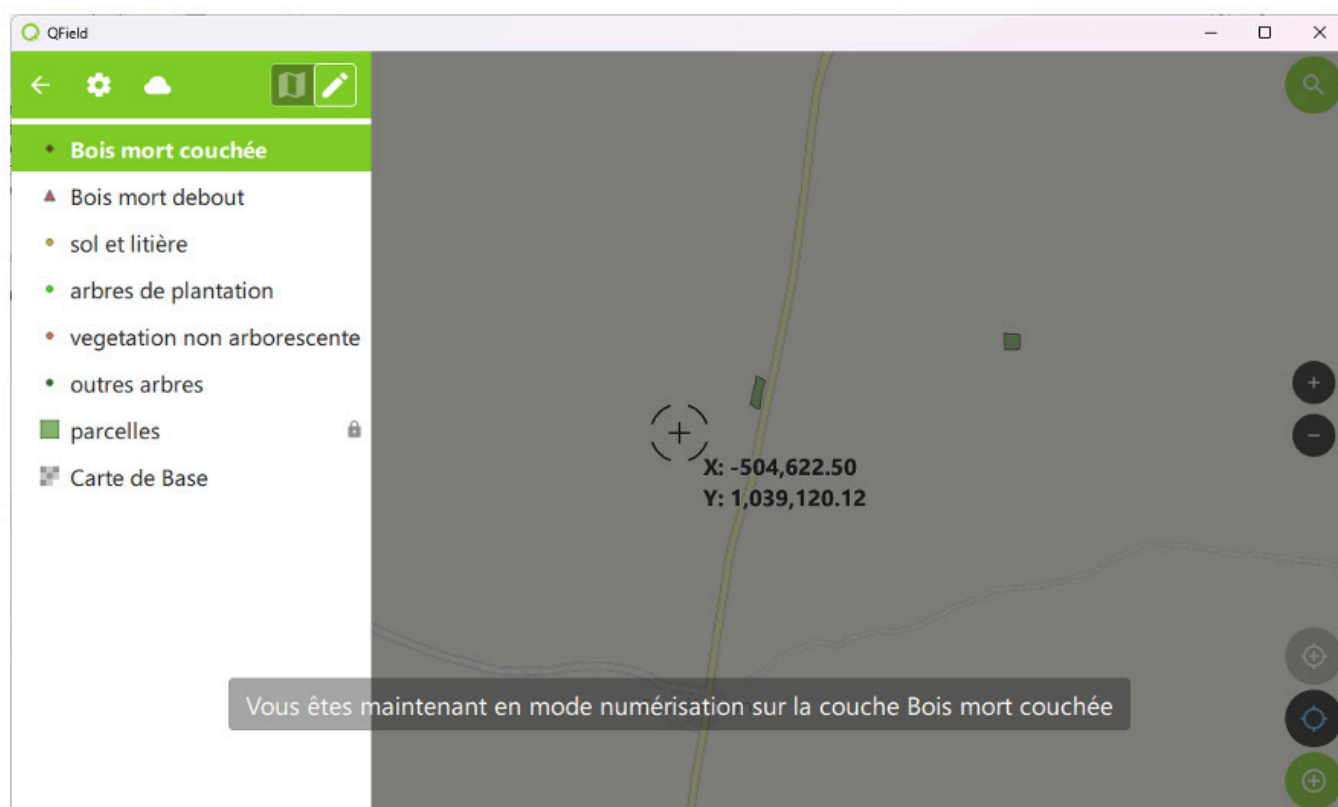


Figure II - 21 : Sélection du mode d'édition pour la couche sélectionné (Bois mort debout)



Figure II - 22 : Création d'un point de mesure



QField

1/2: 10

fid

Diamètre

10

Classe

1

Parcelle

797-2020

Date

2024-07-09 00:00:00

100 m

Figure II - 23 : Saisie des données de mesure du bois mort couché

QField

Ajouter une entité à Bois mort debout

20

Diamètre hauter de poitrine

17

diamètre souche

30

Hauteu souche

Hauteur

Transect No.

1

Parcelle

797-2020

Date

100 m

X: -5
Y: 1,4

Figure II - 24 : Saisie des données de mesure du bois mort debout



Ajouter une entité à sol et litière

fid		
Litière No. Laboratoire	797-2020-1-S	
Sol No. Laboratoire	797-2020-1-L	
Litière Poids	974	
Date	2024-07-09 00:00:00	
Parcelle	797-2020	

Figure II - 25 : Saisie des données de mesure sol et litière

Ajouter une entité à arbres de plantation

fid		
Diamètre	10	
Hauteur	9	
Especie	A. Auriculiformis	
Type de mesure	Mesure Acacias	
Date	2024-07-10 00:00:00	
Transect No.	1	
Point No.	2	

Figure II - 26 : Saisie des données de mesure des arbres de plantation (d'Acacia).



Ajouter une entité à végétation non arborescente

fid	:	☐
lab_number	:	☐
797-2020-L-1	:	☐
field_weight	:	☐
2503	:	☐
Date	:	☐
2024-07-10 00:00:00	:	☐
field_weight_lab	:	☐
500	:	☐

Figure II - 27 : Saisie des données de mesure du végétation non arborescente

Ajouter une entité à autres arbres

fid	:	☐
diameter	:	☐
25	:	☐
height	:	☐
11	:	☐
measurement_type	:	☐
Outres arbres	:	☐
Date	:	☐
2024-07-10 00:00:00	:	☐
species	:	☐
0	:	☐

Figure II - 28 : Saisie des données des autres arbres.



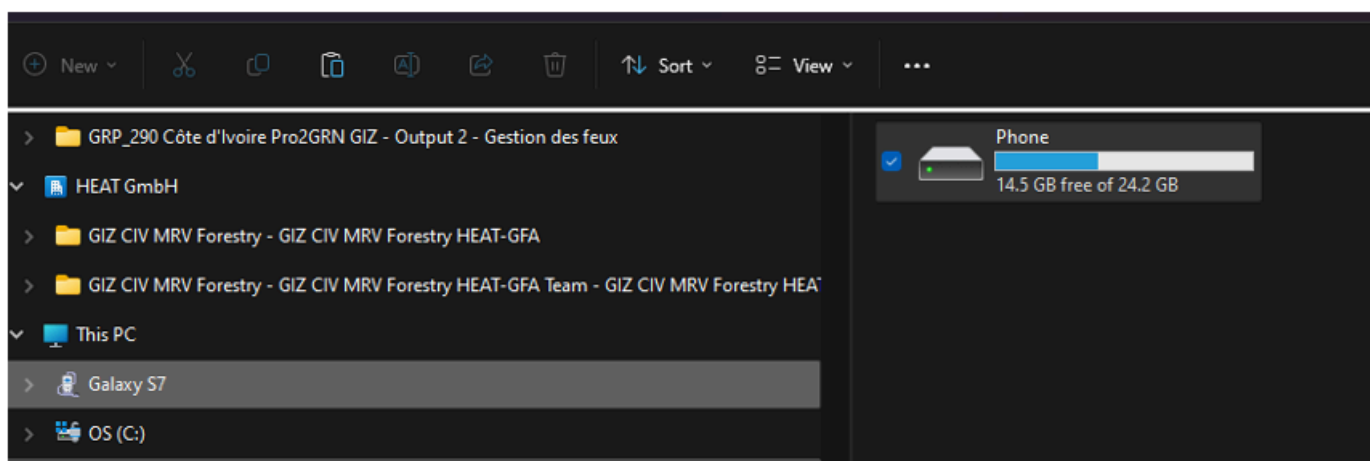
II.4.3 Guide pour le transfert des données QField vers un PC

L'exportation des données de QField pour un traitement ultérieur dans le système MNV peut se faire par câble à l'aide d'un ordinateur portable. La procédure est décrite ci-dessous,

1. Branchez votre tablette sur le PC à l'aide du câble USB

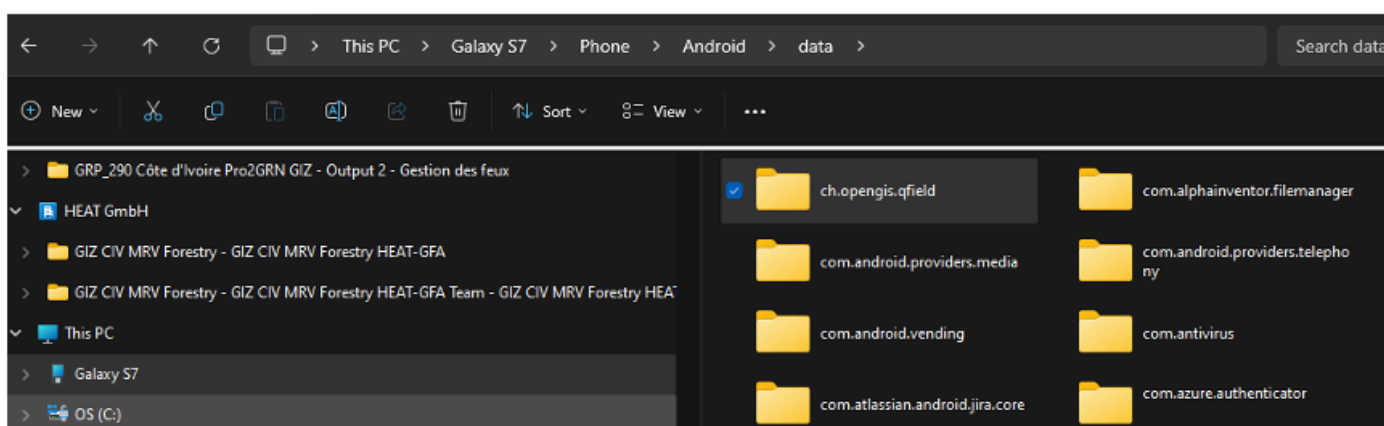
Vous devez autoriser la connexion sur la tablette lorsque vous y êtes invitéé.

Vous verrez alors la tablette/le téléphone dans l'explorateur Windows comme suit :



2. Naviguez jusqu'au répertoire QField :

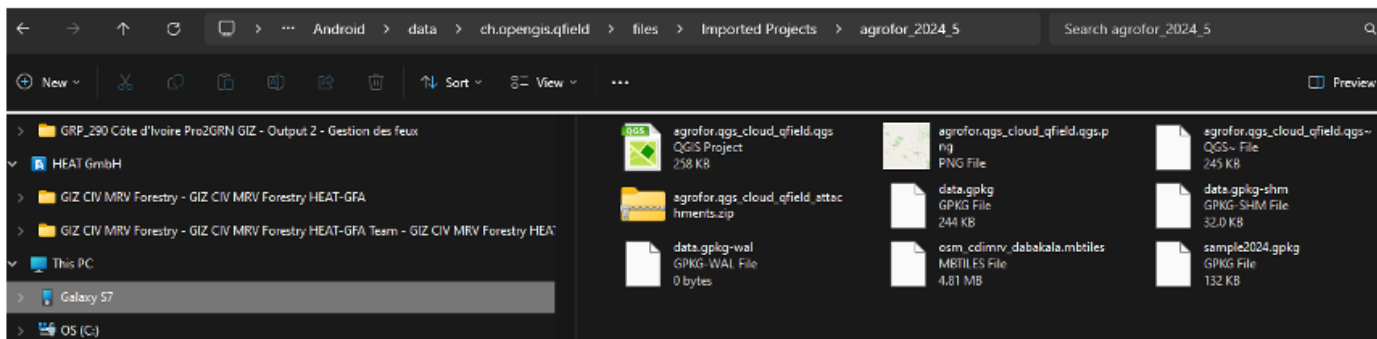
Vous trouverez le répertoire QField sous Phone -> Android -> data -> ch.opengis.QField





- Ouvrez le répertoire et naviguez jusqu'à Fichiers -> Projets importés -> agrofor_2024_5 (ou le nom de votre projet).

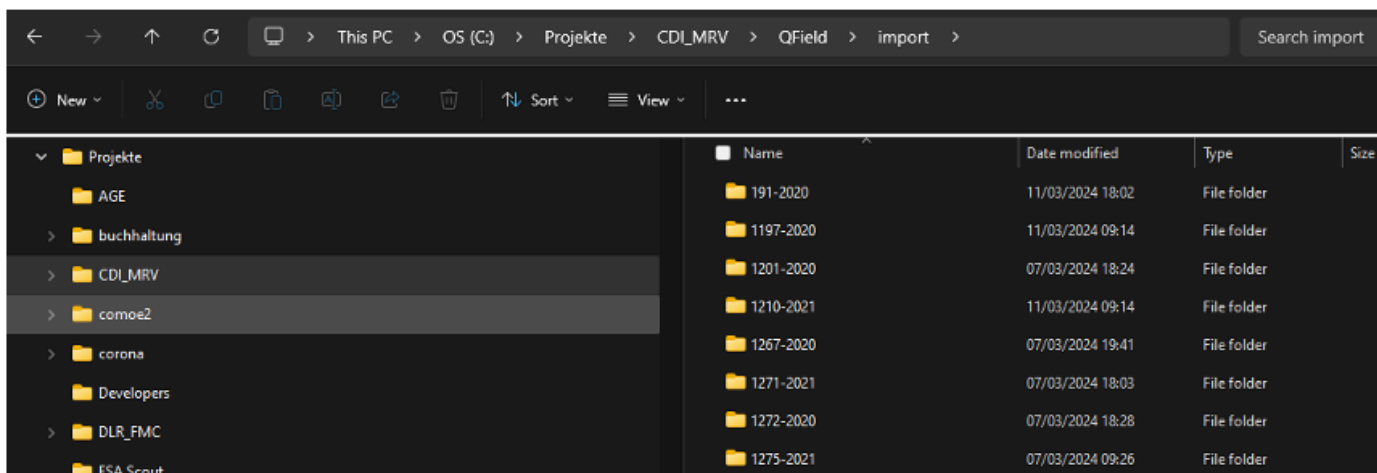
Sélectionnez le fichier «data.gpkg» et copiez le fichier



- Sur votre PC, naviguez jusqu'au dossier dans lequel vous souhaitez placer le fichier. Dans cet exemple, il s'agit d'un répertoire nommé QField -> Import.

Créez un nouveau répertoire pour le fichier. La convention d'appellation est <ID_Exploit-Année plant.>, par exemple 1201-2020 (voir ci-dessous).

Collez le fichier data.gpkg ici. Si vous avez plusieurs fichiers (par exemple, de différents jours et tablettes), créez un sous-répertoire.



Pour la suite du traitement, envoyez les fichiers au service responsable du système MNV.



II.5 Echantillonnage des arbres pour développer la relation de la biomasse et du stock de carbone avec le DHP et la hauteur totale

Pour estimer plus exactement le stock de carbone d'une plantation d'une espèce donnée, il convient de ne pas se fier aux équations allométriques générales disponibles dans la littérature internationale (soi-disant niveau tier 1) mais de développer des équations locales ou zonales spécifiques à la variété de l'espèce utilisée et les facteurs des sites et de l'exploitation des plantations.

Il y a sept étapes bien définies dans cette POS pour arriver aux équations spécifiques :

1. Sélectionner aléatoirement des arbres pour mesurer les variables DHP et H
2. Mesurer le volume du tronc et des branches
3. Déterminer la masse spécifique du bois et de l'écorce
4. Disséquer les composantes principales de l'arbre
5. Peser la biomasse fraîche de ses composantes
6. Déterminer la biomasse sèche de ses composantes
7. Calculer les algorithmes des relations DHP-biomasse et H-biomasse

Chacune des étapes impliquent certaines procédures qui sont expliquées dans les sections suivantes.

Comme CQ/AQ tous les instruments doivent être calibrés chaque jour.

II.5.1 Sélectionner aléatoirement des arbres pour mesurer DHP et H

- a) A partir du centre de la plantation, prendre aléatoirement une direction de boussole et une distance. Pour la réalisation, on peut utiliser un générateur de nombres aléatoires d'une application du smartphone. Une autre possibilité est que chaque membre de l'équipe pense aléatoirement à deux nombres que peuvent représenter une direction possible de l'aiguille de la boussole et une distance possible en mètres. Puis le chef d'équipe nomme un membre à présenter ses chiffres.
- b) Sélectionner l'arbre le plus proche de l'endroit indiqué.
- c) Mesurer le diamètre de l'arbre à hauteur de poitrine (1,3 m) avec un ruban mètre, un ruban à diamètre ou un compas forestier
- d) Mesurer la hauteur de l'arbre au point de la dernière branche avec une perche télescopique ou, si c'est plus convenable, une fois que l'arbre est abattu



II.5.2 Mesurer le volume du tronc et des branches

- Mesurer les diamètres (d_1 , d_2 , ...) des sections de 2 m ou moins: troncs de cône
- Mesurer l'épaisseur de l'écorce (avec p.ex. un pied à coulisse)
- Arbres jusqu'à 10 cm DHP : Continuer tout le long du tronc et des branches jusqu'à ce que le diamètre au bout soit moins que 3 cm ; ou
arbres de > 10 cm jusqu'à 30 cm DHP : Continuer tout le long du tronc et des branches jusqu'à ce que le diamètre au bout soit moins que 7 cm

Pour mesurer les diamètres (d_1 , d_2 ,...) des sections des sections de 2 m plus la section restante : volumes des troncs de cône :

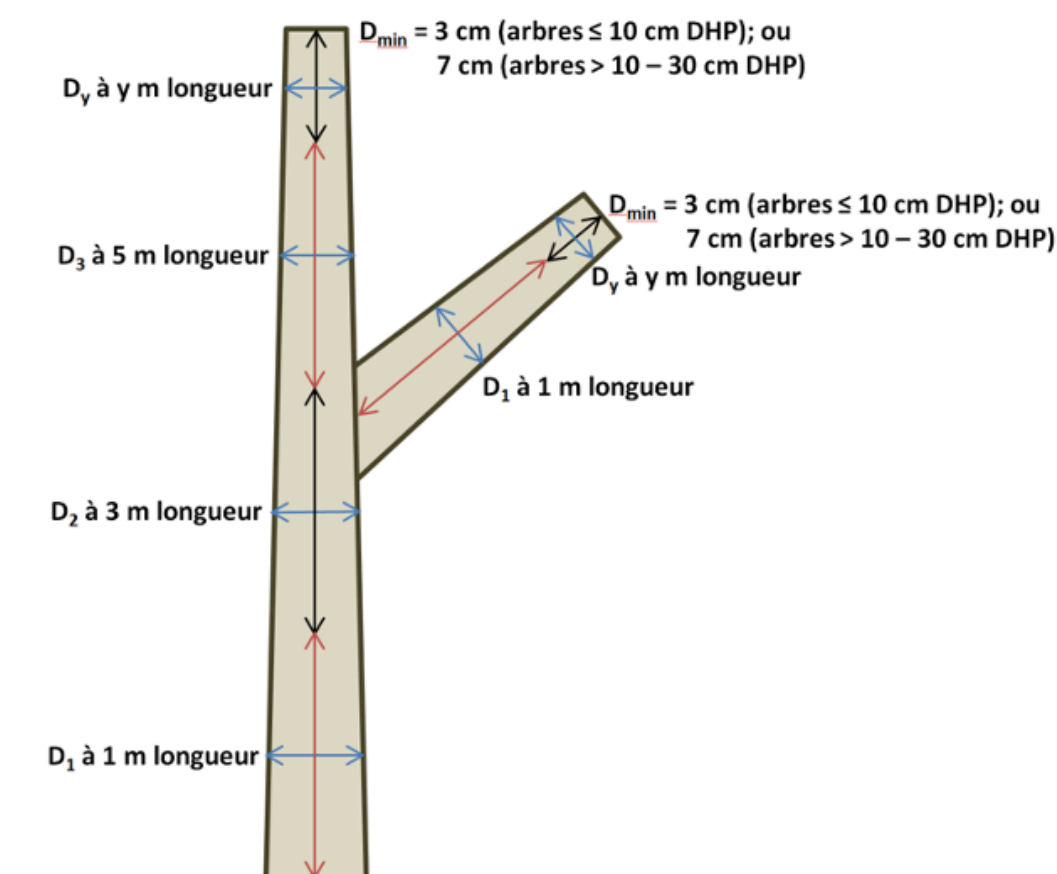


Figure II - 29 : Croquis des mesures du volume du tronc et des branches.



Figure II - 30 : Mesure de la longueur du tronc ≥ 3 cm diamètre et contrôle de la hauteur totale



Figure II - 31 : Mesure de l'épaisseur de l'écorce d'une section de tronc à l'aide d'un pied à coulisse

II.5.3 Déterminer la masse spécifique du bois et de l'écorce

- Couper des échantillons de bois de tous ou plusieurs sections et de l'écorce associée, et mesurer leur volume en utilisant les mesures des formes géométriques (troncs de cône p.ex.) ou la méthode de déplacement.
- Envoyer les échantillons au laboratoire pour en déterminer le poids sec.



Figure II - 32 : Ensemble d'échantillons de bois avant l'envoi au laboratoire



Figure II - 33 : Echantillons d'écorces de différents parts du tronc pour déterminer le poids sec avec l'étiquette pour le laboratoire placée à l'intérieur du sac de plastique



Figure II - 34 : Mesure du volume d'un échantillon de bois par la méthode de déplacement d'eau



II.5.4 Disséquer les composantes principales de l'arbre

Pour les arbres jusqu'à 10 cm DHP, il faut couper avec une scie et un sécateur les:

- a) Branches (1 - <3 cm diamètre)
- b) Branches fines (< 1 cm diamètre)
- c) Feuilles
- d) Fleurs
- e) Fruits



Figure II - 35 : Sécateur et scie à main pour découper les composantes



Figure II - 36 : Echantillon de branches (< 3 cm et $\geq$ 1 cm) avec l'étiquette pour le laboratoire



Figure II - 37 : Echantillon de branches fines (< 1 cm) avec l'étiquette pour le laboratoire



Figure II - 38 : Echantillon de feuilles avec l'étiquette pour le laboratoire

Pour les arbres de > 10 cm jusqu'à 30 cm DHP la méthode est moins détaillée : Il faut seulement couper les pièces du fût ou des branches avec moins de 7 cm diamètre avec tous leurs rameaux, incluant les feuilles, fleurs et fruits.



II.5.5 Peser la biomasse fraîche de ses composantes

Pour les arbres jusqu'à 10 cm DHP il faut peser sur une balance étalonnée toute la biomasse séparée pour les branches, branches fines, feuilles, fleurs et fruits.



Figure II - 39 : Pesée d'un échantillon de branches fines



Figure II - 40 : Exemple d'une balance suspendue électronique pour accrocher des poids jusqu'à 10 kg

Pour les arbres de > 10 cm jusqu'à 30 cm DHP il faut simplement peser les pièces du fût ou des branches avec moins de 7 cm diamètre avec toutes leurs rameaux, incluant les feuilles, fleurs et fruits.

Il est recommandé d'utiliser une balance suspendue (10 kg, précision 10 g, voire la photo en haut ou jusqu'à 50 kg) pour facilement peser les sachets de plastiques entiers, ou des branches avec rameaux.



II.5.6 Déterminer la biomasse sèche de ses composantes

- a) Pour les arbres jusqu'à 10 cm DHP il faut peser un échantillon (environ 500 g) des branches, branches fines, feuilles, fleurs et fruits, étiqueter le contenu et envoyer au laboratoire pour déterminer le poids sec.
Pour les arbres de > 10 cm jusqu'à 30 cm DHP il faut peser 5 échantillons (chacun d'environ 250 g) mixtes de différentes tailles de branches, feuilles, fleurs et fruits (Walker et al. 2012, p. 57).
- b) Au laboratoire les échantillons sont séchés complètement et puis pesés sur une balance très précise.



Figure II - 41 : Etiquetage des sacs destinés à contenir les différents échantillons



Figure II - 42 : Armoire de séchage au laboratoire

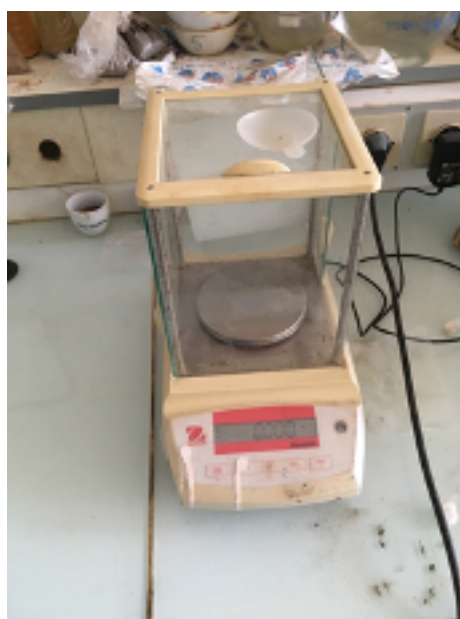


Figure II - 43 : Balance électronique de précision au laboratoire



- c) Après les poids pour les branches (diamètre entre 1 cm jusqu'à moins que 3 cm), les branches fines (diamètre moins que 1 cm), feuilles, fleurs et fruits sont entrées. La balance recommandée est une balance suspendue comme indiqué avant. La balance doit être étalonnée avec des poids chiffrés où avec une balance du laboratoire. Les biomasses doivent alors être corrigées avec le facteur de correction reçu de l'étalonnage. Cette procédure d'étalonnage est nécessaire pour s'assurer que les mesures des différents instruments sont alignées.

Dans le prochain formulaire, les données pour le laboratoire sont entrées :

File		Home		Insert	Draw	Page Layout	Formulas	Data	Review	View	Add-ins	Help		Nitro Pro 9	
Cut Copy Format Painter Clipboard		Calibri 11 A A <													

Figure II - 45 : Tableau en MS Excel avec les données pour le laboratoire saisi des échantillons des parcelles

Pour ces données, l'on prend des échantillons de bois, d'écorce, de branches, de branches fines, de feuilles, de fleurs et de fruits d'environ de 200-400 g. L'on va commencer avec les données pour identifier chaque arbre :

La date, le site avec son numéro, le nom du preneur de notes, les noms des membres d'équipe, le numéro courant de l'arbre et l'espèce d'arbre. Après on y met le numéro de la pièce du bois, qui est aussi inscrit sur la pièce avec un stylo à bille ou un stylo marqueur permanent. Au moins deux pièces de bois sont prises, une de la section la plus forte et une autre de la section la plus mince, pour savoir la gamme des poids spécifique. De chaque pièce on entre les valeurs du volume et (pour contrôle seulement) du poids. Les données du volume et du poids de l'écorce sont ajoutées. Pour les feuilles, fleurs et fruits il suffit d'entrer les poids des échantillons. Comme avant, les valeurs pesées doivent être corrigées si l'étalonnage montre une déviation significative.



II.6.1 Calculer les biomasses des composantes distinguées et les biomasses totales des arbres analysés

Le formulaire suivant permet de calculer les biomasses et stocks de carbone des différentes composantes des arbres mesurés.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1																												
2			Espèce:	AURIC	=	Acacia auriculiformis					Contenu de carbone du bois:				0.49	Source: Feldpausch et al., 2004, cités en ITTO 2006, p. 4.48												
3				MANG	=	Acacia mangium					Contenu de carbone feuilles:				0.47	Source: Feldpausch et al., 2004, cités en ITTO 2006, p. 4.48												
4											Contenu de carbone écorce:				0.48	Source: Estimation propre avec un valeur entre bois et feuilles												
5											Densité de l'écorce:				0.30	Valeur provisoire attendant le valeur du laboratoire												
6																												
7																												
8	Arbre	Espèce	H (m)	DHP (cm)	D1	D2	D3	D4	D5	D1	D2	D3	D4	D5	Total	Volume (m³)	Densité (g/cm³)	Biomasse sèche (kg)	Carbone (kg)	D1	D2	D3	D4	D5	Total	Densité (g/cm³)	Biomasse sèche (kg)	Carbone total (kg)
9	1	AURIC	3.1	2.1	367.8	1061.9				284.0	904.8				1188.8	0.0012	0.528	0.628	0.308	83.8	157.1	0.0	0.0		240.8	0.300	0.072	0.035
10	2	AURIC	2.9	2.3	447.6	0.0				348.5	0.0				348.5	0.0003	0.564	0.196	0.096	99.1	0.0	0.0	0.0		99.1	0.300	0.030	0.014
11	3	AURIC	4.5	3.2	1689.7	0.0				1335.1	0.0				1335.1	0.0013	0.436	0.582	0.285	354.6	0.0	0.0	0.0		354.6	0.300	0.106	0.051
12	4	AURIC	6.0	4.8	4247.4	18.5				3619.1	18.5				3637.6	0.0036	0.511	1.860	0.911	628.3	0.0	0.0	0.0		628.3	0.300	0.188	0.090
13	5	AURIC	3.7	2.4	558.0	0.0				437.8	0.0				437.8	0.0004	0.509	0.223	0.109	120.3	0.0	0.0	0.0		120.3	0.300	0.036	0.017
14	6	AURIC	3.0	2.1	42.8	0.0				33.0	0.0				33.0	0.0000	0.646	0.021	0.010	9.7	0.0	0.0	0.0		9.7	0.300	0.003	0.001
15	7	MANG	5.5	9.4	6407.7	6234.5	3971	1577	1282	5928.8	4751.7	3394.3	1270.0	1038.2	16383.0	0.0164	0.502	8.219	4.027	478.9	1482.8	576.8	306.9		2845.4	0.300	0.854	0.410
16	8	AURIC	3.6	6.1	6434.0	711.3				5654.9	489.8				6144.6	0.0061	0.641	3.940	1.931	779.1	221.5	0.0	0.0		1000.7	0.300	0.300	0.144
17	9	AURIC	4.5	4.2	3323.8	118.5				2268.2	103.7				2371.9	0.0024	0.683	1.619	0.793	1055.6	14.8	0.0	0.0		1070.4	0.300	0.321	0.154
18	10	MANG	4.5	4.2	9803.3	6636.6	3324	99.9		8370.8	5467.9	2770.9	86.3		16695.9	0.0167	0.594	9.910	4.856	1432.6	1168.7	552.9	13.6		3167.8	0.300	0.950	0.456

Figure II - 46 : Calcul des volumes, biomasses et stocks de carbone du bois et de l'écorce en MS Excel

D'abord nous voyons la catégorie « bois » (= Tronc et branches ≥ 3 cm diamètre sur écorce) :

Pour toutes les sections, le volume du bois avec écorce

$$\text{Vol1Dx} = H \times \pi/4 \times \text{DHP}^2$$

et le volume sans écorce

$$\text{Vol2Dx} = H \times \pi/4 \times (\text{DHP} - 2 \times \text{Epaisseur d'écorce})^2$$

sont calculés. Le total du volume du bois sans écorce est ensuite multiplié avec la densité du bois (obtenu du laboratoire) pour connaître la biomasse sèche du bois, et en multipliant avec un facteur (0,49) obtenu de la littérature (IPCC 2023), on obtient la masse du carbone.

Ensuite, le volume de l'écorce est calculé pour toutes les sections comme différence entre Vol1Dx et Vol2Dx. La somme de toutes les sections est le volume de l'écorce de la catégorie « bois ». Une multiplication du volume de l'écorce avec la densité de l'écorce (obtenu du laboratoire) donne la biomasse sèche de l'écorce, et une autre multiplication avec un facteur du contenu de carbone, estimé à base des valeurs de la littérature, donne la masse du carbone de l'écorce.

Avec le formulaire suivant on calcule la biomasse sèche et le carbone pour les catégories branches, branches fines, feuilles, fleurs et fruits.



AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT
ne des branches et branches fines = contenu de carbone du bois															
ne des fleurs et des fruits= contenu de carbone des feuilles															
lon l'étalonnage de la petite balance:															
lon l'étalonnage de la grande balance:															
Biomasse sèche (kg)		Branches fines (<1 cm)				Feuilles				Fleurs					
Biomasse sèche (kg)	Carbone (kg)	Biomasse fraîche (kg)	Facteur de l'humidité	Biomasse sèche (kg)	Carbone (kg)	Biomasse fraîche (kg)	Facteur de l'humidité	Biomasse sèche (kg)	Carbone (kg)	Biomasse fraîche (kg)	Facteur de l'humidité	Biomasse sèche (kg)	Carbone (kg)	Biomasse fraîche (kg)	Facteur de l'humidité
0.435	0.213	0.690	0.500	0.345	0.169	1.873	0.500	0.937	0.440	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
0.321	0.157	0.596	0.500	0.298	0.146	1.218	0.500	0.609	0.286	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
0.360	0.176	0.555	0.500	0.277	0.136	1.346	0.500	0.673	0.316	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
0.698	0.342	1.595	0.500	0.798	0.391	3.748	0.500	1.874	0.881	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
0.460	0.225	0.598	0.500	0.299	0.147	1.204	0.500	0.602	0.283	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
0.295	0.145	0.456	0.500	0.228	0.112	0.524	0.500	0.262	0.123	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
2.449	1.200	7.025	0.500	3.513	1.721	12.515	0.500	6.258	2.941	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
1.808	0.886	2.700	0.500	1.350	0.662	7.382	0.500	3.691	1.735	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.535
0.233	0.114	1.370	0.500	0.685	0.336	2.966	0.500	1.483	0.697	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000
2.026	0.992	3.257	0.500	1.629	0.798	4.182	0.500	2.091	0.983	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000

Figure II - 47 : Calcul des biomasses et stocks de carbone des branches, branches fines, feuilles, fleurs et fruits en MS Excel

Les données de la biomasse fraîche mesurée au champ sont multipliées avec le facteur de l'humidité (= poids secs reçus du laboratoire / poids frais de la biomasse) pour obtenir la biomasse sèche. La biomasse sèche est ensuite multipliée avec un facteur du carbone obtenu de la littérature, pour calculer le poids du carbone de chaque catégorie.

Finalement, la biomasse et la masse du carbone des arbres sont calculées avec les sommes des biomasses et des valeurs de carbone des catégories bois, écorces, branches, branches fines, feuilles, fleurs et fruits. Les dernières colonnes offrent des informations sur les stocks de biomasse, carbone et le dioxyde de carbone (CO₂) par hectare, en supposant un certain nombre de tiges par hectare.



AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE
Relation BGB-AGB		0.56						
pour les forêts tropicales sèches avec une biomasse aérienne de <20 tonnes / ha								
		0.28		> 20 tonnes /ha				
Source: Mokany et al., 2006 cités en IPCC 2006. p. 4.49								
Valeurs totales								
Valeurs par arbre (kg)					Valeurs par hectare (t/ha)			
Biomasse aérienne	Biomasse souterraine	Biomasse totale	Carbone	CO ₂	Nombre d'arbre/ha	Biomasse	Carbone	CO ₂
2.42	1.35	3.77	1.81	6.63	1222	4.61	2.21	8.11
1.45	0.81	2.27	1.09	3.99	1222	2.77	1.33	4.88
2.00	1.12	3.12	1.50	5.49	1000	3.12	1.50	5.49
5.42	3.03	8.45	4.06	14.88	1000	8.45	4.06	14.88
1.62	0.91	2.53	1.21	4.45	1000	2.53	1.21	4.45
0.81	0.45	1.26	0.61	2.22	1000	1.26	0.61	2.22
21.29	5.96	27.25	13.08	47.97	1000	27.25	13.08	47.97
11.36	6.36	17.72	8.50	31.18	1000	17.72	8.50	31.18
4.34	2.43	6.77	3.25	11.92	1000	6.77	3.25	11.92
16.61	9.30	25.90	12.43	45.59	1120	29.01	13.93	51.06

Figure II - 48 : Calcul de la biomasse, du stock de carbone et du CO₂ séquestré par arbre et par hectare

Avec des facteurs pour la relation de la biomasse souterraine (BS) avec la biomasse aérienne (BA) pour les forêts tropicales sèches, cités après Mokany et al. (2006) en IPCC (2006) la biomasse souterraine peut être estimée. La somme des biomasses aériennes et souterraines est la biomasse totale. On voit que les arbres de 2 ans ont des poids de 2-3 kg et les arbres de 3 ans pèsent déjà jusqu'à 27 kg. Avec un facteur de 0.48 pour le teneur en carbone (moyen des facteurs pour le bois et pour les feuilles) le poids de carbone peut être calculé et avec une multiplication par 44/12, le poids de CO₂.

Pour terminer, l'impact de la plantation sur un hectare de surface est calculé en multipliant les valeurs des arbres avec le nombre d'arbres par hectare. On voit la grande hétérogénéité produite par cette extrapolation des valeurs des arbres individuels à un hectare.



II.6.2 Analyser les relations polynomiales entre DHP et biomasse et entre H et biomasse, montrant les résultats dans les graphiques indiquant l'algorithme et le facteur de corrélation (R²)

Un modèle de régression non linéaire sera appliqué car la relation entre la variable prédictive (diamètre de la tige ou hauteur totale de l'arbre) et la variable de réponse (biomasse aérienne des arbres) ne suit généralement pas un modèle linéaire. Il convient de suivre les étapes ci-après pour créer un tel modèle dans MS Excel :

1. Définissez deux colonnes avec les valeurs du DHP dans la première et les valeurs de la biomasse dans la seconde et mettez-les en évidence
2. Sur le ruban supérieur de la feuille de calcul, cliquez sur : 'Insérer', 'Graphiques' et 'Scatter'
3. Cliquez sur le signe '+' dans le coin supérieur droit du graphique (diagramme de dispersion ou nuage de points) créé
4. Dans le menu déroulant qui apparaît, cliquez sur la flèche à droite de la ligne de tendance et cliquez sur 'Plus d'options'
5. Cliquez sur 'Polynôme' et cochez les cases 'Afficher l'équation sur le graphique' et 'Afficher la valeur R au carré sur le graphique'
6. Ajoutez des étiquettes aux axes et au titre du graphique.

Avec ceci, en utilisant les 8 arbres *Acacia auriculiformis* et les 4 arbres d'Hybride (*Acacia mangium* & *A. auriculiformis*) où la BA a été analysé, le graphique suivant est créé. Notez qu'en variant l'ordre du polynôme, il peut être possible de trouver une courbe qui s'adapte encore mieux aux données. La qualité de l'ajustement est exprimée par la valeur R² qui exprime le pourcentage de la variation de la variable de la biomasse qui est expliquée par la variable du diamètre (ou dans le graphique suivant : la hauteur). Dans le cas présent, avec R² = 0,9525, environ 95 % de la variation de la biomasse est expliquée par la variable diamètre de la tige du modèle. Il s'agit d'un excellent ajustement et, avec un ordre de 2, l'algorithme reste également assez simple. Comme nous l'avons vérifié, les ordres supérieurs n'améliorent pas l'ajustement de manière significative.

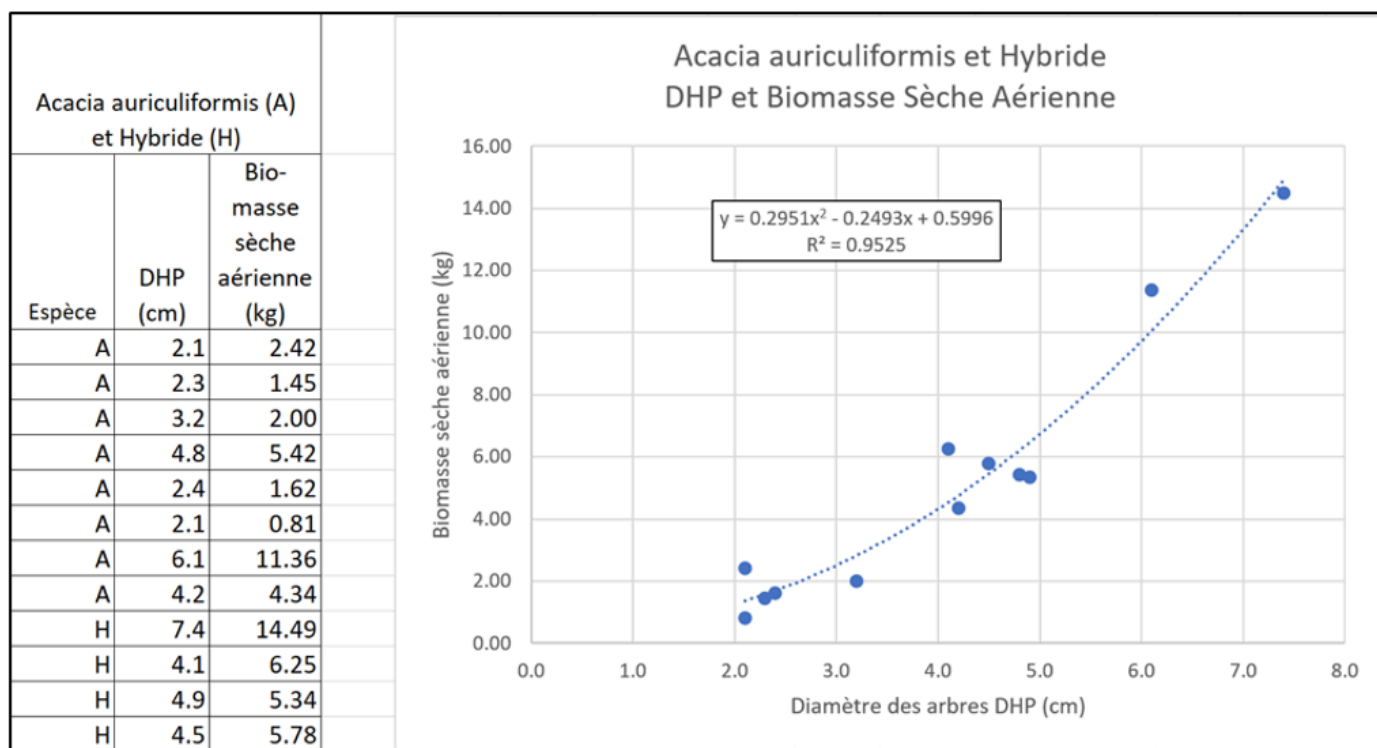


Figure II - 49 : Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre diamètres DHP et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia auriculiformis et Hybride

Notez que le modèle est limité à la plage de diamètres 2,1 - 7,4 cm et que le logiciel utilise des points décimaux. La même procédure est répétée pour créer un modèle de régression non linéaire reliant la hauteur de l'arbre avec la BA. Ici, seulement 7 valeurs d'Acacia auriculiformis ont pu être utilisées, car un arbre manifestant une valeur aberrante (l'arbre n° 8 avec DHP 6,1 et une hauteur douteuse de 3,6 m) a dû être exclu de l'évaluation. Avec un ajout des 4 arbres Hybrides, le modèle est limité à la plage d'hauteurs 2,9 - 7,5 m.

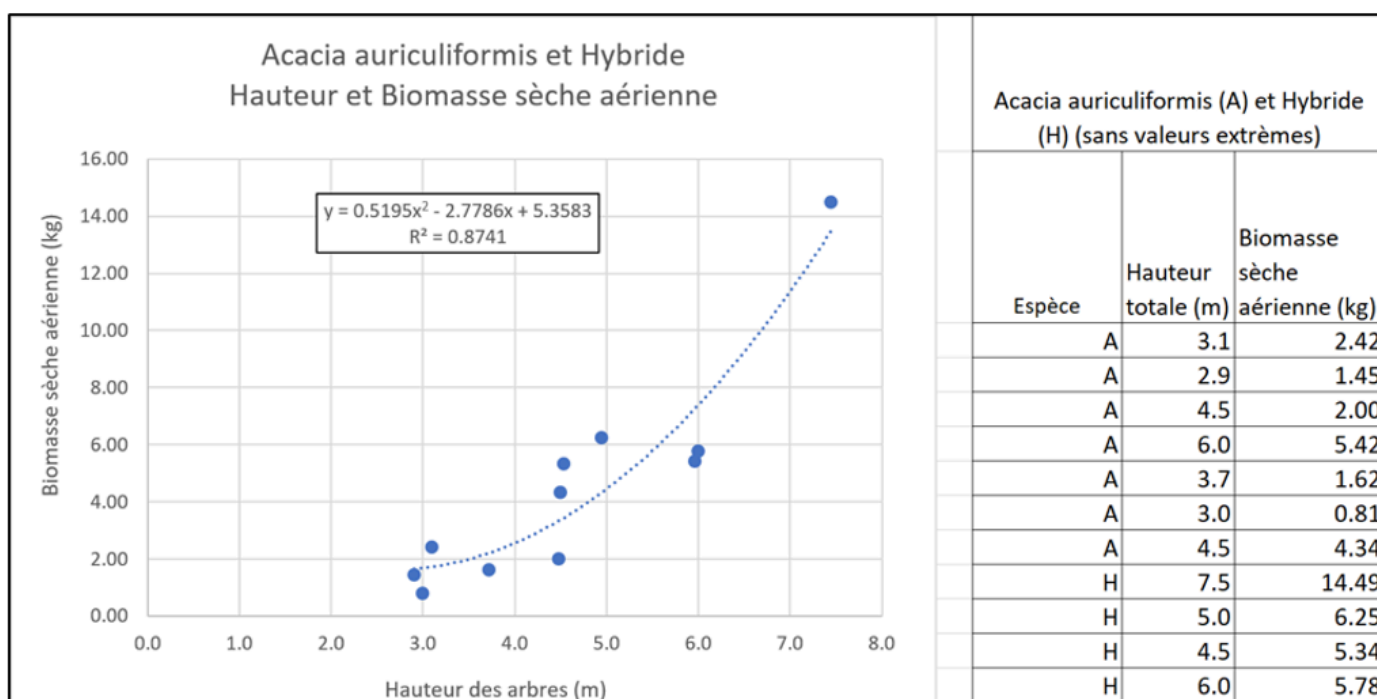


Figure II - 50 : Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre hauteurs totales et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia auriculiformis et Hybride



Le R² résultant de 0,8741 est bien acceptable et pourrait possiblement être amélioré en incluant quelques arbres supplémentaires. La relation entre la hauteur totale des arbres et la BA est particulièrement utile pour l'analyse des hauteurs d'arbres obtenues par télédétection.

Pour les 8 arbres d'Acacia mangium analysés, les corrélations du diamètre DHP avec la biomasse aérienne (0,9509) et la hauteur totale des arbres avec la biomasse aérienne (0,8538) ont donnés des facteurs de régression satisfaisant comme on peut le voir sur les graphiques suivants :

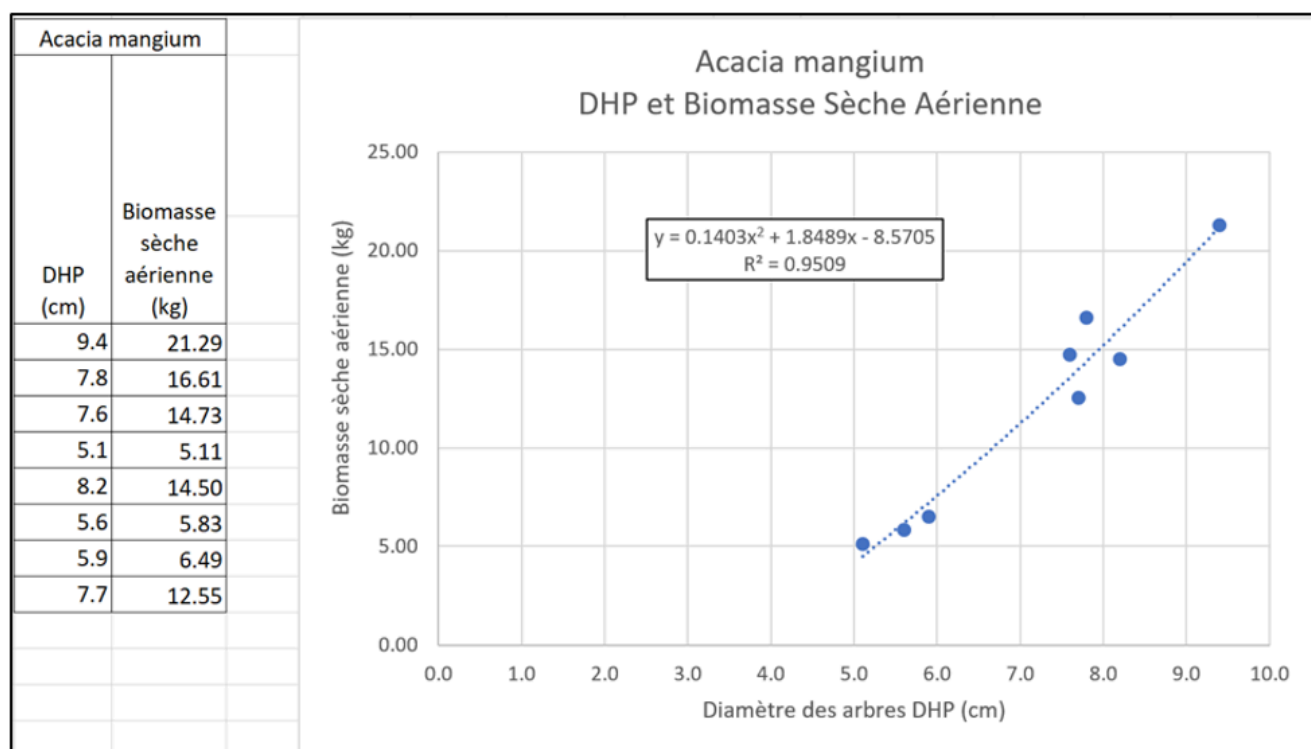


Figure II - 51 : Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre diamètres DHP et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia mangium



La gamme de diamètres DHP pour lesquels le modèle est valide est de 5,1 - 9,4 cm.

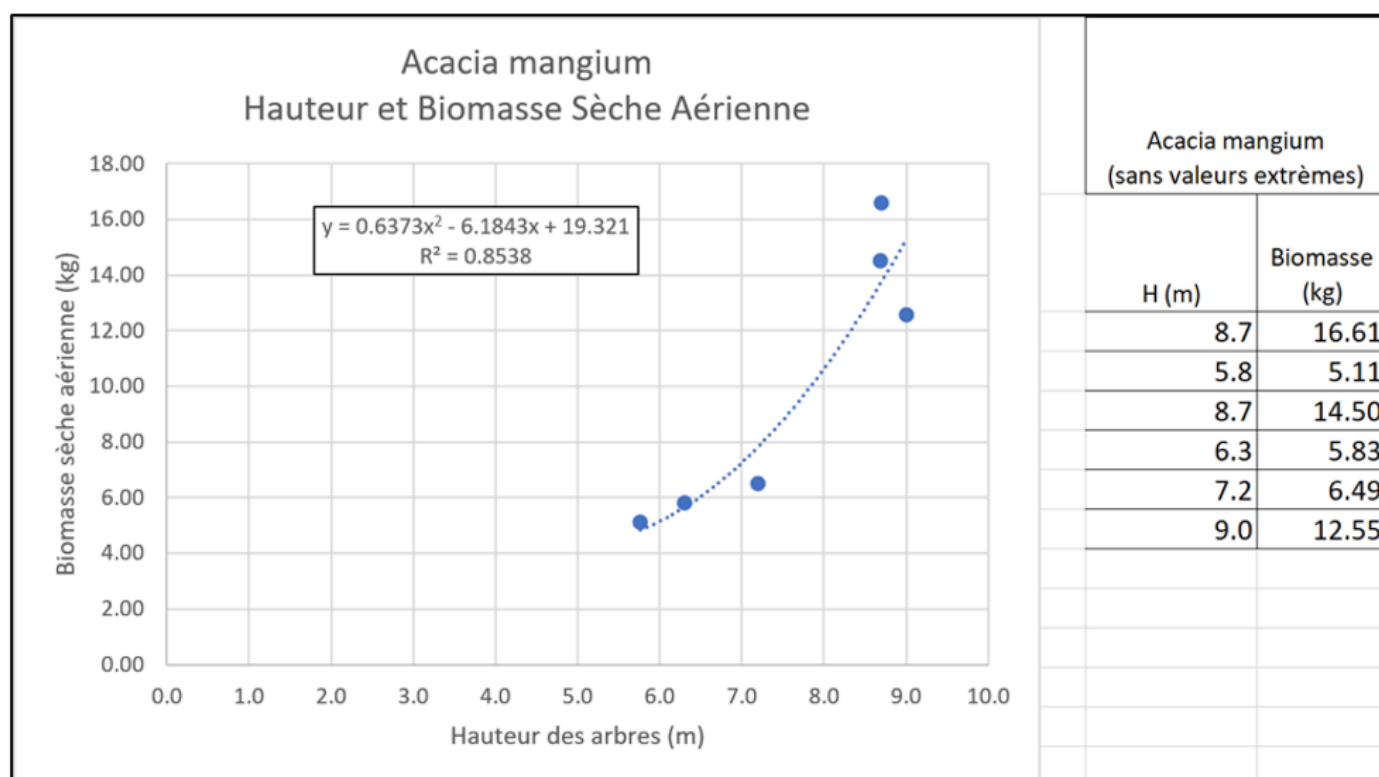


Figure II - 52 : Algorithme valeur numérique et diagramme de la corrélation entre hauteurs totales et biomasses sèches aériennes des arbres d'Acacia mangium

On peut noter que la corrélation de la hauteur des arbres avec leur biomasse est un peu moins étroite que celle du diamètre, aussi parce qu'on pourrait seulement utiliser les données de 6 arbres (exclusion de données aberrantes). Dans le cas présent, la gamme des hauteurs valide est de 5,8 - 9,0 m.



II.7 Mesure des données d'activité

La mesure des données d'activité commence par la sélection des parcelles adaptées à la plantation d'Acacia. Après l'établissement de la parcelle, la géométrie de la parcelle est mesurée et stockée dans une géodatabase. Les différentes étapes sont décrites ci-dessous.

II.7.1 Enregistrement initial d'une parcelle

La première phase de collecte des données d'activité commence avant l'établissement de la plantation. Cette première phase de mesure est appelée phase de validation. Cela est important pour s'assurer qu'il n'y a pas de déforestation non planifiée ou de perte significative de carbone associée au défrichement de la parcelle. En fonction des résultats de ces mesures, une parcelle proposée pour la plantation d'acacias peut être rejetée, au cas où il y aurait une déforestation ou un bilan carbone négatif associé à l'établissement de la plantation. La parcelle type choisie est celle qui a été en jachère pendant plusieurs années et qui doit maintenant être défrichée et replantée pour un nouveau cycle de culture.

Face à une jachère qui aura duré sensiblement 6 ans, les différentes étapes majeures de transformation des terres avant l'introduction de l'acacia dans les parcelles soumises au projet :

- Temps T0 : Tous les herbes sont coupées ou brûlées (désherbage)
- Temps T1 : Mise en place des buttes d'igname
- Temps T2 : Outre les arbustes et les arbres ayant une utilisation particulière pour la population, qui sont épargnés, tous les autres arbustes présents sur la parcelle qui gêneraient par leur ombrage la croissance des ignames, sont brûlés. Ces arbustes brûlés sont soit laissés sur pied et utilisés comme des tuteurs pour la croissance de l'igname ou coupés pour le bois de chauffage.
- Temps T3 : Introduction de plantule d'acacia (planting)
- Temps T4 : Nettoyage régulier de la parcelle jusqu'au retrait des ignames :
 - Année 1 de planting d'acacia : association avec l'igname
 - Année 2 de planting d'acacia : association avec l'arachide, le maïs, le haricot, etc. ;
- Temps T5 : Introduction du manioc sur la parcelle, marquant le début de la jachère

Il s'agit là d'un résumé général, et les différentes étapes peuvent varier d'un cas à l'autre.

Les photos de la Figure II - 53 montrent une parcelle, qui a déjà subi le premier traitement de défrichage (brûlage et enlèvement des herbes), et une parcelle voisine qui n'est pas encore préparée.

La parcelle déjà préparée et en T1 a été photographiée depuis ses quatre coins en regardant vers l'intérieur (Figure II - 54). Ces photos sont automatiquement géoréférencées par le GPS de l'appareil photo du téléphone, et les étoiles de la Figure II - 55 indiquent les endroits où les photos ont été prises. L'image satellite a été obtenue par la constellation de satellites Planet Dove et a été obtenue peu de temps après que les photos de terrain ont été prises.



Il est recommandé que pendant la phase de validation (c'est-à-dire avant la plantation et l'enlèvement des arbres), de telles photos géoréférencées soient prises pour documenter l'état de la parcelle avant la plantation (voir II.7.2).



Figure II - 53 : Vue des parcelles voisines. À gauche : parcelle déjà brûlée où les petits arbres sont tués avant de commencer à cultiver ; à droite : parcelle destinée à être cultivée au cours du prochain cycle, où les activités de défrichage n'ont pas encore commencé



Figure II - 54 : Photographies géoréférencées des quatre coins de la parcelle prises lors de la visite sur le terrain. Les numéros renvoient aux numéros de la carte en Figure II 55

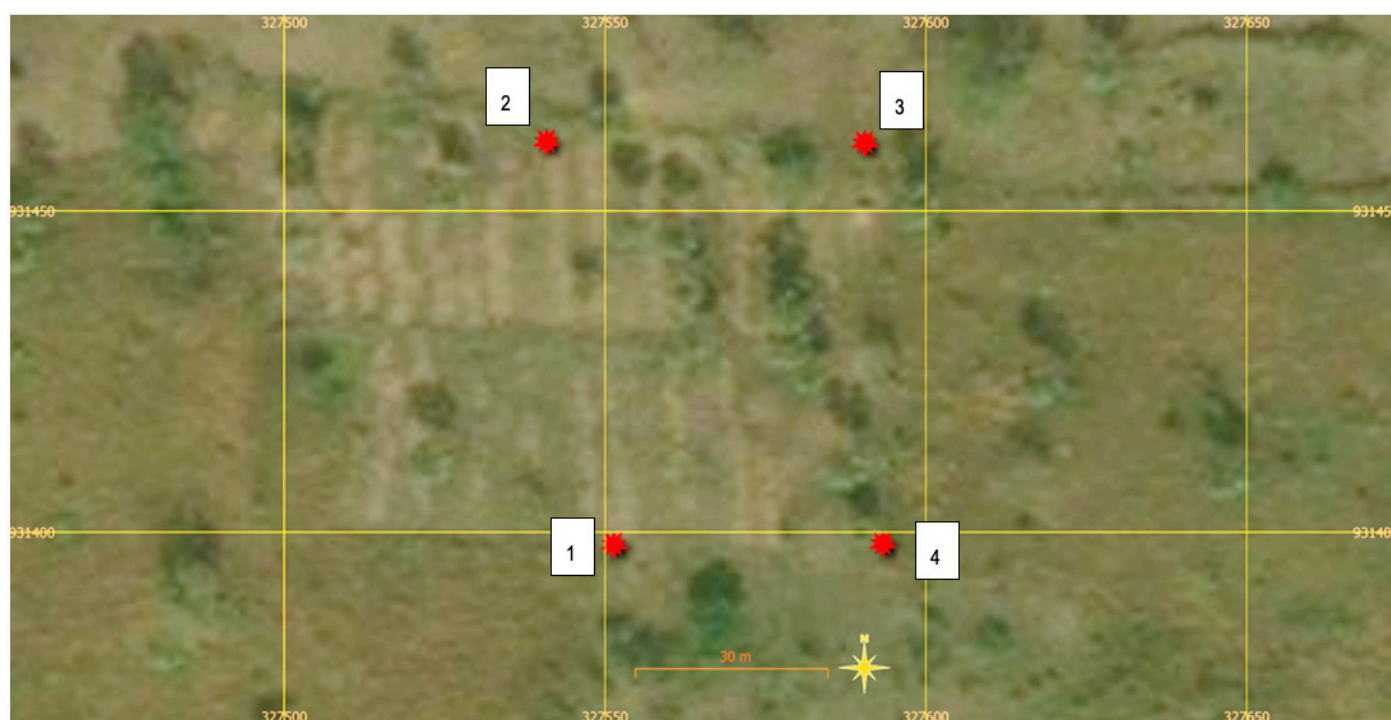


Figure II - 55 : Image satellite de la parcelle visitée avec les emplacements des photographies des quatre coins (étoiles rouges) prises lors de la visite de terrain. Les numéros se réfèrent aux photos prises. Les coordonnées sont en UTM, zone 30 N

Les arbres préexistants sont enregistrés, afin de vérifier si des effets négatifs sur le carbone sont à attendre des activités de préparation du site. L'effet de la coupe des arbres est illustré dans la Figure II - 56. Nous supposons ici un nombre de 1 à 20 arbres de différents diamètres sur une parcelle hypothétique de 1 ha, et nous le comparons à la biomasse d'une plantation d'acacias âgée de trois ans, bien établie et densément plantée, qui atteint une biomasse d'environ 10 t/ha.

Le graphique (Figure II - 56) montre qu'un nombre relativement faible de grands arbres peut avoir une biomasse comparable ou supérieure à celle des plantations d'acacias denses, avec des arbres encore jeunes dont le diamètre à hauteur de poitrine est généralement inférieur à 10 cm. Ce graphique a été modélisé à partir des données mesurées sur le terrain pour les acacias et en utilisant l'équation allométrique de ce manuel (voir chapitre II.3.2).

Il est donc évident que l'élimination d'un nombre même restreint de grands arbres aura un impact négatif sur le bilan carbone d'une plantation d'acacias.

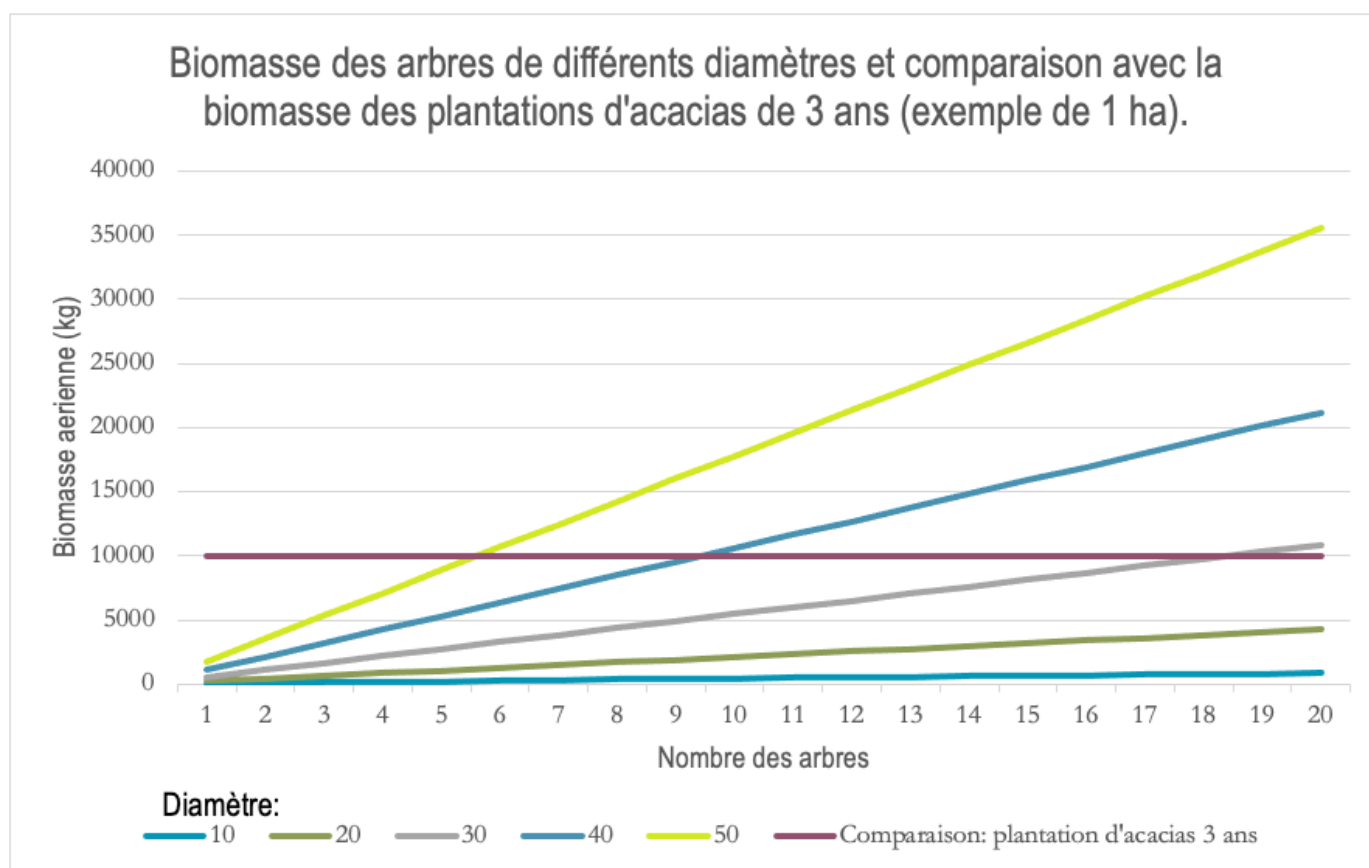


Figure II - 56 : Biomasse accumulée des 1 à 20 arbres de différents diamètres et comparaison avec la biomasse des plantations d'acacias 3 ans (exemple de 1 ha)

Un résultat d'une campagne de mesure sur le terrain est l'observation d'une forte mortalité des acacias sur certaines parcelles. L'introduction d'une diversité d'espèces autochtones dans le model de plantation (actuellement une monoculture des acacias allochtones), les visites de suivi, les mesures d'entretien et la formation des agriculteurs pourraient potentiellement réduire cette mortalité et donc augmenter les stocks de carbone. Pour suivre les stocks de carbone, il est également recommandé de visiter les parcelles pendant le cycle de plantation.

Par conséquent, les visites suivantes supplémentaires seront effectuées :

1. Une visite annuelle de suivi et évaluation
2. Avant de la récolte
3. Après la récolte, avant l'installation du prochain cycle de plantation.

En résumé, les visites qui vont suivre sur la parcelle ont été identifiées au cours du premier cycle de plantation :

1. Phase de validation :
 - a) Questionnaire / visite initiale
2. Phase de plantation :
 - a) Cartographie de la parcelle / 1ère visite de suivi
 - b) 2ème visite de suivi (2ème année)
 - c) 3ème visite de suivi (3ème année)
 - d) Visite avant la récolte
 - e) Visite après la récolte



II.7.2 Liste des mesures à documenter

Les données suivantes doivent être incluses, chaque observation doit être accompagnée par une date :

Tableau II - 3 : Données d'activité et données supplémentaires collectées dans les différentes phases de plantation

Attribut	Phase
Date de chaque visite	
Commentaires/Observations	
Végétation précédente : Anacarde, cultures annuelles, bois, savane, etc.	Validation
Prendre une photo de chaque coin de la parcelle (photo géoréférencé)	Validation
Nombre des arbres grands (dhp > 10 cm)	Validation
Estimation de la superficie de la parcelle	Validation
Tipe de parcelle proposée : plantation d'acacia (=jachère) ou reconversion d'ancien vergée d'anacarde	Validation
Identification unique de la parcelle	Validation
Biomasse enlevée avant plantation : Numéro et diamètre des arbres	Validation
Date de la plantation	Plantation
Mesure de la superficie d'Acacia plantée	Plantation
Haie vive espèce plantée	Plantation
Nombre et espèce des arbres acacia plantées	Plantation
Cultures agricoles utilisées année 1	Plantation (visite annuelle)
Cultures agricoles utilisées année 2	Plantation (visite annuelle)
Traitement d'engrais : Type d'engrais, quantité d'engrais	Plantation (visite annuelle)
Mortalité des arbres : - pourcentage, - cause	Plantation (visite annuelle)
Registrer la replantation des arbres mortes - Quantité par espèce de remplacement - Date de remplacement	Plantation (visite annuelle)
Registrer la perte des autres arbres (quantifier des arbres non-acacia)	Plantation (visite annuelle)
Infestations (parasites, etc.)	Plantation (visite annuelle)
Quantité des arbres morts - acacia - non-acacia	Plantation (récolte)
Quantité des arbres récoltes - acacia - autres espèces - date	Plantation (récolte)
Quantités des arbres acacia et non-acacias plantées qui restent	Plantation (récolte)



Compter et documenter dans la base de données et avec photos sur les futures parcelles le nombre de grands arbres d'un diamètre supérieur de 10 cm est essentiel pour vérifier avant la plantation qu'entretemps l'agriculteur n'a pas déboisé plus que le projet peut surpasser avec la biomasse plantée.

Tableau II - 4 : Fiche de collecte des données sur les arbres préexistants et les arbres laissés après le défrichement d'une parcelle

Nom du collecteur :				
Date :				
Zone (Département) :				
Lieu (Village) :				
Personne ressource :				
Nom du producteur :				
Type de parcelle (année, âge) :				
Superficie de parcelle :				
Numéro de parcelle :				
Description de la parcelle :				
		Arbres existants	Arbres laissés	
DHP 10-30 cm				
DHP 30-50 cm				
DHP > 50 cm (avec coordonnée GPS)				
GPS		Diamètre (cm)	Espèce	Laissé (oui/non)
Lat	Lon			



II.7.3 Cartographie des parcelles agroforestières

La levée de parcelles agroforestières se fait juste après la plantation d'acacia dans les parcelles agricoles des paysans engagés. Généralement, la plantation des plantules se fait partir du début de la saison de pluies à partir de mi-mars pour la zone de Dabakala jusqu' à mi-octobre.

La levée des parcelles agroforestières se fait au moyen d'un récepteur GPS compatible avec le système GLONASS allant jusqu'à une précision de 1,5 mètre.

Dans la pratique, l'option Tracé du GPS est choisie pour la délimitation. Ainsi, les agents parcourent les parcelles agroforestières avec leur récepteur GPS en choisissant un point de départ au hasard jusqu'à revenir au point initial. Le temps estimé pour effectuer la délimitation d'une parcelle moyenne (1 ha) est de trente minutes maximum en fonction des obstacles rencontrés sur le terrain (Broussaille, ambiguïté des limites du champ, etc.).

A la fin du parcours de chaque parcelle, les agents procèdent sur place à partir du GPS à l'enregistrement des fichier GPX en leur attribuant une codification décrite comme suite :

- ID opérateur : Constitué des trois premières lettres de l'animateur ayant fait la levée ;
- ID village : Constitué de quatre lettres alphanumériques ;
- ID adhérent : Composé de quatre chiffres incrémentaux ;
- Num. Parcelle : représente le numéro de la parcelle dans le village. Ce numéro composé de trois chiffres sera également incrémental chaque fois dans un village ;
- Année plantation : correspond à l'année à laquelle les plantules ont été plantées.

Par la suite, toutes les données GPX encodées sont récupérées par le responsable SIG pour en assurer le traitement cartographique (Nettoyage des polygones, correction des formes, etc.) dans le logiciel QGIS.

A l'issue du traitement, les fichiers shapefiles sont enregistrés dans le Geodatabase du système MNV.

II.8 Informations et matériel additionnel pour Volume 1

II.8.1 Exemple des données du terrain et du calcul des résultats

Voire logiciel Excel séparé du document: Mesure arbres parcelles Dabakala et Kong_2023.04.07.
(voir annexe <https://changementsclimatiques.gouv.ci/bdcc/index.php/document-notification>)

II.8.2 Pièces d'Equipement pour la Mesure

Instruments utilisés	Instruments alternatifs	Remarques
GPS		
Boussole (pour établir les lignes de mesures)		
Ruban mètre (50 m)	Télémètre (pour la distance dans les parcelles et aux arbres)	Un télémètre rendra le travail plus efficace



Ruban à diamètre (5 m, prestation personnelle)	Compas forestier (pour le diamètre des arbres et du bois mort debout et surtout couché)	Recommandation d'acheter 2 compas forestiers (60 cm) et 5 rubans acier à diamètre (5 m)
Mètre (pliant) avec 2 fils à plomb (en absence d'un compas forestier pour le bois mort couché)		(Voir Figure II-12)
Barre télescopique forestière de fabrication locale	Dendromètre laser ou mécanique (pour la hauteur des arbres)	Recommandation d'acheter deux instruments pas trop sophistiqués (de bon marché)
Dendromètre laser (prestation personnelle)	Clinomètre (pour les terrains en pente et la hauteur des arbres)	Recommandation d'acheter deux instruments pas trop sophistiqués (de bon marché)
Pied à coulisse (pour les diamètres inférieurs à 5 cm)		
Cadre d'échantillonnage de 120 * 120 cm de tubes PVC de fabrication locale (végétation non-arborescente)		(Voir Figure II-7)
Tronçonneuse		
Scie à main		(Voir Figure II-35)
Sécateur		(Voir Figure II-35)
Balance mécanique de 5 kg	Balance suspendue électronique de 10 kg avec une précision de 10 g (voir Figure II-40)	Recommandation d'acheter deux instruments. Dans les prochaines années on pourra aussi acheter ces balances jusqu'à 20 ou 30 kg
Balance électronique de 500 g		(Voir Figure II-40)
Cadre d'échantillonnage de 50 x 50 cm en bois de fabrication locale (litière)		(Voir Figure II-14)
Carottier de sol (30 cm de profondeur) de fabrication locale		(Voir Figure II-15)
Pioche et pelle (pour libérer le carottier)		



II.8.3 Exemple d'Utilisation d'un Dendromètre (NIKON Forestry 550)

Distance linéaire

- Bouton d'alimentation: activé
- Bouton Mode: appuyez jusqu'à ce que Act - m - Dst s'affiche
- Pointez sur la cible (entre 10 m et 500 m, angle 0-89° +/-)
- Appuyez à nouveau sur le bouton d'alimentation: la distance linéaire en mètres est alors donnée avec une décimale

Distance horizontale

- Bouton d'alimentation: activé
- Bouton Mode: Appuyez jusqu'à ce que Hor - m - Dst s'affiche
- Pointez sur la cible (entre 10 m et 500 m, angle 0-89° +/-)
- Appuyez à nouveau sur le bouton d'alimentation: la distance horizontale en mètre est alors donnée avec une décimale
- Hauteur par rapport à l'horizontale (niveau des yeux de la personne qui mesure)
- Bouton d'alimentation: activé
- Bouton Mode: Appuyez jusqu'à ce que Hgt - m - Dst s'affiche
- Pointez sur la cible (entre 10 m et 500 m, angle 0-89° +/-)
- Appuyez à nouveau sur le bouton d'alimentation: la hauteur en mètre par rapport à l'horizontal est alors donnée avec une décimale

Angle

- Bouton d'alimentation: activé
- Bouton Mode: appuyez jusqu'à ce qu'Ang s'affiche
- Pointez sur la cible (entre 10 m et 500 m, angle 0-89° +/-)
- Appuyez à nouveau sur le bouton d'alimentation: l'angle par rapport à l'horizontal en degrés est alors donné sans décimale, mais sur l'écran, le degré d'angle est affiché avec une décimale.

Hauteur totale

- Bouton d'alimentation: activé
- Bouton Mode: appuyez jusqu'à ce que Hgt (clignotant !) - m - Dst s'affiche
- Point à l'extrémité inférieure de la cible (entre 10 m et 500 m, angle 0-89° +/-)
- Appuyez à nouveau sur le bouton d'alimentation: puis une hauteur en mètre par rapport à l'horizontal, et height2 clignote
- Point à l'extrémité supérieure de la cible (entre 10 m et 500 m, angle 0-89° +/-)
- Appuyez à nouveau sur le bouton d'alimentation: la hauteur totale en mètre est alors donnée avec une décimale

Note : Le model Nikon Forestry 550 Laser Rangefinder date de 2008. Le modèle actuel est le Nikon Forestry Pro II Laser Rangefinder/Hypsometer

SECTION III

ANALYSE DES DONNÉES DE TERRAIN COLLECTÉES SUR LES PARCELLES AGROFORESTIÈRES POUR L'ESTIMATION DU BILAN CABONE

MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 2

AUTEUR : Gernot Ruecker





SECTION III: ANALYSE DES DONNÉES DE TERRAIN COLLECTÉES SUR LES PARCELLES AGROFORESTIÈRES POUR L'ESTIMATION DU BILAN CARBONE MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 2

III.1 À propos de ce volume

Ce manuel décrit et guide les utilisateurs dans l'analyse des données de stock de biomasse collectées sur le terrain à l'aide d'un script d'évaluation automatisé.

Il permet de dériver des facteurs d'émission/absorption à utiliser en combinaison avec les données d'activité pour estimer le bilan carbone des parcelles agroforestières.

III.1.1 Objectif spécifique

Ce volume du manuel est une documentation sur les méthodes utilisées et un instrument de formation. Il vise à mettre à disposition les méthodes utilisées pour évaluer les données de terrain collectées lors de la campagne d'échantillonnage de terrain pour le MNV agroforestier local de la région de la Comoé.

Les méthodes de terrain utilisées pour collecter les échantillons et les formules utilisées pour convertir les mesures en estimations de la densité de carbone en tonnes par hectare ont été documentées dans le premier volume du manuel de l'utilisateur MNV.

Le volume final décrit les méthodes de calcul de la biomasse aérienne (BA, AGB en anglais) des acacias à l'aide d'images à haute résolution obtenues par télédétection (voir SECTION IV).

III.1.2 Public visé

Cette section s'adresse aux acteurs qui sont actuellement ou potentiellement impliqués dans la gestion des données dans le système MNV agroforestier ivoirien. Il s'adresse en particulier au personnel technique du MINEDDTE-DLCCTE et ANADER.

Le manuel se réfère à des données agroforestières provenant de plantations d'acacias dans la région de la Comoé, en particulier de jeunes acacias âgés de 1 à 3 ans (*Acacia auriculiformis*, *Acacia mangium* et hybrides de ces deux espèces). Le paysage est hétérogène et comprend des parcelles de végétation d'arbres, de buissons et d'herbes avec une densité de couverture d'arbres variable.

Ce manuel peut donc intéresser d'autres personnes travaillant sur écosystèmes agroforestiers.



III.2 Flux de travail

Dans l'étude sur le terrain, la méthodologie comprenait les phases (à gauche), les étapes (au centre) et les méthodes ou outils (à droite) suivants :

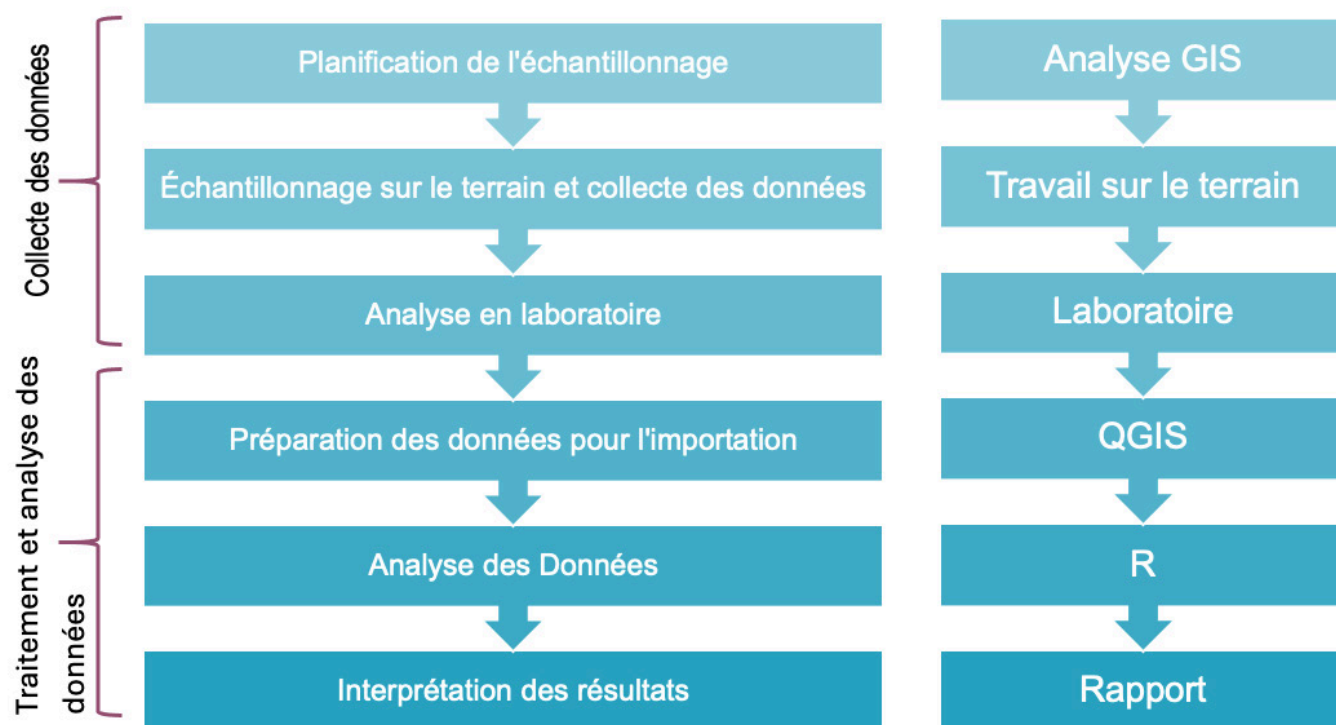


Figure III - 1 : Flux de travail pour la collecte et le traitement des données de terrain

Ce manuel traite des étapes de l'importation et l'analyse des données. Les méthodes de terrain sont décrites dans le manuel de l'utilisateur, volume 1 SECTION II.

III.3 Saisie et préparation des données

Après la saisie des données avec QField, les données sont importées dans la base de données à l'aide de QGIS. Un plugin QGIS a été développé à cet effet, qui permet de lire les données de manière largement automatique.

Tout d'abord, les données sont importées de QField sur un PC, comme décrit dans le chapitre II.4.3 Guide pour le transfert des données QField vers un PC. Ensuite, le fichier « data.gpkg » peut être partagé par e-mail ou par transfert de fichiers.

Les données sont ensuite ajoutées au système par un administrateur MNV.



III.3.1 Installation de l'extension de QGIS

L'extension est fournie sous forme de fichier zip. Dans le menu « Extensions » de QGIS, il faut sélectionner « Installer/Gérer les extensions ».

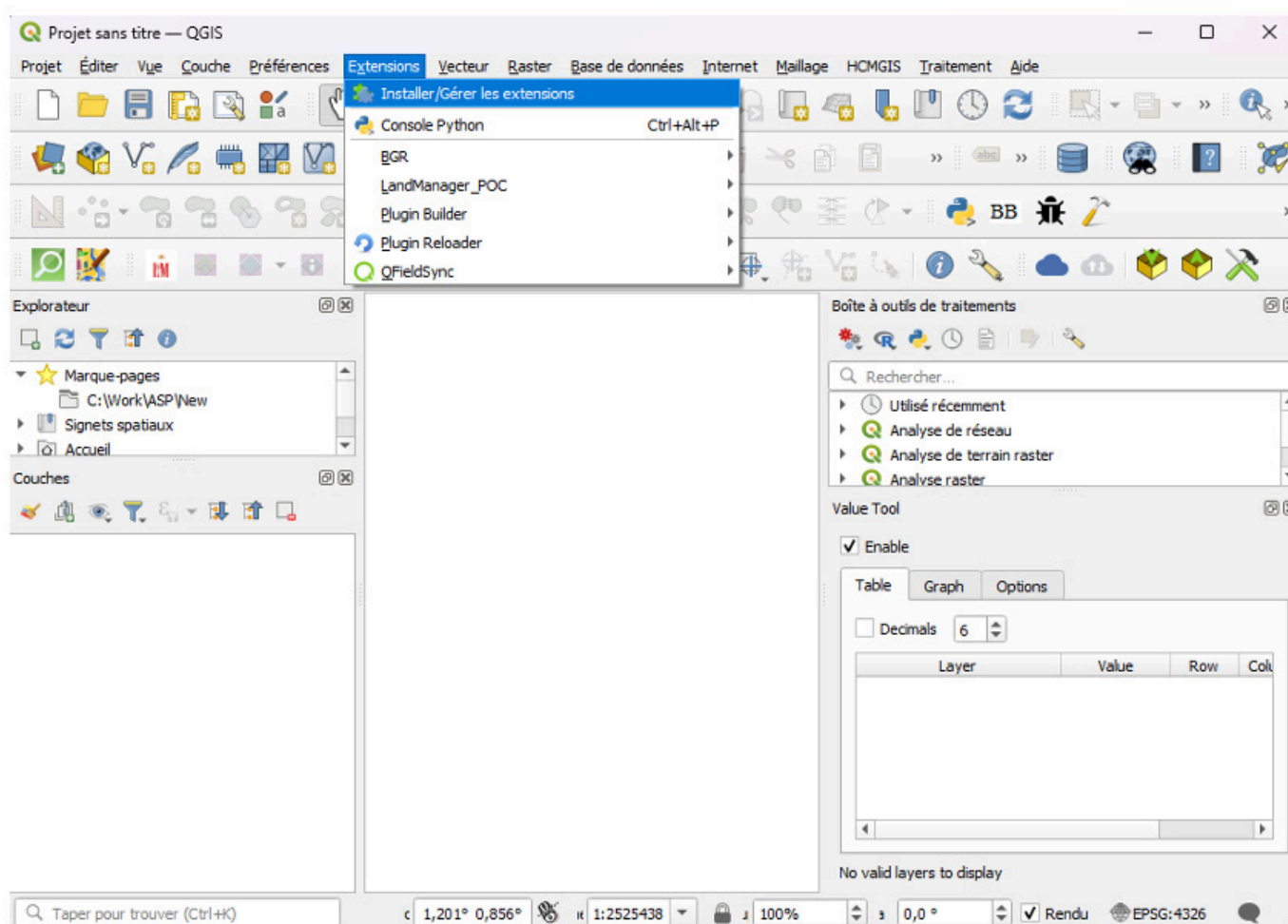


Figure III - 2 : Ecran QGIS avec menu d'installation des extensions.

Dans la boîte de dialogue qui s'ouvre, il faut alors sélectionner l'option « Installer depuis un ZIP ». Après avoir cliqué sur « Installer l'extension », l'extension est installée.

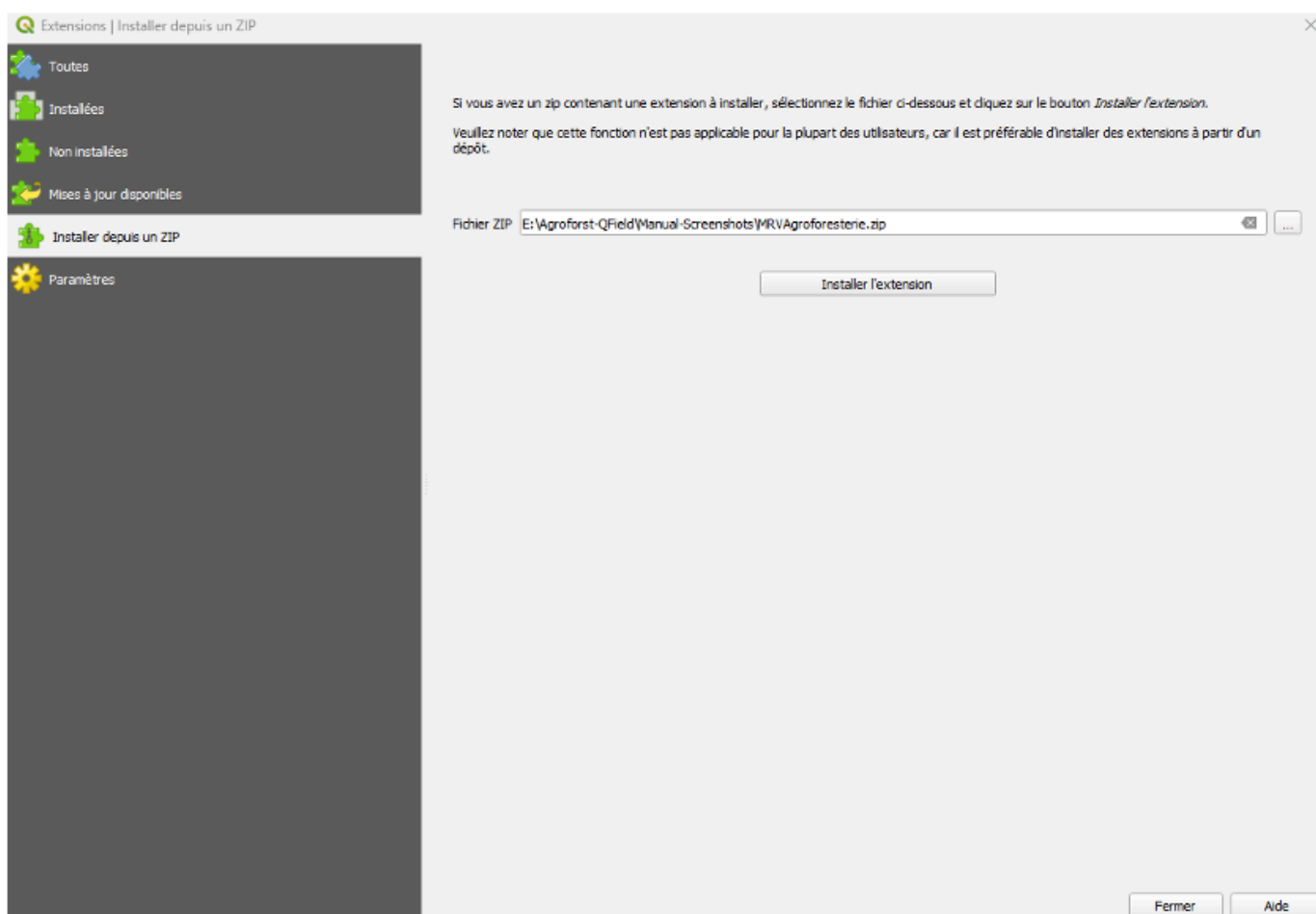


Figure III - 3 : Ecran QGIS pour l'installation d'une extension depuis un ZIP.

III.3.2 Configuration de la connexion avec la base des données

Après l'installation, l'accès à la base de données doit être configuré. Pour ce faire, un fichier contenant les données de connexion à la base de données se trouve dans le répertoire d'installation de l'extension. Ces étapes sont nécessaires si la base de données n'est pas installée sur l'ordinateur sur lequel vous travaillez ou si un autre port que le port standard 5432 a été choisi pour l'accès à la base de données. En cas de doute, demandez à votre administrateur système. Vous trouverez le répertoire d'installation dans le profil de votre application. Pour cela, choisissez «Préférences», puis «Ouvrir le dossier du profil actif».

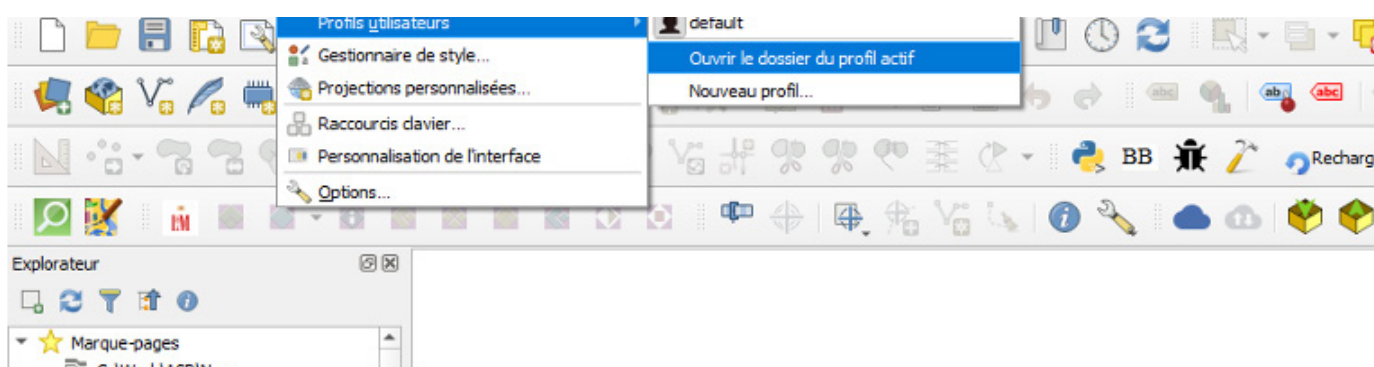


Figure III - 4 : Menu QGIS pour ouvrir le dossier du profil actif.



L'explorateur Windows s'ouvre et le répertoire contenant les extensions apparaît. Sélectionnez le sous-répertoire «uploadcarbonpool».

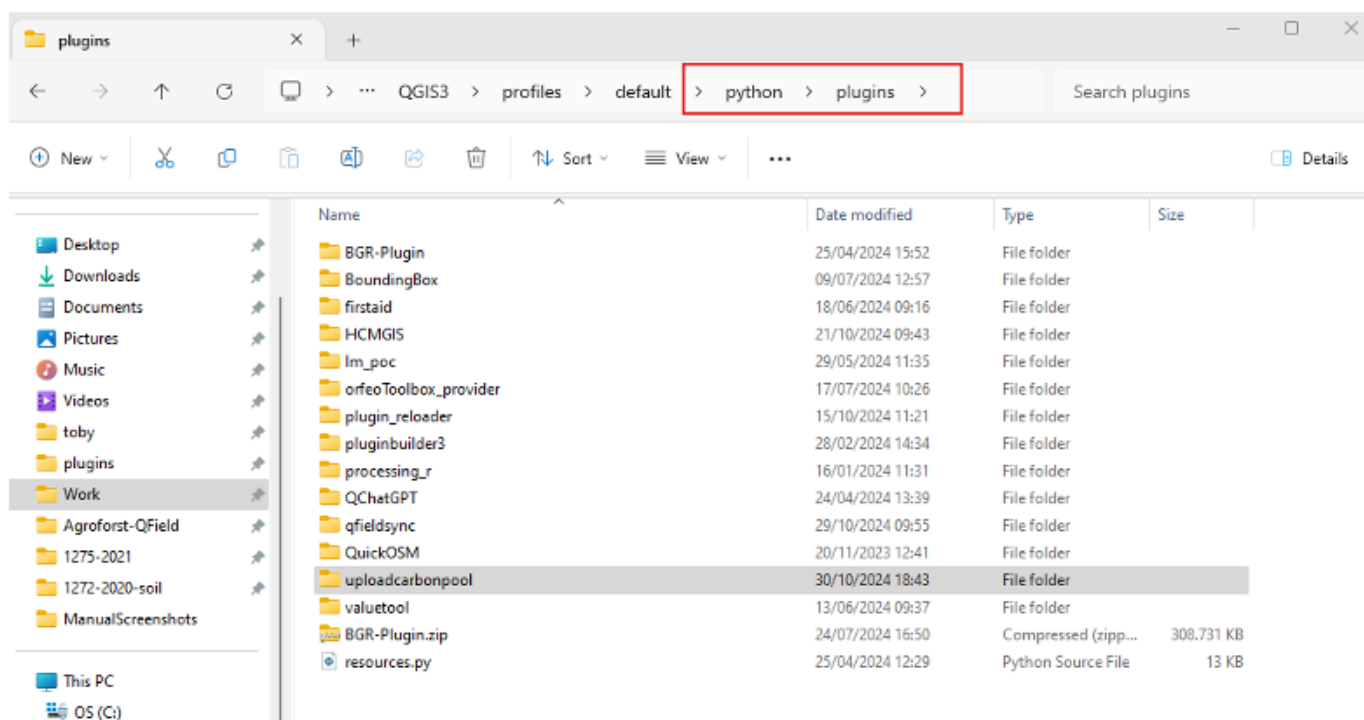


Figure III - 5 : Dossier des extensions QGIS avec l'extension « uploadcarbonpool ».



Dans ce sous-répertoire se trouve un fichier appelé «db-config.config». Vous pouvez l'ouvrir avec un éditeur de texte, par exemple Windows-Notepad. N'utilisez pas Microsoft Word, car des caractères supplémentaires peuvent y être insérés.

Editez le fichier pour que le nom pointe vers le nom d'hôte (c'est-à-dire le nom de l'utilisateur) sur lequel se trouve la base de données et vers le port sur lequel la base de données est accessible. Notez que le pare-feu de l'ordinateur doit être configuré de manière à autoriser l'accès via ce port.

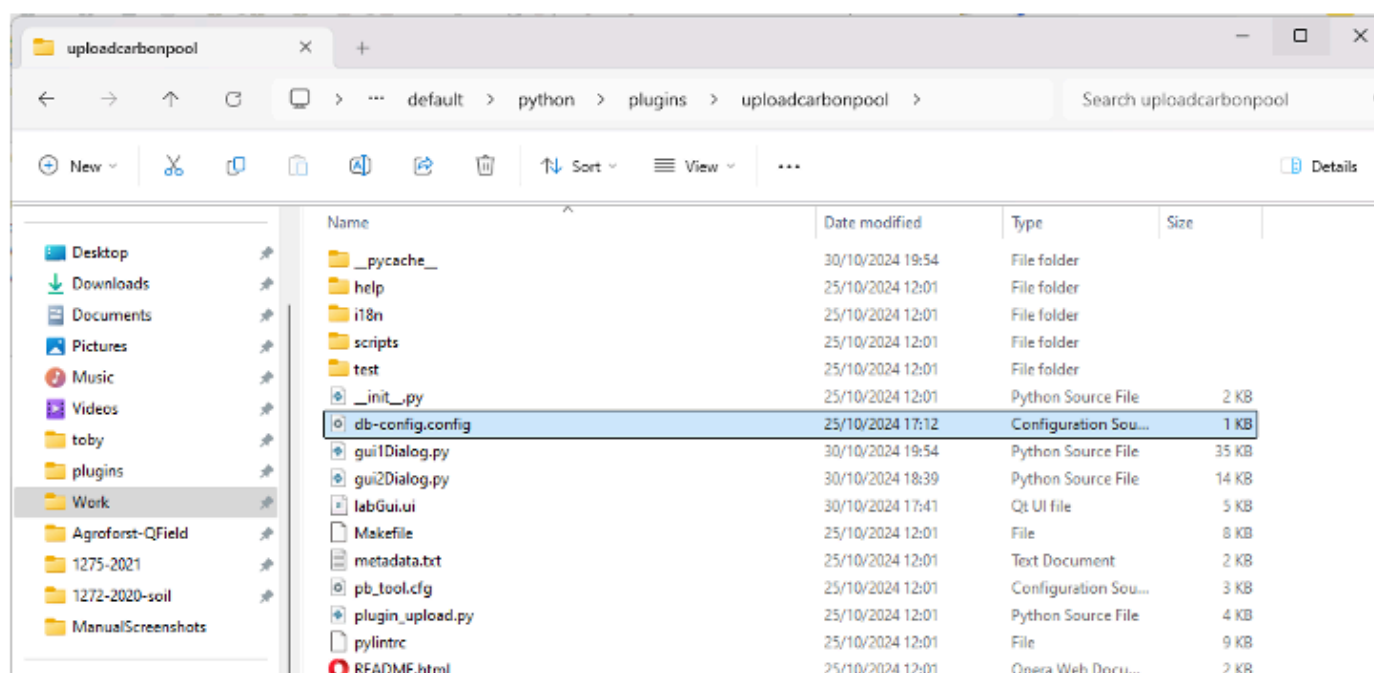


Figure III - 6 : Fichier « db-config.config » dans le dossier de l'extension « uploadcarbonpool ».

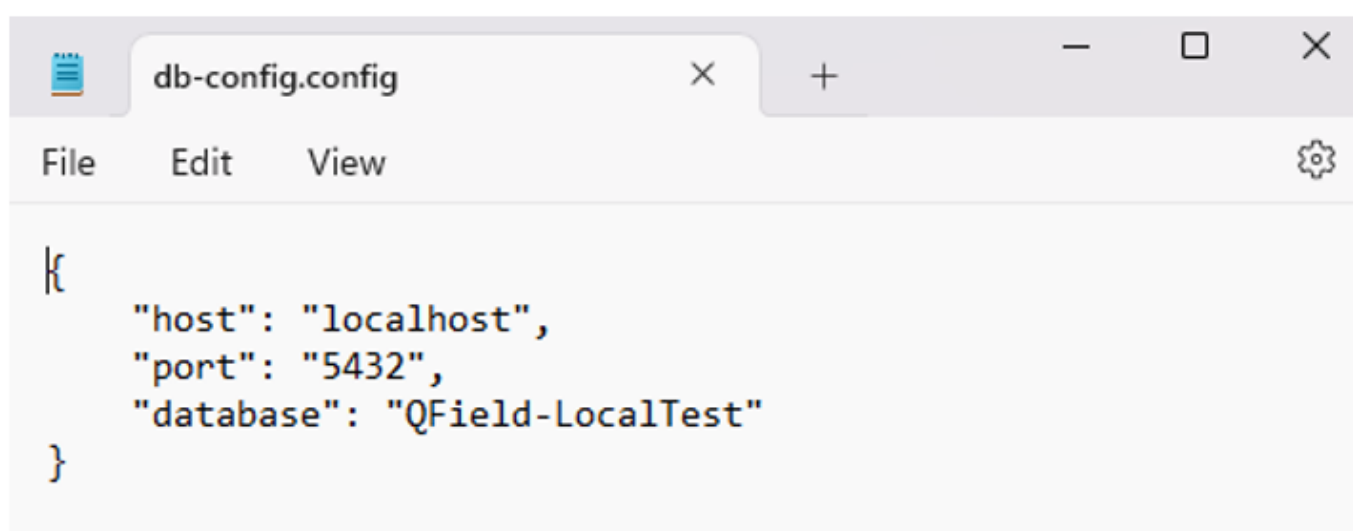


Figure III - 7 : Contenu de fichier « db-config.config » pour la configuration de la connexion à la base des données.



III.3.3 Exécuter l'outil d'importation de données QField

Après l'installation de l'extension, deux nouveaux outils apparaissent dans la boîte à outils QGIS. Tout d'abord, l'outil «Importation de données QField» est utilisé. Pour cela, ouvrez la boîte à outils via le menu «Traitement», puis l'outil.

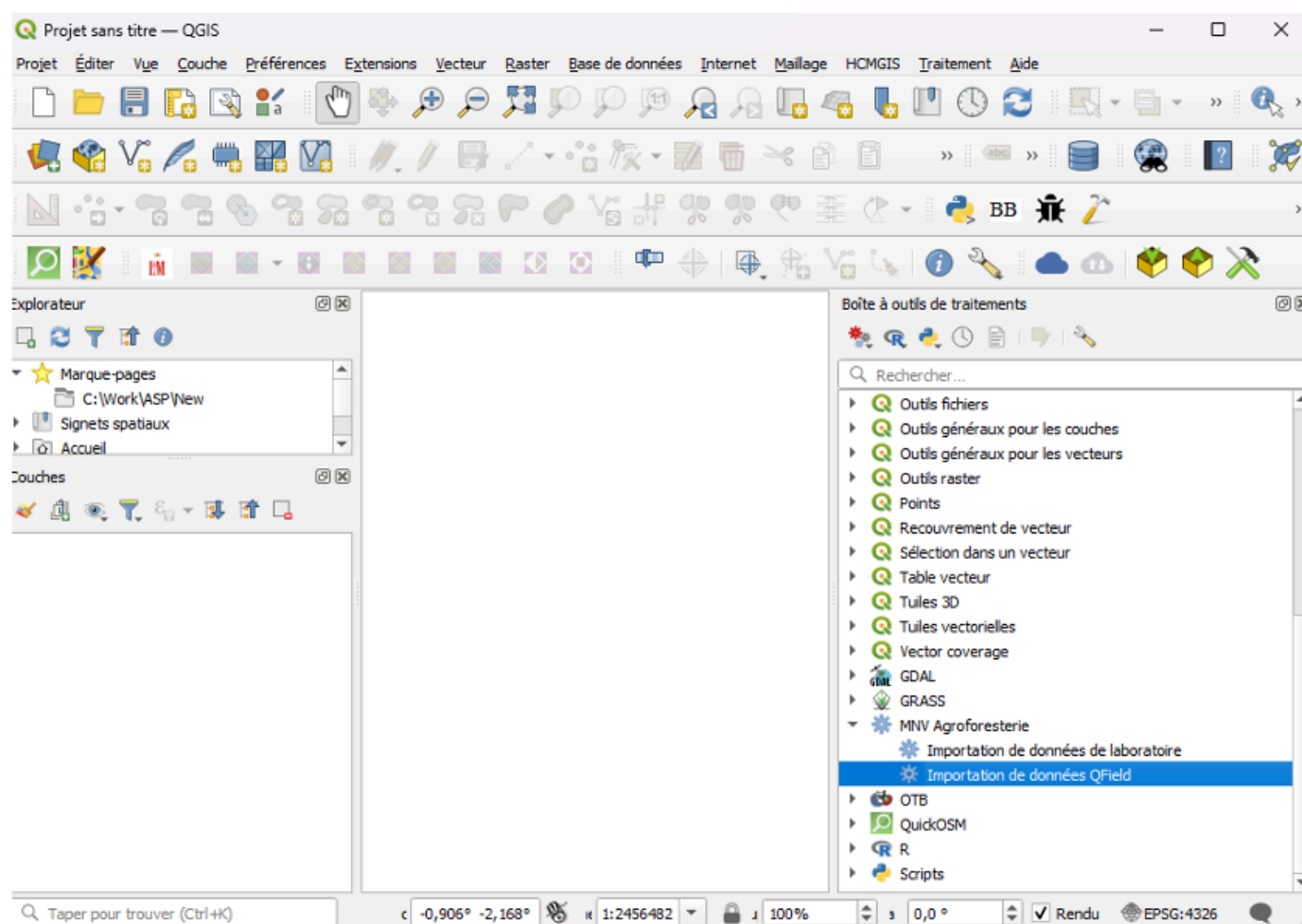


Figure III - 8 : L'extension MNV Agroforesterie (= uploadcarbonpool) dans la boîte d'outils.



Un nouvel écran s'affiche, dans lequel vous devez d'abord saisir vos données d'utilisateur (nom d'utilisateur / mot de passe) pour la base de données. Ces données vous sont fournies par votre administrateur système. Cliquez ensuite sur «se connecter»

Figure III - 9 : Écran d'importation des données dans la base de données MNV.



Après la connexion à la base de données, vous devez sélectionner le fichier data.gpkg que vous avez reçu. Sélectionnez ensuite les données que vous souhaitez importer. L'icône «Tous» sélectionne toutes les données, les autres boutons de sélection sont alors désactivés. En se connectant à la base de données, les noms des «Rapporteurs» enregistrés dans la base de données s'affichent. Sélectionnez le rapporteur dont vous avez reçu les données. Saisissez ensuite le numéro de parcelle contenant les données que vous souhaitez importer. Veuillez noter que le numéro de parcelle doit correspondre exactement au numéro de la parcelle dans la base de données.

Importation de données QField

Connexion à la base de données:

Nom d'utilisateur: test-user

Mot de passe:

Se connecter

Données de mesure:

Spécifiez le chemin vers le fichier gpkg de QField: E:\Agroforst-QField\data.gpkg

Basin de carbone: ☐ Tous

☒ Plantation d'arbres ☒ Bois mort sur pied

☒ Autres arbres ☒ Bois mort abattu

☒ Vegetation herbeuse ☒ Sol et litiere

Rapporteur: G.Kapp

ID de la parcelle: 1272_2020_A

OK Annuler

Figure III - 10 : Configuration de l'écran d'importation des données dans la base de données MNV.



Si vous n'êtes pas sûr, quittez en cliquant sur « Annuler ». Si le rapporteur nécessaire n'existe pas, demandez à votre administrateur système de le créer manuellement dans la base de données.

Cela vous permettra de savoir pour quels numéros de parcelles vous avez des données :

Connectez-vous à la base de données PostGreSQL du système MRV dans QGIS : Pour cela, ouvrez l'Explorateur dans QField, cliquez sur l'icône PostgreSQL et cliquez avec le bouton droit de la souris sur «Nouvelle connexion». Dans la fenêtre qui apparaît, saisissez les données d'accès à la base de données. Les champs «Hôte» et «Port» sont les mêmes valeurs que celles que vous avez saisies ci-dessus lors de la configuration. Le nom de la base de données est «MRV2».

Avec «Tester la connexion», vous pouvez tester la connexion à la base de données. Les données de connexion vous sont fournies par votre administrateur de base de données.

Figure III - 11 : Écran de connexion avec la base des données MNV.



Après la connexion à la base de données, vous pouvez sélectionner les différents tableaux. Sélectionnez ici «parcels». Vous pouvez intégrer le tableau dans la carte de QGIS par un double-clic ou un glisser-déposer.

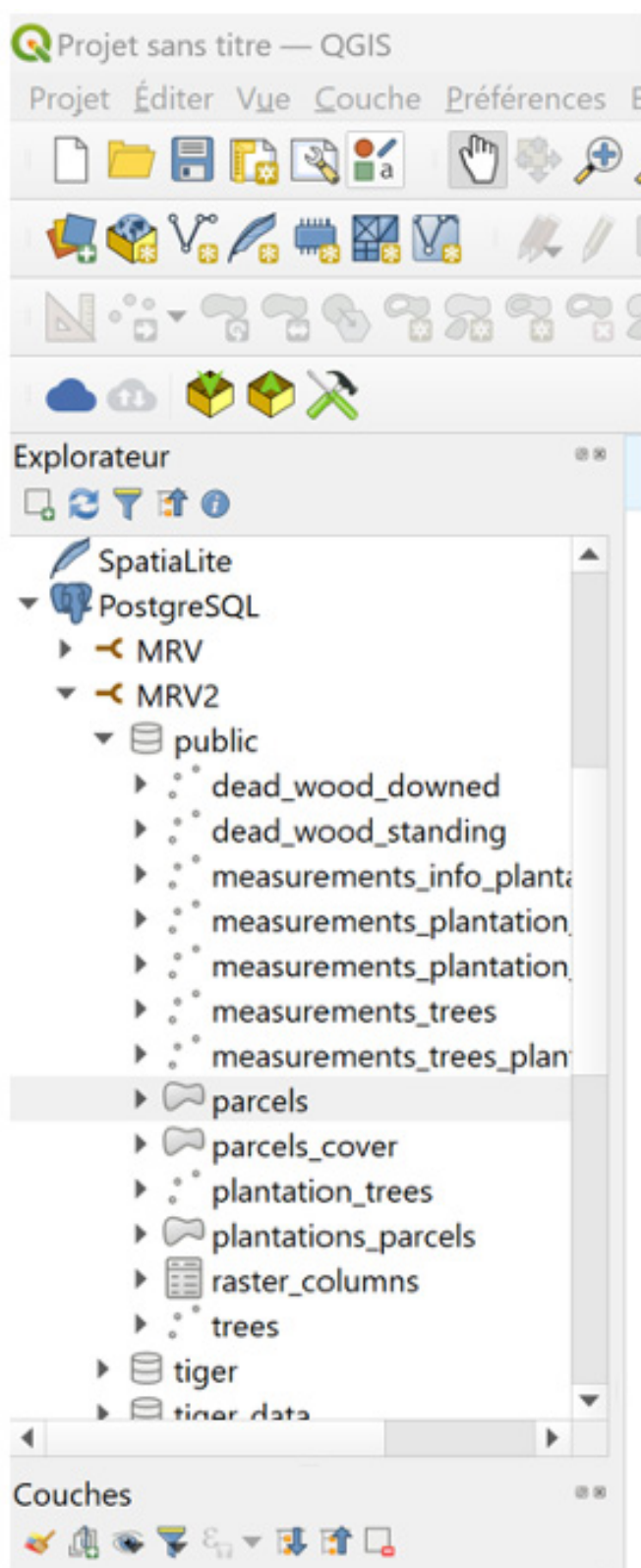


Figure III - 12 : Tableaux et couches dans la base des données MNV (vue du Explorateur QGIS).



Toutes les parcelles de la zone de projet apparaissent. Pour savoir pour quelles parcelles vous avez des données dans votre géopackage, sélectionnez le géopackage. Pour cela, vous pouvez à nouveau utiliser l'Explorateur de QGIS. Pour ce faire, naviguez vers le répertoire où se trouve le géopackage. En cliquant sur le géopackage, vous pouvez par exemple sélectionner la couche «plantationtrees» et la charger sur la carte en double-cliquant dessus. Des données ponctuelles apparaissent sur une ou plusieurs parcelles. En zoomant sur une cellule contenant des données, vous pouvez sélectionner la parcelle située en dessous. Pour ce faire, cliquez sur l'i-Tool. Sélectionnez la couche de parcelles et cliquez ensuite dans la parcelle. La parcelle sélectionnée est mise en évidence en couleur et une boîte d'information apparaît. Notez les numéros de parcelle ou copiez-les en cliquant avec le bouton droit.

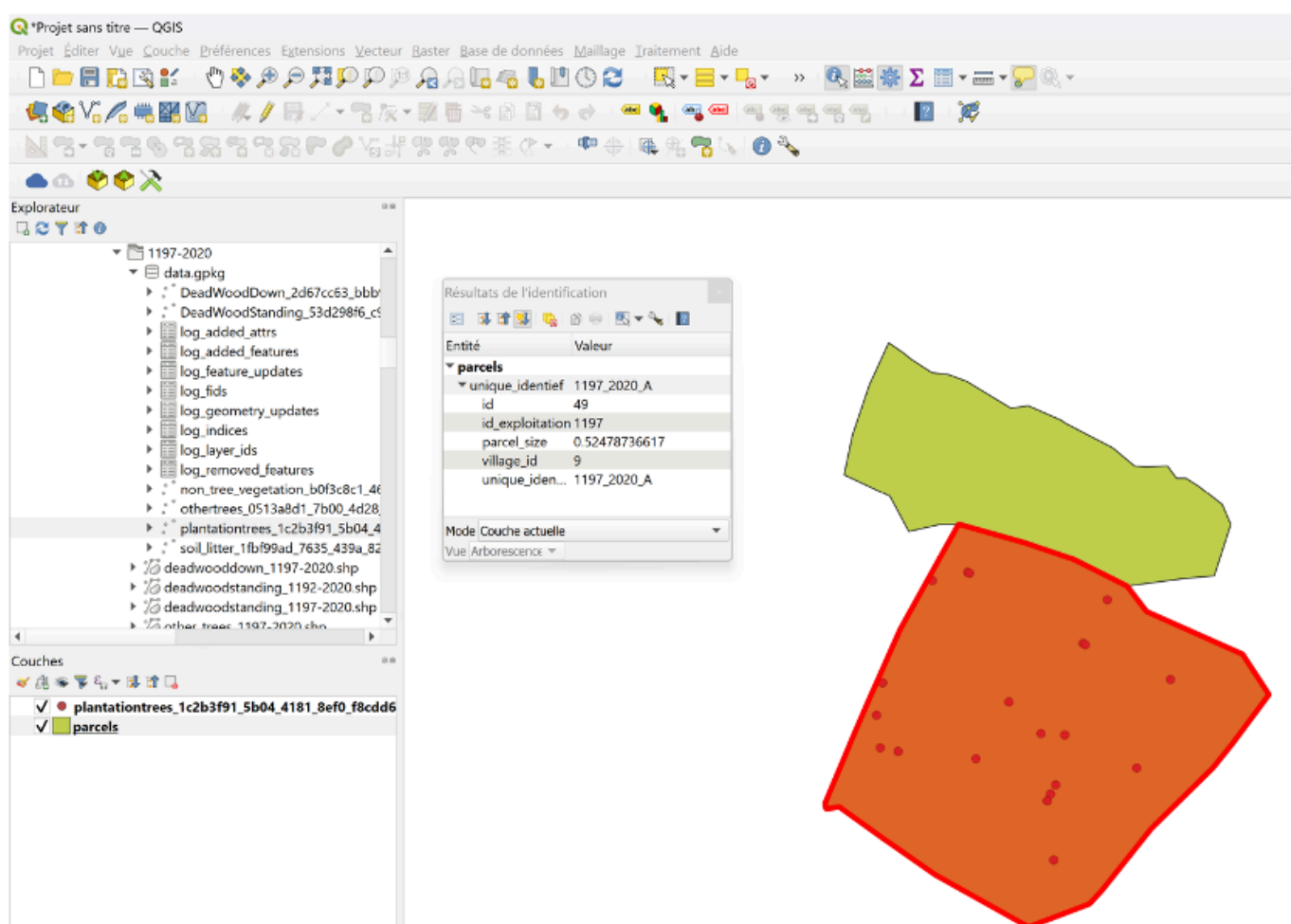


Figure III - 13 : Parcelle agroforestière enregistrée dans la base de données MNV et consultation de l'ID unique avec l'i-Tool.



Ouvrez maintenant la fenêtre de saisie «Importation de données QField» de l'extension MNV et procédez comme indiqué ci-dessus après avoir saisi le nom d'utilisateur et le mot de passe pour la sélection des données et la saisie du numéro de parcelle. Cliquez ensuite sur «OK».

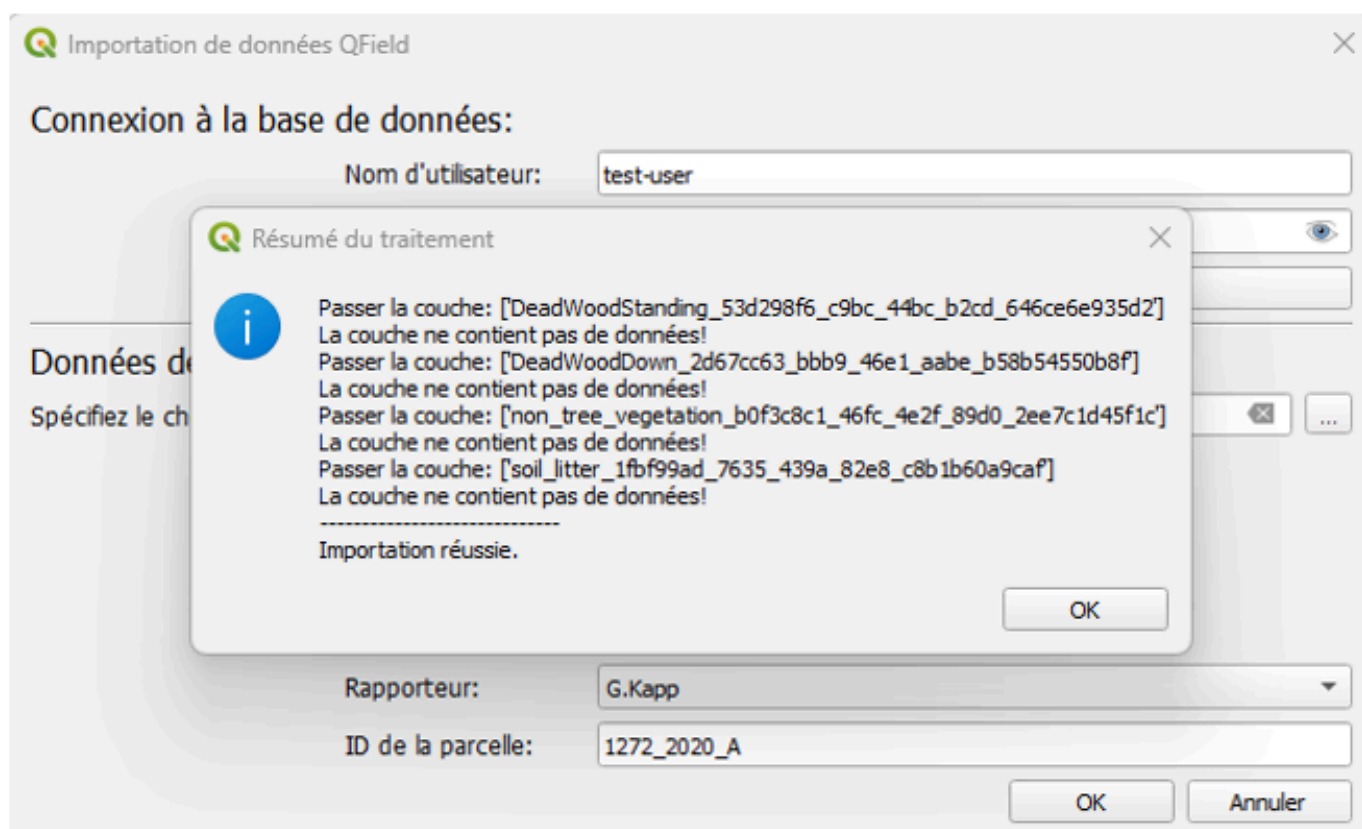


Figure III - 14 : Message de l'outil d'importation après l'importation (avec des données vides, dans ce cas).

Un message s'affiche pour vous informer du succès ou de l'échec de la saisie des données. Veuillez noter que :

- Seules les données qui se trouvent sur la parcelle sélectionnée sont importées. Si des données appartenant à la parcelle se trouvent en dehors de la parcelle sélectionnée en raison d'une erreur de GPS, vous pouvez les déplacer dans la parcelle à l'aide des outils d'édition de QGIS. Sinon, elles ne seront pas importées.
- En cas d'erreur, par exemple en raison de données erronées, aucune donnée n'est importée pour le pool de données concerné. Vous devez d'abord corriger l'erreur manuellement, puis réimporter les données.
- Lors de l'importation, une nouvelle mesure est automatiquement créée. Cette mesure contient des métadonnées sur :
 - o Date de la mesure
 - o Pool de carbone mesurée
 - o Rapporteur responsable.
- Si des données existent déjà pour une mesure, celle-ci n'est pas créée.
- Actuellement, la création de plusieurs mesures identiques pour un rapporteur le même jour n'est pas prise en charge.

Si des erreurs sont survenues dans un pool de carbone mais pas dans d'autres, les pools de carbone avec des erreurs peuvent être importés séparément après la correction des erreurs, en cochant les cases correspondantes.



III.3.4 Données du laboratoire sur le sol et la litière

Les données de laboratoire relatives au sol et à la litière sont saisies à partir des valeurs fournies par le laboratoire. Il est donc important de suivre des conventions strictes pour nommer les échantillons afin d'éviter toute confusion entre les échantillons sur le chemin du terrain au laboratoire et de retour à l'analyste. Pour le carbone du sol, la densité apparente de l'échantillon et le pourcentage de carbone ont été saisis. La fraction de terre fine est également requise.

Toutes les données de laboratoire sont extraites de fichiers csv. Celles-ci doivent suivre une convention stricte. Le cas échéant, les données de laboratoire doivent être reformatées afin de respecter cette convention. Si les données de laboratoire sont disponibles sous forme de fichiers Excel, elles doivent être converties en fichiers csv. Il est important d'utiliser une virgule comme séparateur et un point comme séparateur pour les décimaux. Vérifiez les paramètres de votre système d'exploitation pour vous assurer que c'est bien le cas.

Figure III - 15 : Outil d'importation des données de laboratoire.



Les données relatives au sol doivent avoir les noms de colonne suivants :

«soil_lab_number», «c_percent», «fine_earth_fraction», «bulk_density»

Celles-ci indiquent dans l'ordre le numéro du laboratoire, la teneur en carbone déterminée, la fraction de terre fine et la densité apparente.

Les données de la litière et les données de végétation non arborescente doivent comporter les champs suivants :

«litter_lab_number», «litter_dry_weight»

Ceux-ci contiennent le numéro de laboratoire de la litière ou de la végétation non-arborescente et le poids sec de l'échantillon déterminé en laboratoire.

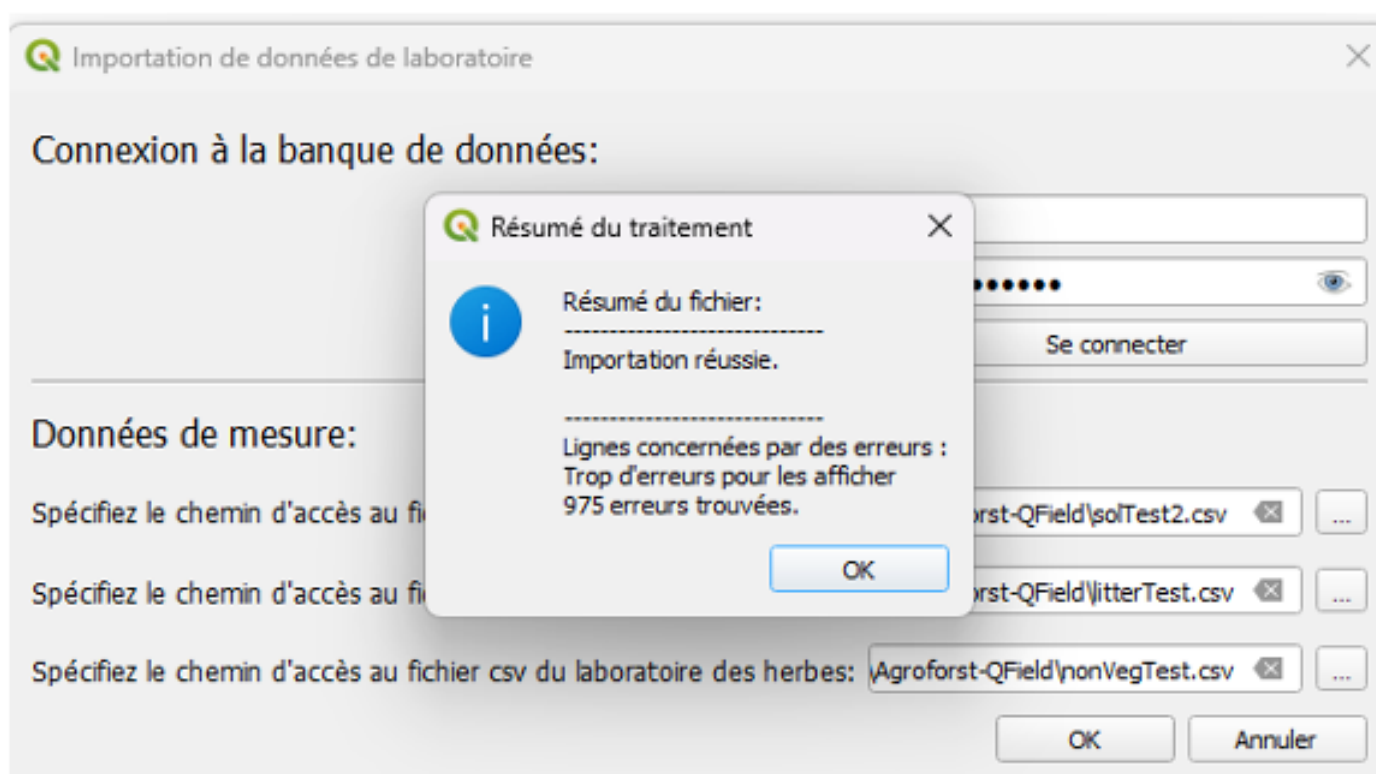


Figure III - 16 : Message de l'outil d'importation des données de laboratoire après l'importation.

Seules les données qui ont un numéro de laboratoire correspondant dans le tableau sol et litière ou dans le tableau de la végétation non arborée, qui ont dues être été importées à l'étape précédente, peuvent être insérées.



III.4 Analyse des données de terrain

III.4.1 Organisation du script R et des données d'entrée

Une fois que toutes les données ont été saisies dans la base de données, il est temps de procéder à l'analyse. Pour ce faire, il suffit d'un script R qui produit en sortie les calculs des stocks de carbone ainsi qu'une série de graphiques et de tableaux informatifs qui peuvent être enregistrés dans un fichier Word, PDF ou HTML. Cela se fait par le biais d'un cahier R qui peut être exécuté dans RStudio.

L'analyse comprend l'application des formules données dans le manuel de l'utilisateur, volume 1, pour les différents réservoirs de carbone et une analyse de la variabilité et de l'incertitude de l'estimation de la moyenne. Ces estimations de l'incertitude sont importantes pour évaluer l'incertitude des facteurs d'émission à utiliser pour estimer le bilan carbone global du système.

Pour exécuter le script R, les paquets (plugins du langage R) suivants doivent être installés :

- sf
- stringr
- dplyr
- reshape2
- knitr
- rpostgis
- RPostgres

Pour produire la sortie, le package R «knitr» est utilisé¹⁶. Le package knitr permet de créer des documents dynamiques à partir de R. Technologiquement, il est basé sur les documents markdown¹⁷. Markdown est un langage de formatage simple pour les documents. Cette technologie soutient une approche scientifique reproductible, dans laquelle les données, l'analyse et la documentation sont regroupées en un seul processus.

¹⁶ A consulter sur CRAN: <https://cran.r-project.org/web/packages/knitr/index.html>

¹⁷ Pour plus d'informations, voir par exemple <https://www.markdownguide.org>



```

agrofor_plots_villages.R x import_data_2024_Bossematie.R x carbon_analysis_notebook_postgreSQL.... x carbon_analysis_notebook.Rmd x
Source Visual Outline
1 ---
2 title: "Biomasse et carbone dans les parcelles agroforestières"
3 output:
4   html_document:
5     df_print: paged
6     html_notebook: default
7     word_document: default
8 ---
9
10 Ci-dessous, les résultats des mesures de la biomasse et du carbone dans les plantations d'Acacia
    du projet d'agroforesterie sont présentés.
11
12 ```{r setup, echo = FALSE, include = FALSE}
13
14 #initialisation des bibliothèques R
15
16 library(sf)
17 library(stringr)
18 library(dplyr)
19 library(reshape2)
20 library(knitr)
21 library(rpostgis)
22 library(RPostgres)
23
24 #connection a la base de données
25
26 con <- dbConnect(Postgres(), dbname = "MRV2", host = "localhost", user = "postgres", password =
    [REDACTED])
27
28
29

```

Figure III - 17 : Interface utilisateur R pour l'exécution du document knitr markdown pour l'analyse des données de carbone sur le terrain avec l'information sur la connexion à la base des données.



Dans l'interface utilisateur, vous pouvez choisir entre différents formats de sortie. Pour le présent script, les formats HTML et Word ont été testés.

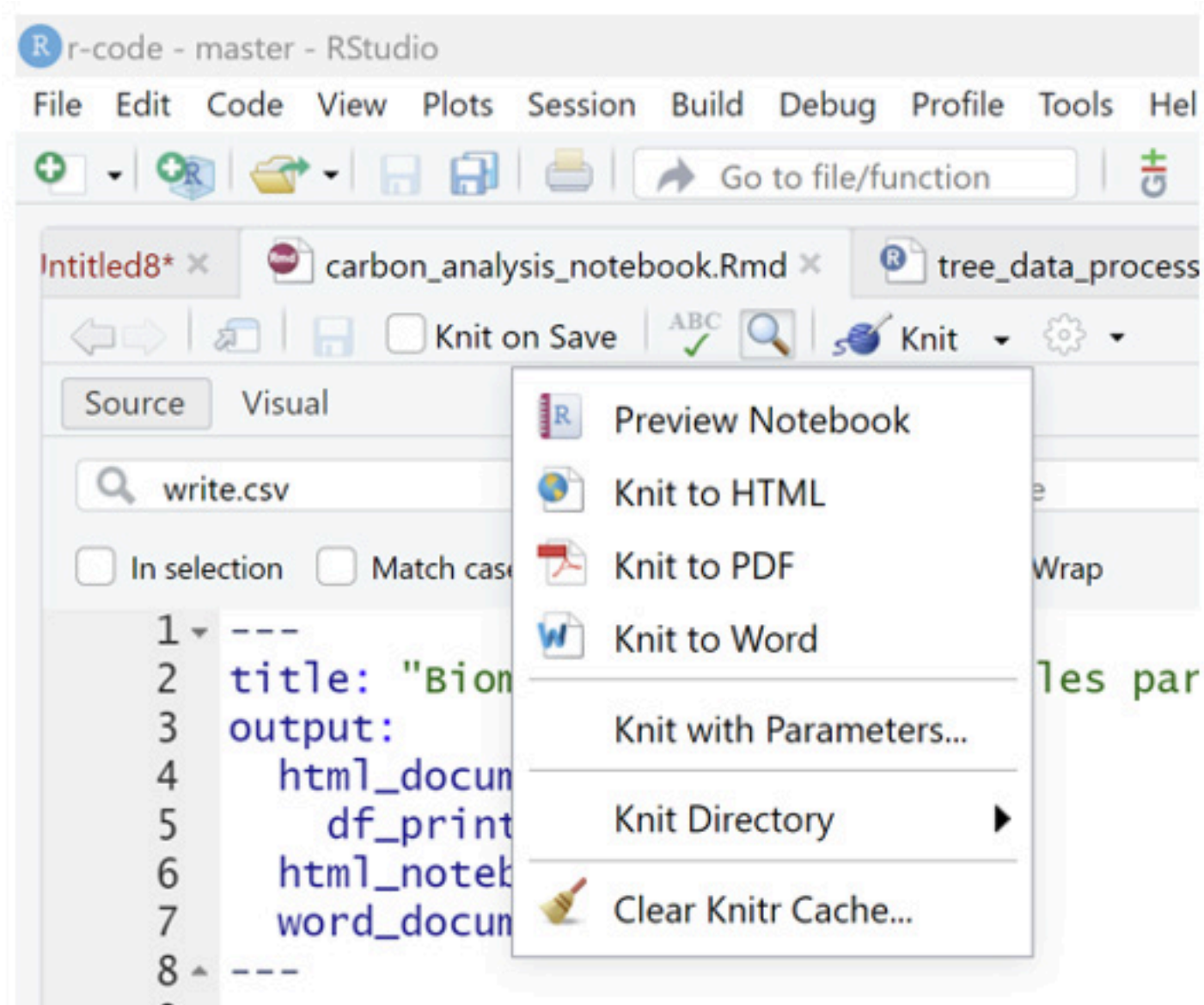


Figure III - 18 : Sélectionner différents formats de sortie

Un document knitr est structuré en blocs de texte (qui sont interprétés en markdown pour formater le texte), et en morceaux de code qui sont exécutés dans R.

Dans le premier morceau de code, il faut indiquer la connexion à la base de données. Pour cela, comme pour l'importation depuis QFIELD, les données de connexion pour la base de données sont saisies dans le code (c'est-à-dire le nom de la base de données, le nom d'hôte, le nom d'utilisateur et le mot de passe. Le port n'est nécessaire que si le port par défaut n'est pas utilisé (Demandez à votre administrateur système).



III.4.2 Sorties

III.4.2.1 Dendrométrie de l'acacia

La biomasse moyenne d'acacia par arbre est fournie dans le fichier «biomass_carbon_acacia.csv». Les neuf premières colonnes se réfèrent aux arbres individuels (c'est-à-dire, par exemple, la biomasse moyenne des acacias sur la parcelle) et se présentent comme suit :

Num_par	meanAGB	sdAGB	seAGB	meanBGB	sdBGB	seBGB	n	zone_year
46	1.223142	0.706198	0.126837	0.68496	0.395471	0.071029	31	Sud 2021
138	10.58048	8.80607	1.488498	5.925068	4.931399	0.833559	35	Sud 2020
150	17.80488	11.29582	1.581731	9.970734	6.325659	0.885769	51	Sud 2020
156	13.48173	9.124973	1.375642	7.549769	5.109985	0.770359	44	Sud 2020
185	6.092168	5.496362	1.146071	3.411614	3.077963	0.6418	23	Sud 2020
189	7.820495	5.458469	1.050483	4.379477	3.056743	0.58827	27	Sud 2020
191	2.26573	2.078574	0.392814	1.268809	1.164002	0.219976	28	Sud 2020
277	2.69529	1.647668	0.411917	1.509363	0.922694	0.230674	16	Sud 2021
297	1.414584	1.080233	0.204145	0.792167	0.60493	0.114321	28	Sud 2021
507	0.626065	0.079728	0.056376	0.350596	0.044648	0.031571	2	Nord 2021
696	1.383584	1.224234	0.223514	0.774807	0.685571	0.125168	30	Nord 2021
729	0.90035	0.572782	0.124991	0.504196	0.320758	0.069995	21	Nord 2021
797	1.975326	1.874407	0.441802	1.106183	1.049668	0.247409	18	Nord 2020
799	0.998568	1.011975	0.261291	0.559198	0.566706	0.146323	15	Nord 2020

Figure III - 19 : Contenu des mesures de la densité de la biomasse aérienne de l'acacia au niveau de l'arbre

Pour chaque parcelle, le fichier «biomass_carbon_acacia.csv» contiennent :

- Num_par : numéro de la parcelle
- MeanAGB : biomasse aérienne moyenne des arbres individuels (kg)
- sdAGB : écart-type de la moyenne (kg)
- seAGB : erreur standard de la moyenne (kg)
- Mean_BGB : biomasse souterraine (BS, BGB en anglais) moyenne des arbres isolés (kg)
- sdBGB : écart-type de la biomasse souterraine moyenne (kg)
- seBGB : erreur standard de la moyenne de la biomasse souterraine (kg)
- n: nombre d'arbres échantillonnés
- zone_year : zone et année (facteur de regroupement)



Les colonnes suivantes contiennent les densités de biomasse et de carbone extrapolées :

n_missing	missing_percent	bio_haAGB	bio_haBGB	sterrAGB	sterr_perc	c_haAGB	c_ha_errAGB	sterrBGB	sterr_percBGB	c_haBGB	c_ha_errBGB
9	0.225	1.000072	0.56004	0.126837	0.103698	0.470034	0.048741	0.071029	0.103698	0.263219	0.027295
13	0.270833	8.139253	4.557982	1.488498	0.140683	3.825449	0.538177	0.833559	0.140683	2.142251	0.301379
5	0.089286	17.10699	9.579917	1.581731	0.088837	8.040288	0.714274	0.885769	0.088837	4.502561	0.399994
6	0.12	12.51644	7.009206	1.375642	0.102037	5.882726	0.600258	0.770359	0.102037	3.294327	0.336145
9	0.28125	4.619577	2.586963	1.146071	0.188122	2.171201	0.408451	0.6418	0.188122	1.215873	0.228732
13	0.325	5.56917	3.118735	1.050483	0.134324	2.61751	0.351595	0.58827	0.134324	1.465805	0.196893
5	0.151515	2.028171	1.135776	0.392814	0.173372	0.953241	0.165265	0.219976	0.173372	0.533815	0.092548
17	0.515152	1.378682	0.772062	0.411917	0.152828	0.64798	0.09903	0.230674	0.152828	0.362869	0.055457
10	0.263158	1.099653	0.615806	0.204145	0.144314	0.516837	0.074587	0.114321	0.144314	0.289429	0.041769
39	0.95122	0.032219	0.018043	0.056376	0.090048	0.015143	0.001364	0.031571	0.090048	0.00848	0.000764
20	0.4	0.875809	0.490453	0.223514	0.161547	0.41163	0.066498	0.125168	0.161547	0.230513	0.037239
22	0.511628	0.46389	0.259778	0.124991	0.138825	0.218028	0.030268	0.069995	0.138825	0.122096	0.01695

Figure III - 20 : Contenu des estimations des densités de biomasse et de carbone (en t/ha)

Ils contiennent les informations suivantes :

- n_missing : nombre d'arbres manquants (morts ou absents) dans les lieux d'échantillonnage
- missing_percent : pourcentage d'arbres manquants par rapport au total de l'échantillon
- bio_haAGB : densité de la biomasse aérienne par hectare (t/ha)
- bio_haBGB : densité de la biomasse souterraine par hectare (t/ha)
- sterrAGB : erreur standard de la moyenne de l'BA (t/ha)
- sterr_perc : erreur standard de la moyenne de l'BA en pourcentage de la moyenne (%)
- c_haAGB : teneur en carbone de la biomasse aérienne (t/ha)
- sterrBGB : erreur standard de la biomasse souterraine (t/ha)
- sterr_percBGB : erreur standard de la biomasse souterraine en pourcentage (%)
- c_haBGB : teneur en carbone de la biomasse souterraine (t/ha)
- c_ha_errBGB : erreur standard de la moyenne de la biomasse souterraine (t/ha)



III.4.2.2 Végétation arborée associée

Les données sur la végétation arborescente associée sont stockées dans le fichier «associated_trees_carbon.csv». Ce fichier se présente comme suit :

Num_par	sumAGB	sumBGB	n	area	zone_year	AGBha	BGBha	C_AGB_ha	C_BGB_ha	n_arbr_ha
46	5174.322	2897.62	6	1000	Sud 2021	51.74322	28.9762	24.31931	13.61881	0.06
138	3400.369	1904.206	18	1000	Sud 2020	34.00369	19.04206	15.98173	8.94977	0.18
150	3537.412	1980.951	12	1000	Sud 2020	35.37412	19.80951	16.62584	9.310468	0.12
156	561.2525	314.3014	3	1000	Sud 2020	5.612525	3.143014	2.637887	1.477216	0.03
185	47.54914	26.62752	2	500	Sud 2020	0.950983	0.53255	0.446962	0.250299	0.04
189	1318.832	738.5459	9	1000	Sud 2020	13.18832	7.385459	6.19851	3.471166	0.09
191	13502.37	7561.328	27	1000	Sud 2020	135.0237	75.61328	63.46114	35.53824	0.27
277	43.27236	24.23252	3	500	Sud 2021	0.865447	0.48465	0.40676	0.227786	0.06
297	1114.431	624.0815	11	500	Sud 2021	22.28863	12.48163	10.47565	5.866366	0.22
441	4048.875	2267.37	10	1000	Nord 2020	40.48875	22.6737	19.02971	10.65664	0.1
507	5595.89	3133.698	18	1000	Nord 2021	55.9589	31.33698	26.30068	14.72838	0.18

Figure III - 21 : Résultats sur la végétation arborescente associée.

Le fichier contient les informations suivantes :

- Num_par : numéro de la parcelle
- sumAGB : somme de la biomasse aérienne (t)
- sumBGB : somme de la biomasse souterraine (t)
- n : nombre d'arbres échantillonnés
- area : surface échantillonnée (m²)
- zone_année : zone et année
- AGBha : densité de la biomasse aérienne (t/ha)
- BGBha : densité de la biomasse souterraine (t/ha)
- C_AGB_ha : densité de carbone de la biomasse aérienne (t/ha)
- C_BGB_ha : densité de carbone de la biomasse souterraine (t/ha)
- n_arbr_ha : nombre estimé d'arbres par hectare



III.4.2.3 Bois mort debout

La sortie de bois mort debout se présente comme suit :

Num_par	Bois_mort_souche	bois_mort_debut	n	zone_year	Bio_DWtot	C_DWtot
46	0.031943	7.055889		13 Sud 2021	7.087832	4.445488
138	0.035186	20.58813		7 Sud 2020	20.62332	12.93495
150	0.181583	4.613644		29 Sud 2020	4.795226	3.007566
156	0.109803	27.33655		28 Sud 2020	27.44635	17.21435
185	0.003032	41.51887		10 Sud 2020	41.52191	26.04254
189	0.153319	1.093999		8 Sud 2020	1.247318	0.782318

Figure III - 22 : Résultats de l'analyse du bois mort sur pied

Le fichier contient les informations suivantes :

- Num_par : numéro de la parcelle
- Bois_mort_souche : densité de biomasse de bois mort dans les souches (t/ha)
- bois_mort_debut : densité de biomasse de bois mort dans les arbres sur pied (t/ha)
- n : nombre d'échantillons
- zone_year : zone et année de plantation
- Bio_DWtot : biomasse totale de bois mort sur pied (t/ha)
- C_Dwtot : carbone total dans la biomasse de bois mort sur pied (t/ha)



III.4.2.4 Bois mort couché

La biomasse et la teneur en carbone du bois mort abattu sont stockées dans ce fichier : «downed_dead_wood.csv». Son contenu ressemble à ceci :

Num_par	DWD_sum	zone_year	DWD_C
46	3.772131	Sud 2021	1.848344
138	2.447716	Sud 2020	1.199381
150	3.4119	Sud 2020	1.671831
156	0.718065	Sud 2020	0.351852
185	0.990749	Sud 2020	0.485467
189	17.63186	Sud 2020	8.639613
277	2.044892	Sud 2021	1.001997
297	1.535623	Sud 2021	0.752455
729	1.253068	Nord 2021	0.614003

Figure III - 23 : Résultats de l'analyse des données de terrain sur le bois mort couché.

Les champs contiennent le contenu suivant :

- Num_par: numéro de la parcelle
- DWD_sum: densité de biomasse du bois mort couché (t/ha)
- zone_year: zone et année
- DWD_C: densité de carbone du bois mort couché (t/ha)



III.4.2.5 Végétation non-arborescente

La Végétation non-arborescente (c'est-à-dire herbacée) est enregistrée dans ce fichier : «herbaceous_vegetation.csv», qui ressemble à l'image suivante :

Num_par	meanHAGB	sdHAGB	serrHAGB	n	zone_year	HAGBha	sdHAGBha	c_HAGBha	serrHAGB	perc
46	0.02475	0.017244	0.007712		5 Sud 2021	0.2475	0.172437	0.116325	0.31158	
138	0.0915	0.027243	0.012183		5 Sud 2020	0.915	0.272431	0.43005	0.133153	
150	0.0354	0.02766	0.01237		5 Sud 2020	0.354	0.276601	0.16638	0.349434	
156	0.02195	0.011829	0.00529		5 Sud 2020	0.2195	0.118287	0.103165	0.241001	
185	0.0321	0.018854	0.008432		5 Sud 2020	0.321	0.188535	0.15087	0.262666	
189	0.0327	0.014299	0.006395		5 Sud 2020	0.327	0.142986	0.15369	0.195551	
191	0.0391	0.010292	0.004603		5 Sud 2020	0.391	0.10292	0.18377	0.117717	
277	0.0524	0.011772	0.005265		5 Sud 2021	0.524	0.117721	0.24628	0.10047	

Figure III - 24 : Résultats de l'analyse pour la végétation non arborée.

Il contient les champs suivants :

- Num_par : numéro de la parcelle
- meanHAGB : biomasse moyenne (kg/m²)
- sdHAGB : écart-type de la moyenne (kg/m²)
- serrHAGB : erreur standard de la moyenne (kg/m²)
- n : nombre d'échantillons
- zone_année : zone et année
- HAGBha : densité de la biomasse (t/ha)
- sdHAGBha : écart-type de la densité de biomasse (t/ha)
- c_HAGBha : densité de carbone (t/ha)
- serrHAGB_perc : erreur standard relative de la densité de carbone (%)



III.4.2.6 Sol et litière

Les résultats de l'analyse du carbone du sol et de la litière sont stockés dans ce fichier : «soil_litter.csv». Le fichier se présente comme suit :

Num_par	mean_Clit	sd_Clit	t_hse_Clit	t_hn_Lit		mean_Perc	sd_Perc	c se_Perc	c	meanBD	sdBD	seBD	meanC	sdC	seC	n	zone_year
46	1.286348	1.869271	0.15063		5	0.964	0.231689	0.103615		1.644	0.101143	0.045233	47.952	13.69099	6.122797		5 Sud 2021
138	NA	NA	NA		0	0.94	0.292233	0.13069		1.396	0.154693	0.069181	40.3752	18.10149	8.095234		5 Sud 2020
150	3.136196	1.987203	0.160133		5	0.634	0.273002	0.12209		1.44	0.121861	0.054498	27.1146	10.83981	4.847712		5 Sud 2020
156	NA	NA	NA		0	0.726	0.11327	0.050656		1.26	0.36104	0.161462	28.2036	10.89036	4.870318		5 Sud 2020
185	2.013312	1.231842	0.099265		5	1.676	0.151427	0.06772		1.284	0.027928	0.01249	64.6002	6.509328	2.91106		5 Sud 2020
189	NA	NA	NA		0	0.286	0.161957	0.072429		1.602	0.074967	0.033526	13.8456	8.166142	3.65201		5 Sud 2020
191	NA	NA	NA		0	0.37	0.166283	0.074364		1.486	0.128763	0.057585	16.4208	7.630713	3.412558		5 Sud 2020

Figure III - 25 : Résultats de l'analyse du sol et de la litière.

Les champs ont la signification suivante :

- Num_par : numéro de la parcelle
- mean_Clit_t_ha : densité moyenne de carbone dans la litière (t/ha)
- sd_Clit_t_ha : écart-type de la densité moyenne de carbone dans la litière (t/ha)
- se_Clit_t_ha : erreur standard de la densité moyenne de carbone dans la litière (t/ha)
- n_Lit : nombre d'échantillons de litière
- mean_Perc_c : pourcentage moyen de C_{org} dans le sol (%)
- sd_Perc_c : écart-type du pourcentage de C_{org} dans le sol (%)
- se_Perc_c : erreur standard du pourcentage de C_{org} dans le sol (%)
- meanBD : densité apparente moyenne du sol (kg/dm^2)
- sdBD : écart-type de la densité apparente du sol (kg/dm^2)
- seBD : erreur standard de la densité apparente du sol (kg/dm^2)
- meanC : densité moyenne du carbone dans le sol (t/ha)
- sdC : écart-type de la densité de carbone du sol (t/ha)
- seC : erreur standard de la moyenne de la densité de carbone du sol (t/ha)
- n : nombre d'échantillons de sol
- zone_year : zone et année



III.4.2.7 Pools de carbone dans les parcelles

Un résumé du contenu des différents réservoirs de carbone dans les parcelles est stocké dans le fichier carbon_parcel.csv.

Num_par	Acacia BA	Acacia BS	Bois mort c	Bois mort d	Bois mort e	Carbone d	Carbone d	Vegetatio	zone_year
46	0.470034	0.263219	1.848344	4.445488	1.944901	1.286348	47.952	0.116325	Sud 2021
138	3.825449	2.142251	1.199381	12.93495	5.659039	NA	40.3752	0.43005	Sud 2020
150	8.040288	4.502561	1.671831	3.007566	1.31581	3.136196	27.1146	0.16638	Sud 2020
156	5.882726	3.294327	0.351852	17.21435	7.53128	NA	28.2036	0.103165	Sud 2020
185	2.171201	1.215873	0.485467	26.04254	11.39361	2.013312	64.6002	0.15087	Sud 2020
189	2.61751	1.465805	8.639613	0.782318	0.342264	NA	13.8456	0.15369	Sud 2020
191	0.953241	0.533815	0	0.824468	0.360705	NA	16.4208	0.18377	Sud 2020

Figure III - 26 : Densité de carbone sur les parcelles agroforestières (t/ha) dans différents pools

Le fichier contient les champs suivants :

- Num_par : nombre de parcelles
- Acacia BA : densité de la biomasse d'acacia en surface (t/ha)
- Acacia BS : densité de biomasse de l'acacia en dessous du sol (t/ha)
- Bois mort couché : densité de carbone du bois mort couché (t/ha)
- Bois mort debout BA : densité de carbone en surface du bois mort sur pied (t/ha)
- Bois mort debout BS : densité de carbone du bois mort sur pied dans le sol (t/ha)
- Carbone dans la litière : densité du carbone dans la litière (t/ha)
- Carbone du sol : densité de carbone organique dans le sol (t/ha)
- Végétation non-arborescente : densité de carbone de la végétation non-arborescente (t/ha)
- zone_year : zone et année.



III.4.2.8 Sommaire des réservoirs de carbone par zone et année de plantation

Ce résumé sert de base au calcul des facteurs d'émission et donne également un résumé du contenu total en carbone des parcelles par zone et année de plantation, ainsi que les incertitudes associées. Il est stocké dans le fichier « carbon_pools_zone_year.csv ». Le fichier se présente comme suit :

pool	Centre 202	Centre 202	Centre 202	Nord 2020	Nord 2021	Sud 2020	Sud 2021
Acacia BA	5.571087	0.937116	0.146138	2.556532	0.227714	3.915069	0.54495
Acacia BS	3.119809	0.524785	0.081837	1.431658	0.12752	2.192439	0.305172
Bois mort c	2.584003	0.932272	0.291826	0	0.614003	2.469629	1.200932
Bois mort c	13.31563	7.890246	23.4911	0.182926	11.1691	10.13437	6.916286
Bois mort c	5.825587	3.451983	10.27736	0.08003	4.886483	4.433785	3.025875
Carbone d	1.585843	0.950294	0.910773	1.828782	1.31418	2.574754	1.31171
Carbone d	25.19047	30.55668	40.1128	30.56662	29.41356	31.76	48.7972
VÃ©gÃ©ta	0.193909	0.146002	0.095175	0	0	0.197988	0.187765
Total	57.38633	45.38938	75.40701	36.64654	47.75256	57.67803	62.28989
Uncertain	6.428131	2.824813	26.1395	3.785517	9.950463	9.134567	10.93836
Relative Ur	11.2015	6.223511	34.66454	10.32981	20.83755	15.83717	17.56042

Figure III - 27 : Résumé des réservoirs de carbone (t/ha) dans les différents réservoirs

Le fichier contient :

- La première colonne désigne le puits de carbone. Les dernières lignes du tableau contiennent la densité de carbone totale (t/ha), l'incertitude de l'estimation de la densité de carbone à une erreur standard (t/ha) et l'incertitude relative de l'erreur standard par rapport à la moyenne (%).
- Les autres colonnes contiennent les valeurs respectives pour les différentes combinaisons de zone de plantation et d'année de plantation.



III.4.2.9 Rapport de sortie

Le rapport est généré, selon le choix de l'utilisateur, au format HTML ou Word. En HTML (dans le navigateur web), il se présente comme suit :

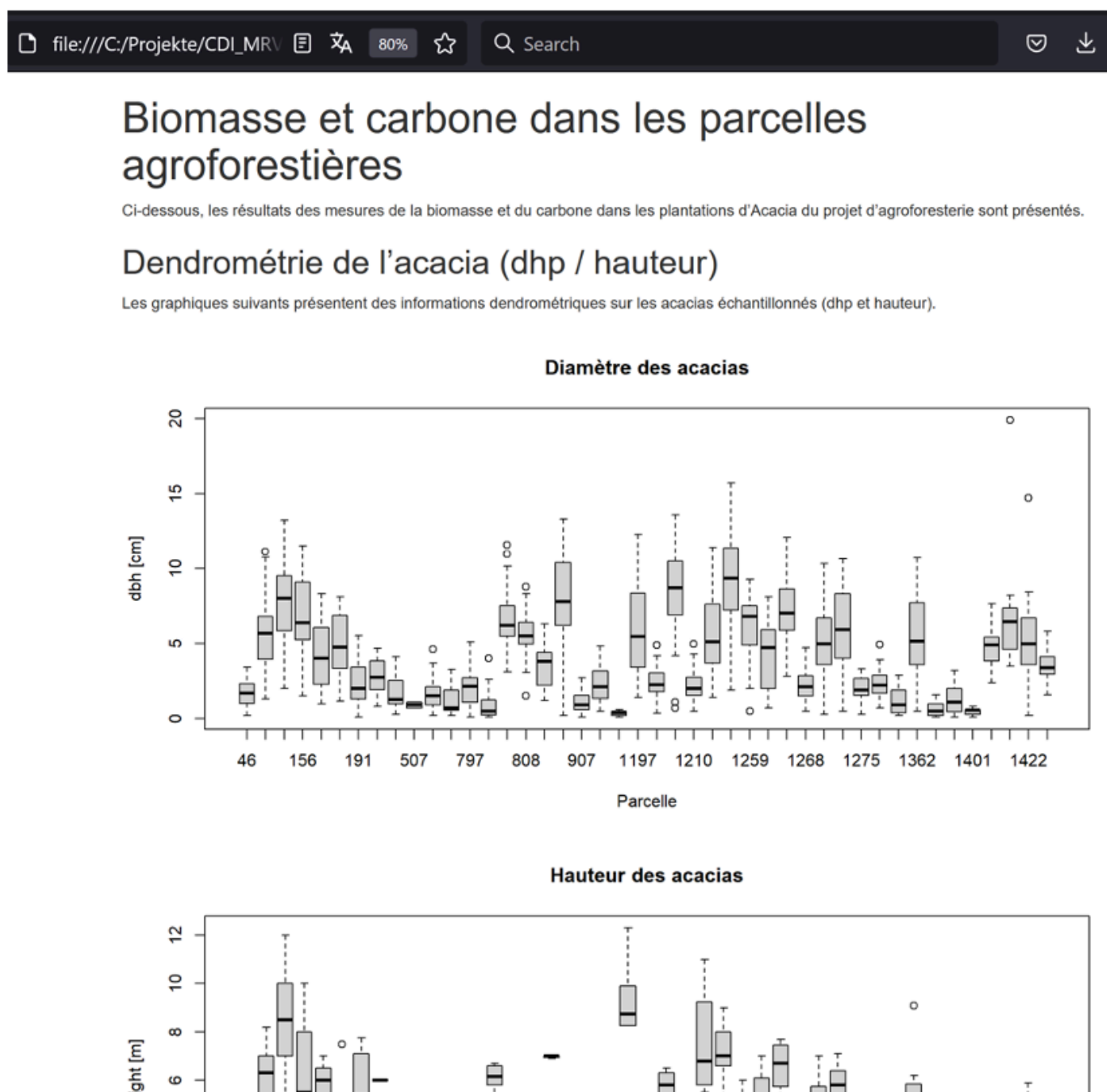


Figure III - 28 : Aperçu d'une page partielle du rapport d'analyse des données de terrain.

SECTION IV

ANALYSE DE DONNÉES / IMAGES À HAUTE RÉSOLUTION PROVENANT DE DRONES ET SATELLITES POUR LE MNV LOCAL D'AGROFORESTERIE AVEC ACACIA

MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 3

AUTEURS :

Gernot Ruecker - Stefanie I. Korswagen





SECTION IV: ANALYSE DE DONNÉES / IMAGES À HAUTE RÉOLUTION PROVENANT DE DRONES ET SATELLITES POUR LE MNV LOCAL D'AGROFORESTERIE AVEC ACACIA MANUEL DE L'UTILISATEUR - VOLUME 3

IV.1 À propos de ce volume

IV.1.1 Objectif du manuel

Ce volume du manuel décrit et guide les utilisateurs dans l'application des méthodes de télédétection afin d'estimer l'absorption du carbone dans la biomasse aérienne des plantations d'acacia dans le cadre de la mise en place du système MNV pour l'agroforesterie dans la zone à l'est du parc national de la Comoé (départements de Dabakala et Kong). Les méthodes de télédétection sont utilisées pour compléter l'échantillonnage sur le terrain des différents stocks de carbone et réduire l'erreur d'estimation des moyennes. Il vise à mettre à disposition le raisonnement, la méthodologie, les étapes détaillées et les outils (logiciels) nécessaires à la collecte, au traitement et à l'analyse des données de télédétection acquises par des drones et des satellites. Ce manuel a pour but de servir d'instrument de formation et de « former les formateurs ».

IV.1.2 Public visé

Ce manuel s'adresse aux acteurs qui sont actuellement ou potentiellement impliqués dans la gestion des données dans le système agroforestier ivoirien. Il s'adresse en particulier au personnel technique et aux représentants locaux des institutions publiques suivantes : ANADER, MINEDDTE (DLCCTE, DR, SEP-REDD+) et le MINEF.

Le manuel se réfère à des données agroforestières provenant de plantations d'acacias dans la région de la Comoé, en particulier de jeunes acacias âgés de jeunes acacias (*Acacia auriculiformis*, *Acacia mangium* et hybrides de ces deux espèces). Le paysage est hétérogène et comprend des parcelles de végétation d'arbres, de buissons et d'herbes avec une densité de couverture d'arbres variable. Les données recueillies par drone dans ces zones et l'analyse sont destinées à calculer les estimations du carbone de la biomasse des acacias, ce qui permet de calculer la séquestration actuelle et potentielle du CO₂ par les acacias.

Ce manuel peut donc intéresser d'autres personnes concernées par ces écosystèmes et par des méthodologies similaires de calcul du carbone de la biomasse.



IV.2 Partie 1 : Analyse des données des drones

IV.2.1 Phase de préparation

IV.2.1.1 Définir le champ d'application et les objectifs de l'étude

Ce volume décrit une partie d'une méthodologie plus large visant à concevoir un système MNV local adapté à l'estimation et au suivi du carbone stocké dans un système agroforestier d'acacia naissant. La méthodologie décrite ici vise à calculer et analyser le carbone contenu dans les acacias de parcelles agroforestières de petits exploitants à partir d'images obtenues par des drones. Ces méthodes font suite à l'évaluation directe de la biomasse sur le terrain, qui visait à compiler des informations sur le site, à mesurer la biomasse aérienne, le carbone organique du sol, le bois mort et la litière, et à développer des équations allométriques spécifiques aux espèces en utilisant un échantillonnage semi-destructif.

Pour d'autres applications de la méthodologie décrite dans ce manuel, il est important de définir clairement les objectifs de l'étude et les utilisations prévues des données et de l'analyse. Sur cette base, il est possible de définir la portée de l'étude, en termes d'extension géographique de la zone à analyser, de calendrier et/ou de fréquence de la collecte des données, de quantité et de qualité des données.

IV.2.1.2 Conception de la méthodologie

Dans cette étude, la méthodologie comprend les phases (à gauche), les étapes (au centre) et les méthodes ou outils (à droite) suivants :

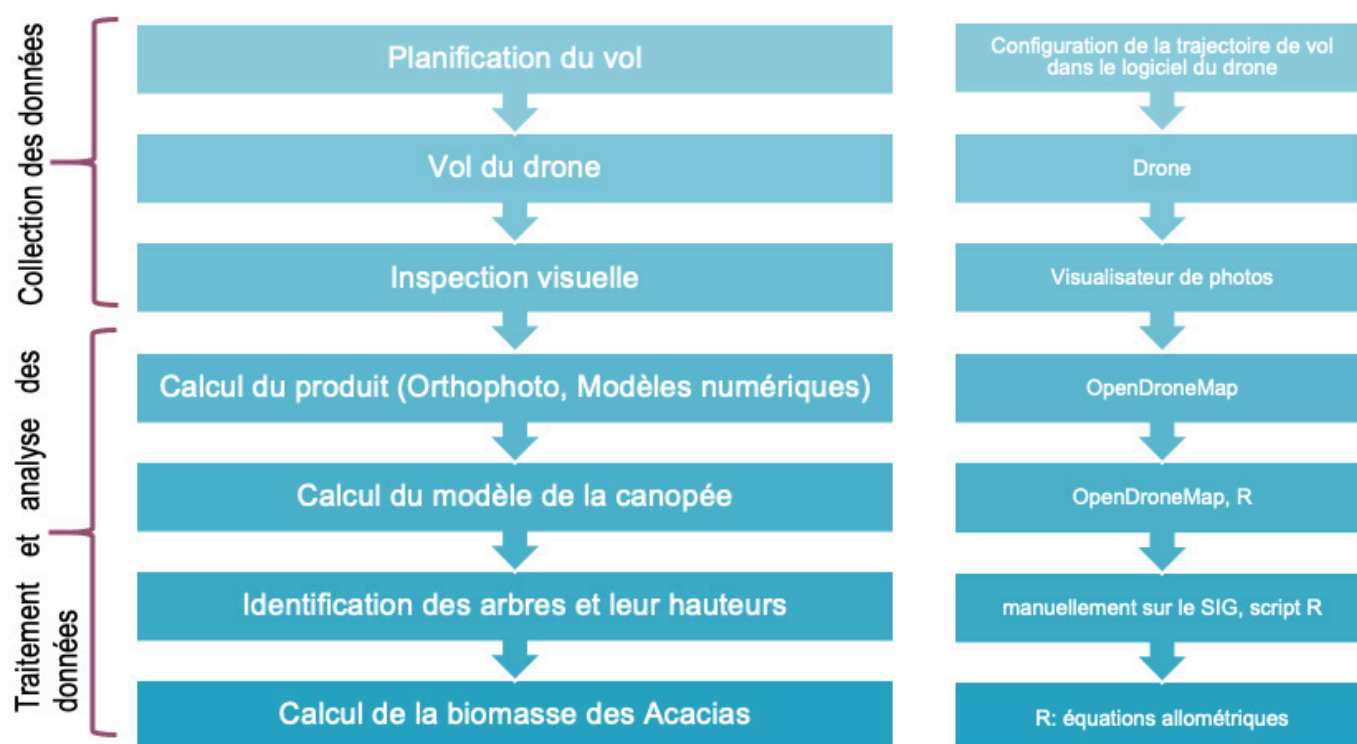


Figure IV - 1 : Flux de travail pour le traitement des données des drones



IV.2.1.3 Autres considérations

D'autres aspects importants (non exhaustifs) à discuter et à prendre en compte pour la conception de la méthodologie comprennent :

- Définition des rôles et des responsabilités au sein de l'équipe, par exemple en ce qui concerne l'acquisition, le traitement, l'analyse, la communication et la publication des données, entre autres ;
- Exigence de capacités (pour le pilotage de drones, etc.) ;
- Exigences matérielles et logicielles pour mener l'étude, ainsi que pour stocker et traiter les données ;
- Ressources financières disponibles pour acheter les logiciels et le matériel nécessaires, ou pour les louer (par exemple, un drone) ;
- Temps et la disponibilité pour planifier et réaliser l'étude.

En outre, il est utile de prévoir des ressources et des situations d'urgence, par exemple si le vol du drone doit être répété en raison de la qualité insuffisante des données, ou si un logiciel ouvert ne donne pas les résultats escomptés et qu'il faut acquérir une version payante.

IV.2.2 Phase de collecte des données

Les sections suivantes décrivent les étapes de la collecte de données et abordent certaines questions concernant les choix, les données et les outils qui devraient être discutés au cours du processus.

IV.2.2.1 Planification du vol

Le vol du drone doit être soigneusement planifié et testé.

La planification du vol du drone implique de prendre des décisions et de définir des paramètres, tels que



- Quelle est l'extension géographique couverte par le vol ?
- Quel est le meilleur itinéraire pour faire voler le drone afin de couvrir la zone ?
- Quelle est la hauteur optimale au-dessus du sol pour faire voler le drone ?
- Quel est le type d'appareil photo et de photos nécessaires ?
- Quelle est la résolution spatiale optimale des images ?
- Combien d'images (photos) sont nécessaires, ou à quelle fréquence doivent-elles être prises ?
- Quel est l'angle optimal pour prendre les photos ?

Figure IV - 2 : Drone utilisé pour la cartographie des parcelles agroforestières. La caméra est indiquée par le cercle rouge



Pour l'étude de base qui sous-tend ce manuel, l'extension géographique des parcelles a été couverte par un total de 37 vols de drones. L'itinéraire de vol pour chaque parcelle a été planifié à l'aide d'un logiciel de planification des vols. En bref, le drone vole en effectuant des transects (lignes droites), en montant et en descendant une parcelle pour couvrir toute son étendue (voir ci-dessous).

L'itinéraire de vol, la hauteur et l'angle de prise de vue ont été testés au cours de plusieurs vols. Habituellement, un drone vole à une altitude comprise entre 50 et 90 m au-dessus du sol. Ici, après avoir effectué une série de tests avec différentes hauteurs et différents angles, une altitude standard de 70m a été sélectionnée.

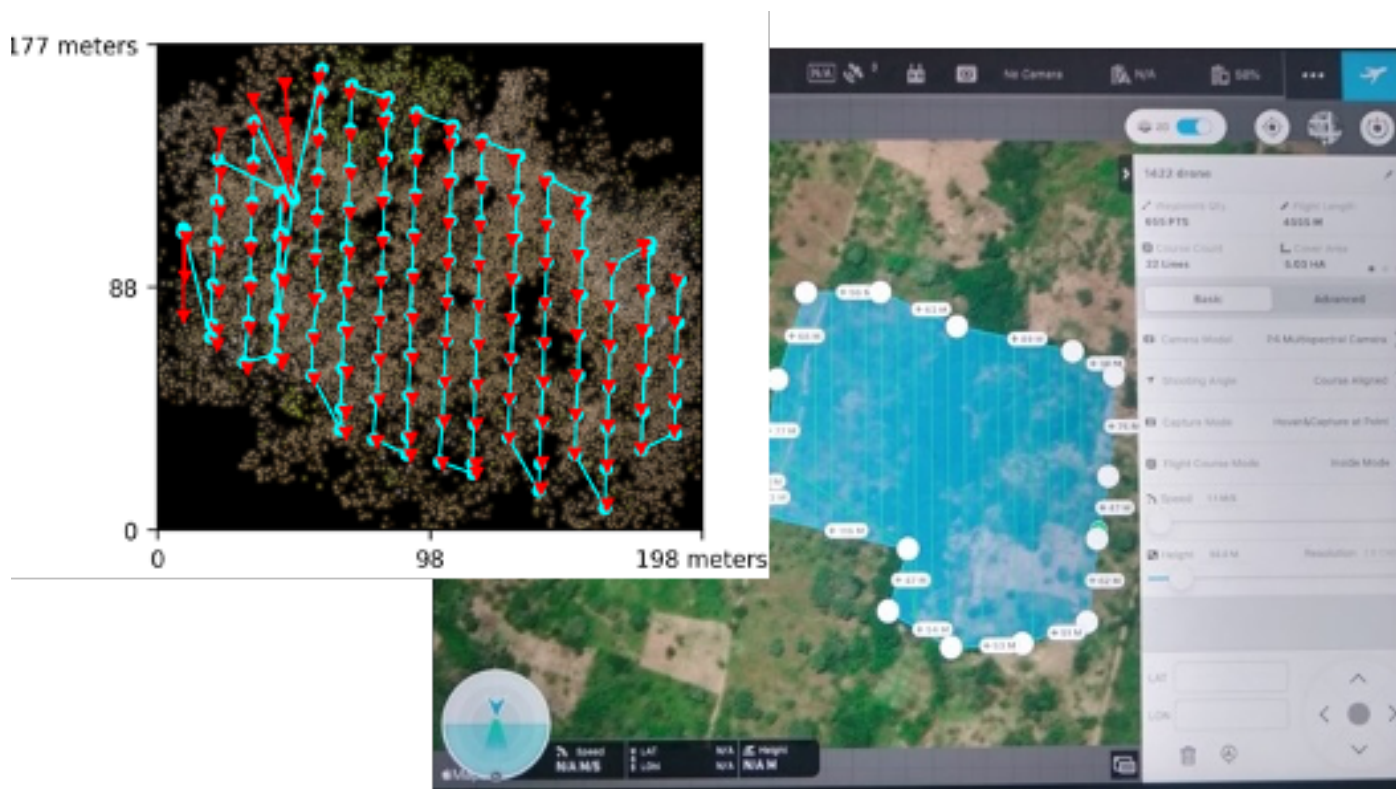


Figure IV - 3 : Planification du vol du drone (exemples de trajectoires de vol pour l'acquisition d'images).

Pour étudier la parcelle, plusieurs photos (70 - 300) ont été prises le long des transects prévus. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des photos prises en regardant directement du haut vers le sol (à partir du nadir). Le choix du nadir plutôt que des angles inclinés présente plusieurs avantages : premièrement, il minimise le nombre d'artefacts de traitement dans les images finales ; deuxièmement, l'utilisation d'un seul angle d'observation et d'une seule altitude a permis de réduire considérablement le temps de vol. Les images ont une résolution spatiale de 40 cm et ont été prises avec un intervalle de temps de 10 secondes, ce qui permet un chevauchement important entre les images (environ 80 %). Ce chevauchement d'un objet vu sous deux angles différents est le principe clé de la production d'images orthographiques.

Les caractéristiques indiquées ici sont spécifiées dans le logiciel de pilotage du drone. Avec les paramètres définis, le vol du drone peut se dérouler de manière tout à fait autonome.



BOX 1: L'IMPORTANCE DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET DE L'HORAIRE DE VOL

Avant d'aller sur le terrain pour tester les vols de drones, il est important de s'informer soigneusement des conditions météorologiques sur place. Un rapide coup d'œil aux services météorologiques locaux ou nationaux peut aider à déterminer la meilleure saison ou le meilleur jour de la semaine pour piloter les drones.

Tout d'abord, il est généralement préférable de mener ces études pendant la saison sèche. Un ciel dense et nuageux ou une atmosphère très humide (ex. brouillard) rendront difficile la reconnaissance des objets sur les images. Des vents forts compliquent le pilotage du drone ou peuvent rendre les images floues. Toutefois, dans les régions où le soleil est très brillant, comme sous les tropiques, un peu de nuage peut aider à réduire le contraste des ombres sur les images.

Deuxièmement, le meilleur moment de la journée pour prendre les photos se situe vers midi, car les ombres des objets sont minimales. Les ombres longues, par exemple au début de la matinée ou en fin d'après-midi, peuvent cacher des objets sur les photos et rendre difficile l'interprétation de l'image.

IV.2.2.2 Faire voler le drone

Après avoir vérifié les conditions météorologiques, effectué une reconnaissance générale du terrain et indiqué les paramètres et l'itinéraire prévu dans le logiciel du drone, l'expert en drone sera prêt à piloter le drone pour collecter des données. Le drone peut en principe voler en autopilote et l'expert peut le surveiller et le guider à l'aide de la télécommande.



Figure IV - 4 : Drone avant le lancement.



IV.2.2.3 Stockage des données et nomenclature

Les données de télédétection ainsi que les logiciels nécessaires requièrent une grande capacité de stockage et de traitement d'un ordinateur ou d'un serveur. En outre, les données de télédétection comprennent généralement de grands ensembles de données et il est très facile de se retrouver rapidement avec une grande quantité de fichiers et de perdre la trace de ce qu'ils représentent.

Il est donc essentiel de disposer d'une structure de stockage et d'une convention de dénomination claires lorsque l'on travaille avec des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des données de télédétection. Voici quelques suggestions générales concernant le stockage des données et la nomenclature :

- Le traitement peut être effectué sur un ordinateur portable ou un PC standard.
Pour traiter les images de drone couvrant l'étendue complète des parcelles agroforestières analysées dans la Comoé, il est conseillé de disposer de (au minimum) 16 Go de RAM et d'un disque dur de 1 To ;
- Veillez à télécharger la version du logiciel correspondant à votre système d'exploitation (Windows ou Mac).

Par exemple : Selon votre système d'exploitation, vous pouvez utiliser la dernière version du logiciel ou une version antérieure. Pour plus de détails sur le logiciel et les recommandations d'installation, veuillez-vous référer à l'annexe sur les exigences logicielles.

- Évitez de nommer les fichiers ou les dossiers avec des espaces vides (« ») ou des symboles («&», «@», «+» ou «/»), car certains logiciels risquent de ne pas reconnaître le fichier.
Par exemple, lorsque vous travaillez avec ArcGIS, le logiciel ne trouve pas facilement les dossiers dont le nom comporte plus de 13 caractères, ni les fichiers dont le nom contient des espaces vides ;
- Il est conseillé de nommer les dossiers de données des images de télédétection en fonction de la date du vol, du numéro d'identification de la parcelle
(par exemple 1027_2021_07-03-2023) ;
- N'oubliez pas que les données brutes seront traitées et que de nouveaux produits seront créés sur la base des images, tels que les orthophotos, les modèles numériques et d'autres produits tridimensionnels. Cela augmentera rapidement la quantité et la complexité des données.
Par conséquent, des structures et des noms clairs dès le départ faciliteront l'analyse des données à des stades ultérieurs.



IV.2.2.4 Inspection visuelle

Au début d'une campagne, il est recommandé de procéder à une inspection visuelle superficielle des données avant leur traitement afin de détecter d'éventuelles failles dans les données. Les aspects les plus importants à évaluer sont les suivants :

- La qualité de l'image est-elle adaptée à l'objectif de l'étude ?
 - o La résolution spatiale est-elle suffisante pour identifier des éléments individuels dans les images, tels qu'un arbre ou une route, mais aussi assez large pour identifier des motifs ou des textures, tels que la canopée d'un arbre formant une forêt ?
 - o Les images sont-elles claires et non floues ?
 - o Les images sont-elles dépourvues d'ombres importantes qui gênent l'interprétation de l'image ?
- Le laps de temps choisi entre les images, et donc le chevauchement entre les images, sont-ils suffisants pour permettre l'identification d'un objet sur plusieurs images ?
En d'autres termes, est-il possible d'identifier un objet, tel qu'un arbre, sur plusieurs images et sous différents angles ?
- Le positionnement et les coordonnées géographiques des images sont-ils corrects pour voir si le GPS du drone fonctionne correctement ? Vous pouvez vérifier cela par exemple en téléchargeant ou en superposant les images sur Google Earth. Les images apparaissent-elles au bon endroit ? ou pouvez-vous simplement demander les coordonnées à l'aide d'une visionneuse de photos telle que la visionneuse de photos de Windows ?

Si les réponses sont négatives, il est conseillé de revoir les paramètres choisis pour le vol du drone et le bon fonctionnement des instruments et de refaire un vol d'essai.

Après la première inspection visuelle, il est recommandé de traiter les images pour produire les orthophotos et les MNS autant que possible pendant la campagne afin d'éviter les mauvaises surprises. Le traitement peut être effectué sur un ordinateur portable en quelques heures, par exemple le soir après une journée de vols. Après chaque étape du traitement, compare le géoréférencement avec les SIG et les données d'images disponibles (par exemple Bing maps) pour vérifier si la précision est suffisante.



Figure IV - 5 : Images séquentielles prises par le drone.

Les cercles bleus et rouges marquent le même objet sur les différentes images. Les chevauchements temporels et de surface entre les images permettent de produire des orthophotos.

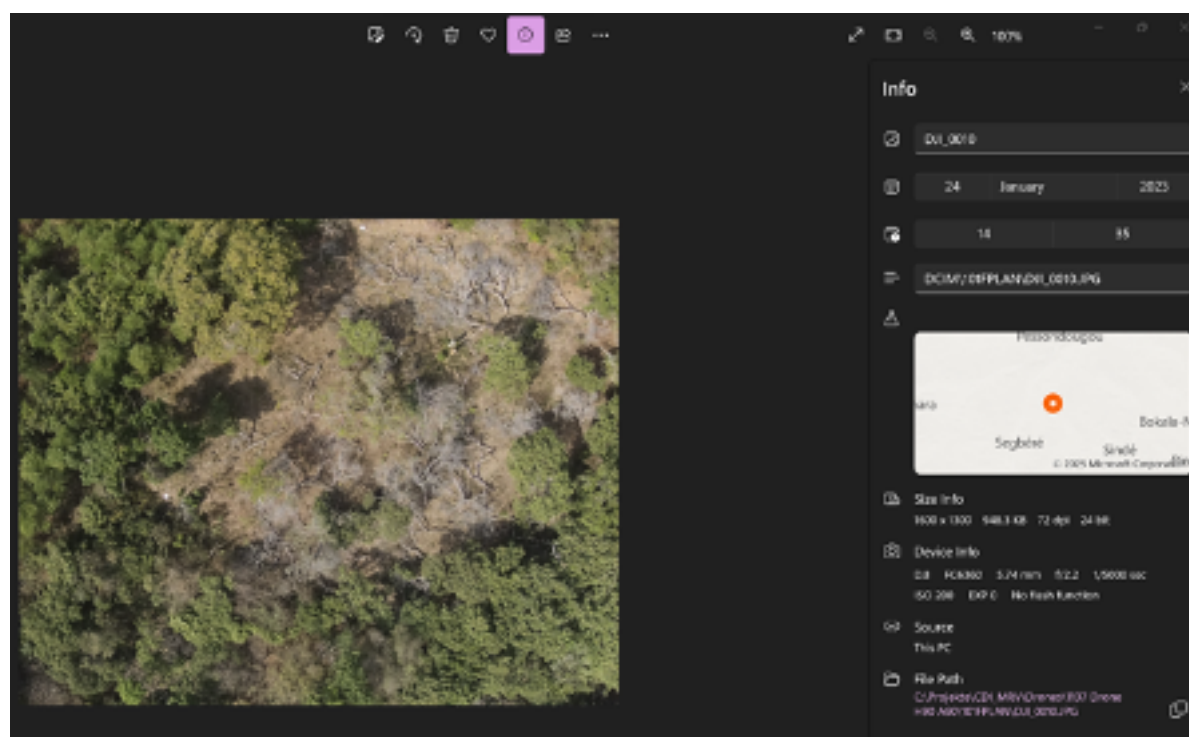


Figure IV - 6 : Inspection visuelle des images de drone.

Notez que la qualité de l'image est suffisamment bonne pour permettre l'identification d'un seul arbre.



IV.2.3 Phase de traitement et d'analyse des données

Cette section décrit le traitement et l'analyse des données selon les principales étapes suivantes :

1. La production de modèles 3D et d'orthophotos pour l'interprétation visuelle et l'inspection.
2. Dans la même étape, un modèle numérique de terrain et un modèle numérique de surface sont produits.
3. Les modèles numériques de hauteur de la canopée sont dérivés de ces modèles.
4. Les arbres sont automatiquement identifiés et leur hauteur est mesurée.
5. Les équations allométriques permettent d'estimer la densité de la biomasse aérienne, c'est-à-dire le carbone des arbres.

IV.2.3.1 Production des orthophotos

Le principal résultat du vol du drone est une série de photographies aériennes des parcelles choisies. Les photographies se chevauchent considérablement entre les images adjacentes, de sorte qu'un objet (tel que des arbres, des routes, le terrain) peut être vu sous différents angles (différentes positions de la caméra). La technologie Structure from Motion (mise en œuvre dans OpenDroneMap et d'autres outils similaires) peut reconnaître les objets vus sous différents angles et, en utilisant la position de la caméra (obtenue par GPS) et les propriétés de la caméra, il triangule et calcule la position des objets dans un modèle 3D.

Le résultat en 3D est un nuage dense de millions de points de points. Chaque point a été identifié sur plusieurs photos qui se chevauchent et s'est vu attribuer la couleur de la photo, tandis que sa position dans l'espace 3D a été calculée par triangulation. Il peut également être interprété comme un modèle de surface, car il ne montre que ce que la caméra du drone peut voir : comme dans l'exemple ci-dessous, seuls les houppiers, les buissons et le sol découvert peuvent apparaître dans le modèle, mais pas les troncs d'arbres ou d'autres objets cachés sous les houppiers.



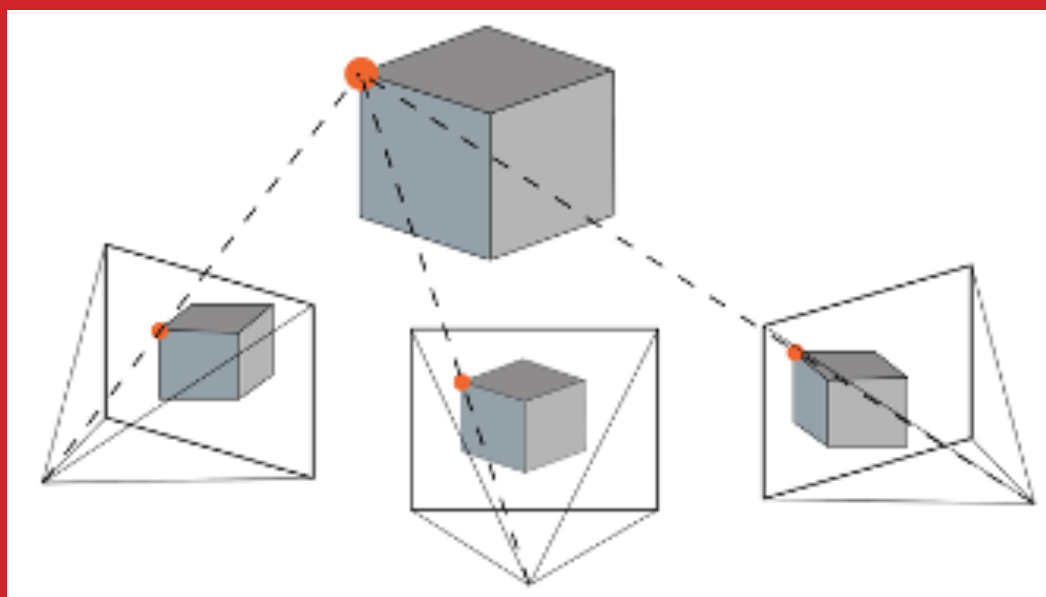
Figure IV - 7 : Nuage de points denses coloré avec les couleurs naturelles des images.



BOX 2: STEREOSCOPIE ET IMAGES EN 3D À PARTIR DE DRONES

Une image tridimensionnelle d'un objet peut être facilement obtenue à partir de deux photos bidimensionnelles de l'objet. Deux conditions seulement doivent être remplies : l'objet doit être photographié (ou vu) sous deux angles légèrement différents et les images doivent se chevaucher sur au moins 60 % de leur surface. En regardant un objet sous deux angles différents, le cerveau humain est capable de recréer une vision ou un modèle en 3D de l'objet. C'est le principe de base de la stéréoscopie.

Un modèle 3D plus complexe peut être créé à l'aide d'une série d'images superposées représentant les mêmes objets. Dans la figure ci-dessous, un objet est vu sous trois angles, ce qui permet de créer un modèle 3D plus précis.



L'utilisation d'un logiciel qui applique les techniques de « structure à partir du mouvement » (en anglais structure from motion) permet d'attribuer des coordonnées géographiques précises aux trois points qui appartiennent en fait au même objet. En d'autres termes, l'objet et les images peuvent être géoréférencés. De cette manière, les images de drone peuvent être converties en orthophotos et en cartes orthographiques, c'est-à-dire en photos aériennes sur une projection cartographique, où les distorsions de la caméra ou du terrain ont été corrigées.



Après avoir téléchargé les données du drone sur un ordinateur, il est conseillé de travailler avec OpenDroneMap pour traiter les données du drone. Ce logiciel permet de stocker et de gérer les données sous forme de projets ou de tâches. Pour les données d'entraînement fournies, 1 tâche correspond à 1 parcelle, c'est-à-dire les données de drone pour le survol d'une parcelle agroforestière (1 à 5 ha). Les parcelles sont nommées selon un numéro d'identification. Dans le dossier ci-dessous, la tâche (parcelle) est 191 :

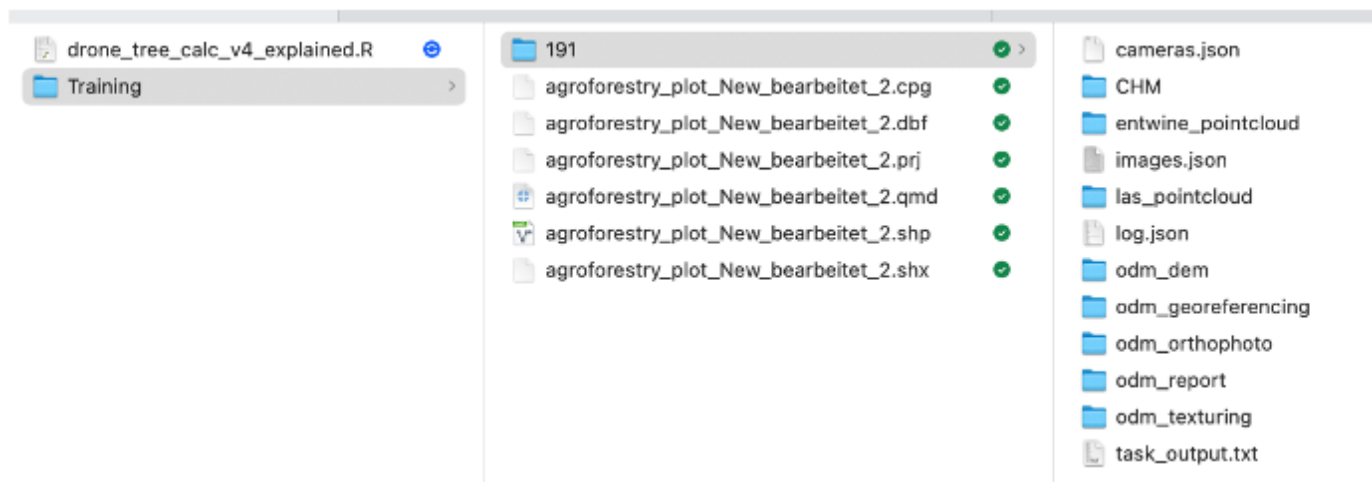


Figure IV - 8 : Structure conseillée pour les données d'apprentissage

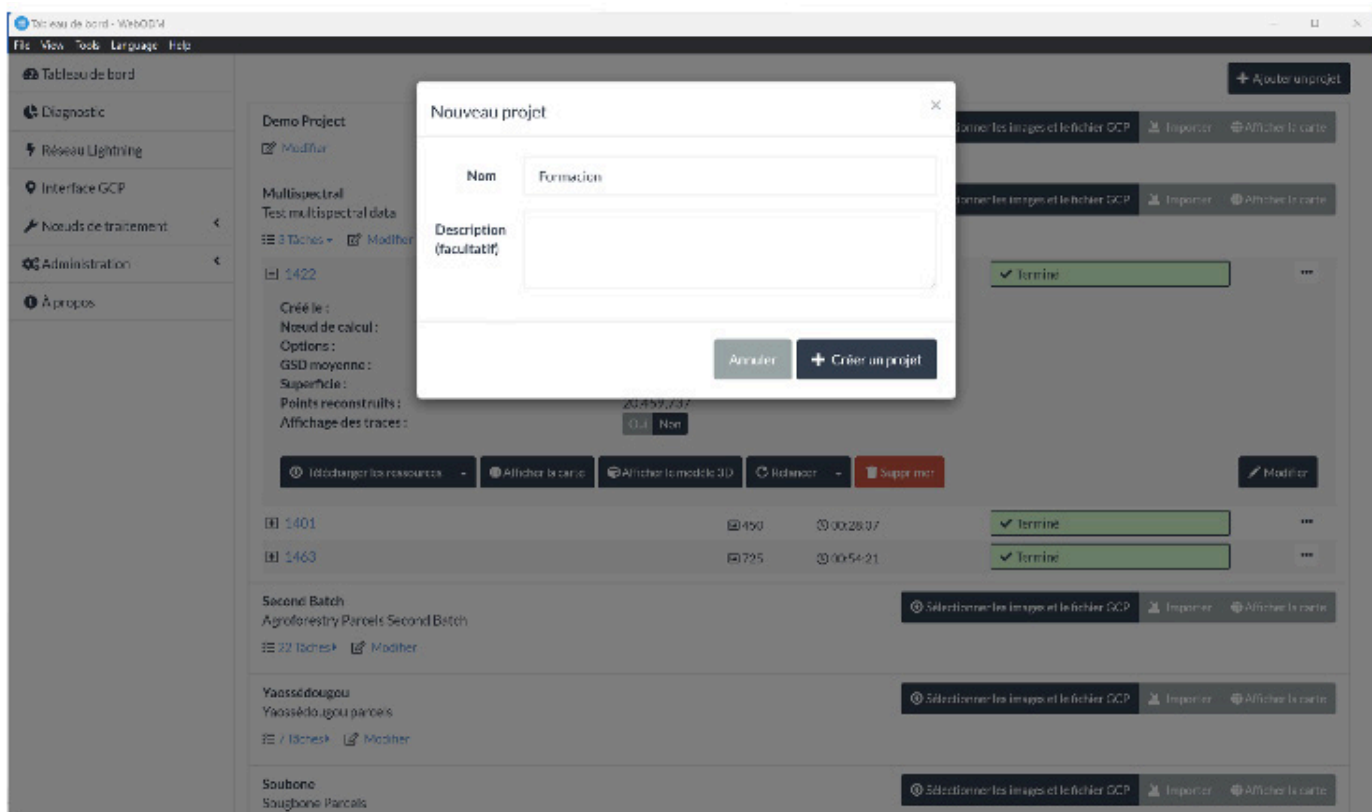


Figure IV - 9 : Création d'un projet dans WebODM

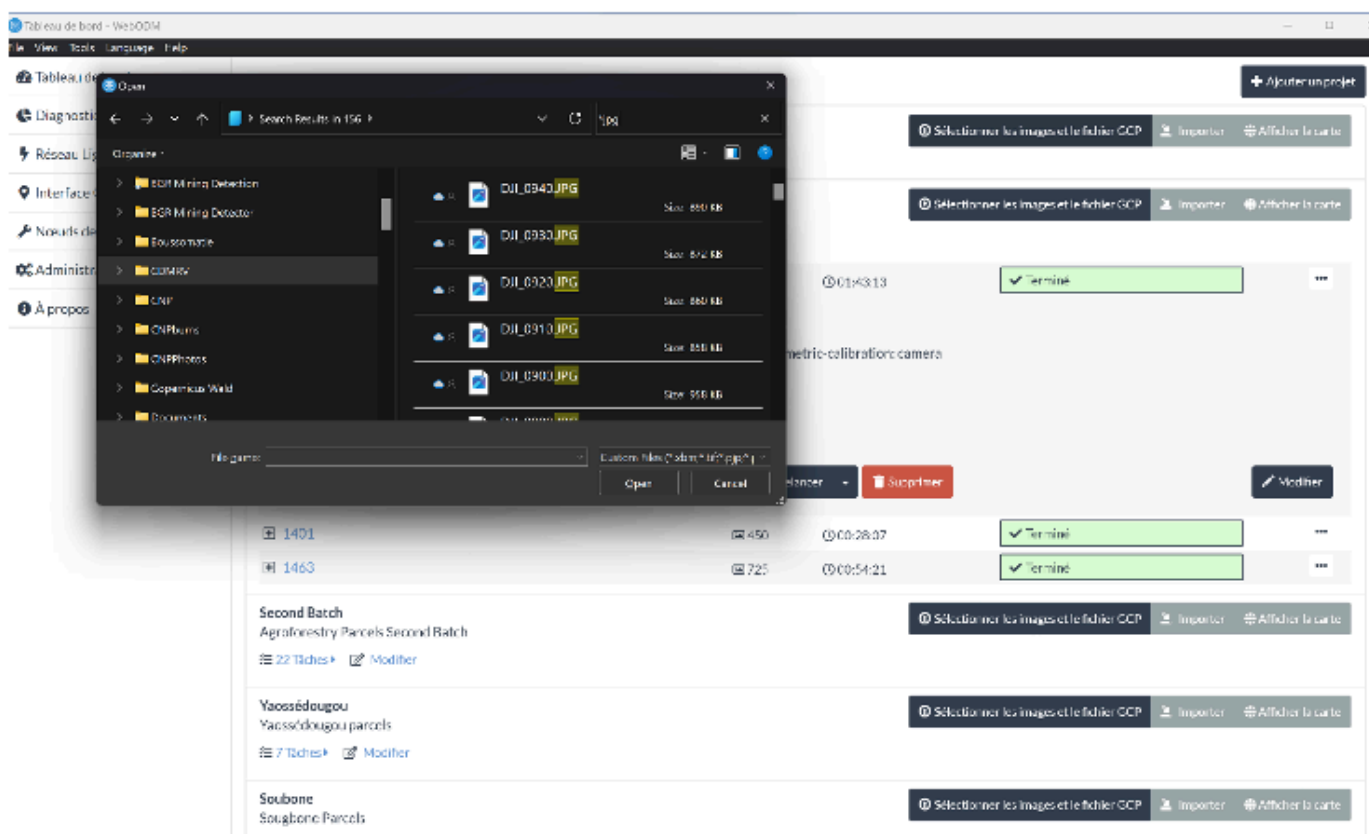


Figure IV - 10 : Chargement des images dans webODM pour le traitement

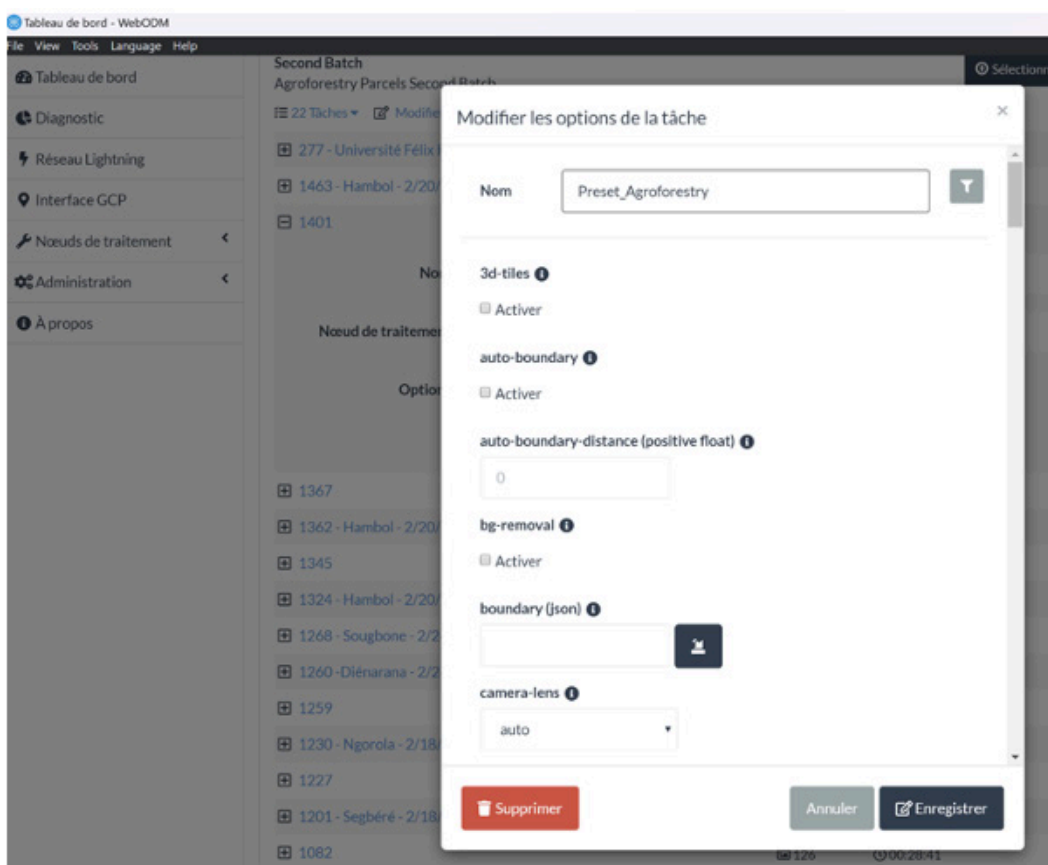


Figure IV - 11 : Options de création pour le traitement des données de drones dans Web ODM



dsm ⓘ

☒ Activer



pc-classify ⓘ

☒ Activer



dtm ⓘ

☒ Activer



pc-filter (positive float) ⓘ

3.5



Figure IV - 12 : Activation de la génération de MNS et de MNT dans WebODM

Figure IV - 13: Options de création pour le filtrage du bruit dans WebODM

Demo Project

[Modifier](#)

📁 Sélectionner les images et le fichier GCP

📁 Importer

📍 Afficher la carte

75 fichiers sélectionnés. Merci de vérifier ces options complémentaires :

Nom	Segbéré - 1/24/2023
Nœud de traitement	node-odm-1 (queue: 0)
Options	dsm:true, dtm:true, pc-classify:true, pc-filter:3.5
Redimensionner les images	Non

🔄 Annuler

🚀 Lancer le traitement

Demo Project

📁 1 tâches [Modifier](#)

📁 Sélectionner les images et le fichier GCP

📁 Importer

📍 Afficher la carte

📁 Segbéré - 1/24/2023	📁 75	🕒 00:00:12	⚙️ Traitement	⋮
-----------------------	------	------------	---------------	---

Figure IV - 14 : Traitement des images sur ODM



Pour traiter les orthophotos, la première étape consiste à sélectionner les données à traiter et à définir les paramètres. Pour les données d'entraînement, les étapes suivantes sont proposées :

- Dans Web ODM, sélectionnez les fichiers *.jpeg, qui représentent des images en couleurs naturelles. Les images sélectionnées seront traitées pour générer les modèles numériques.
- Pour traiter les images de drone, allez dans le menu Option -> Editer les options de la tâche et continuez :
 - o Permettre l'utilisation de modèles numériques de Surface (MNS ou, en anglais, DSM) et de terrain (MNT ou DTM);
 - o Activer la classification pc (pour différencier les points terrain des points non terrain);
 - o Réglez le filtre Pc sur 3,5 (3,5 écarts types afin de filtrer le bruit).
- Exécutez le processus pour chaque tâche (chaque parcelle). Notez que, selon la puissance de traitement de votre ordinateur, le traitement peut prendre de quelques minutes à quelques heures pour chaque tâche.
- Le traitement dans l'ODM génère les résultats suivants pour chaque colis :
 - o Un modèle numérique de terrain (MNT);
 - o Un modèle numérique de Surface (MNS);
 - o Une orthophoto;
 - o Un nuage de points.
- Dans un deuxième temps, allez dans Download et téléchargez «toutes les ressources» (sous la forme d'un fichier *.ZIP).



Figure IV - 15 . Vue d'une tâche WebODM une fois terminée

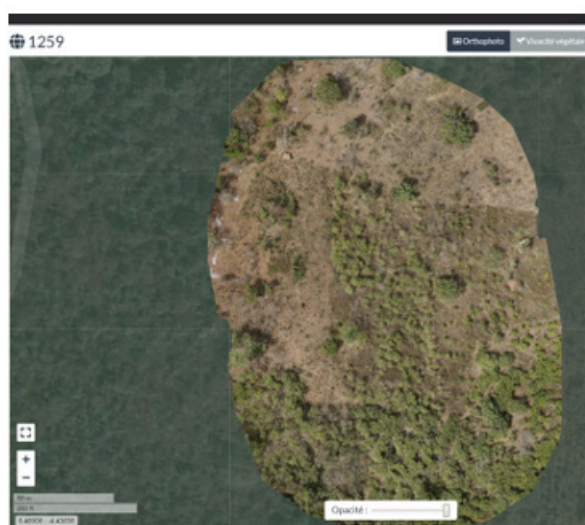


Figure IV - 16 : Orthophoto dans WebODM

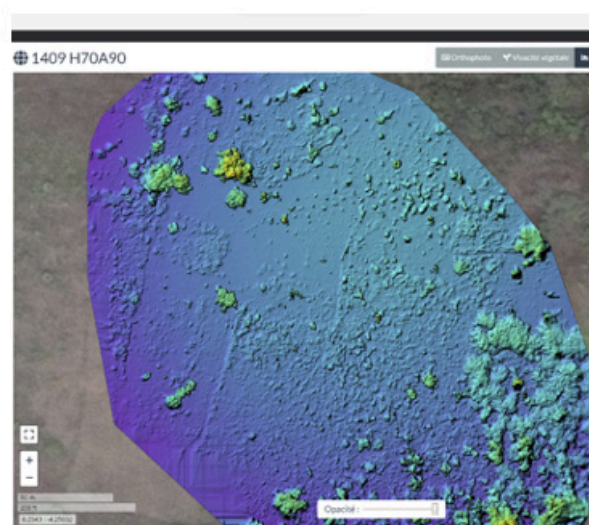


Figure IV - 17 : MNS dans WebODM

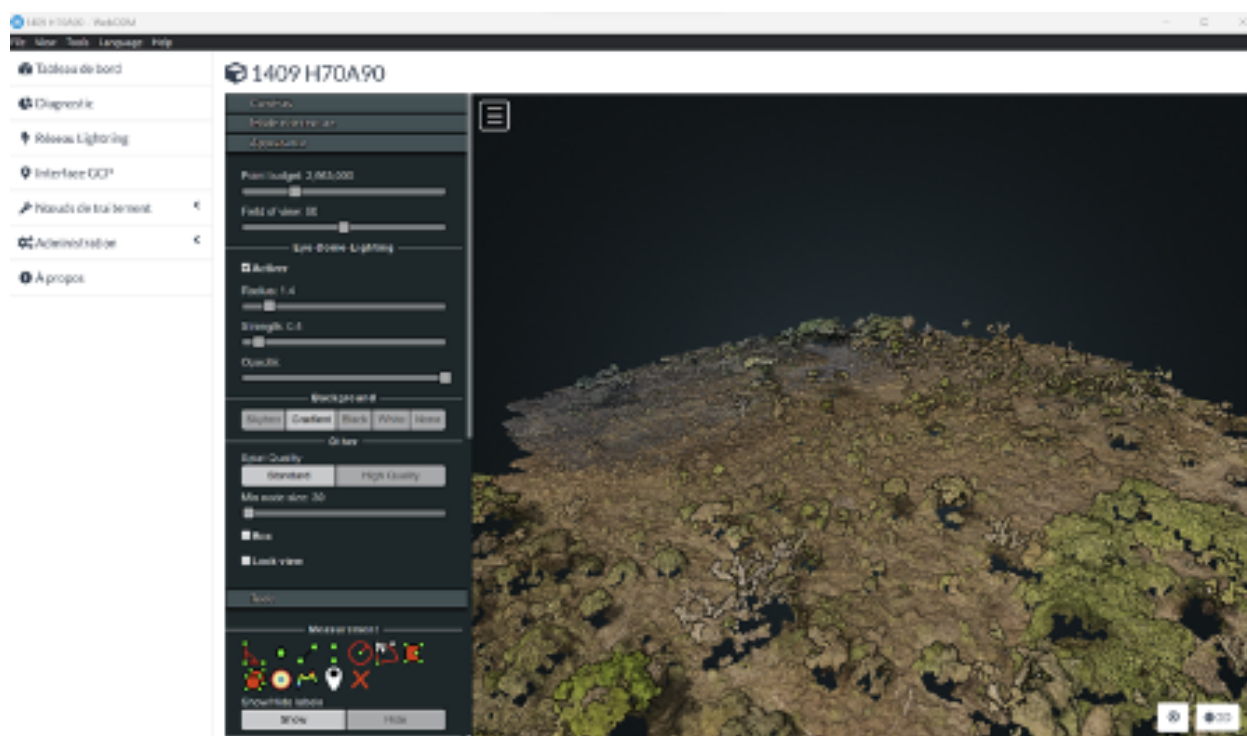


Figure IV - 18 : Vue 3D du nuage de points dans WebODM



Figure IV - 19 : Téléchargement de données à partir de WebODM

Vous pouvez également examiner le résultat dans QGIS et le superposer aux limites de la parcelle pour vérifier la géolocalisation. Le résultat peut ressembler à l'exemple ci-dessous. En zoomant, vous remarquerez de nombreux détails tels que les monticules de culture d'ignames. Il convient de noter que la résolution spatiale, l'étendue des ombres, entre autres aspects mentionnés ci-dessus, jouent un rôle important dans la qualité des produits 3D obtenus.

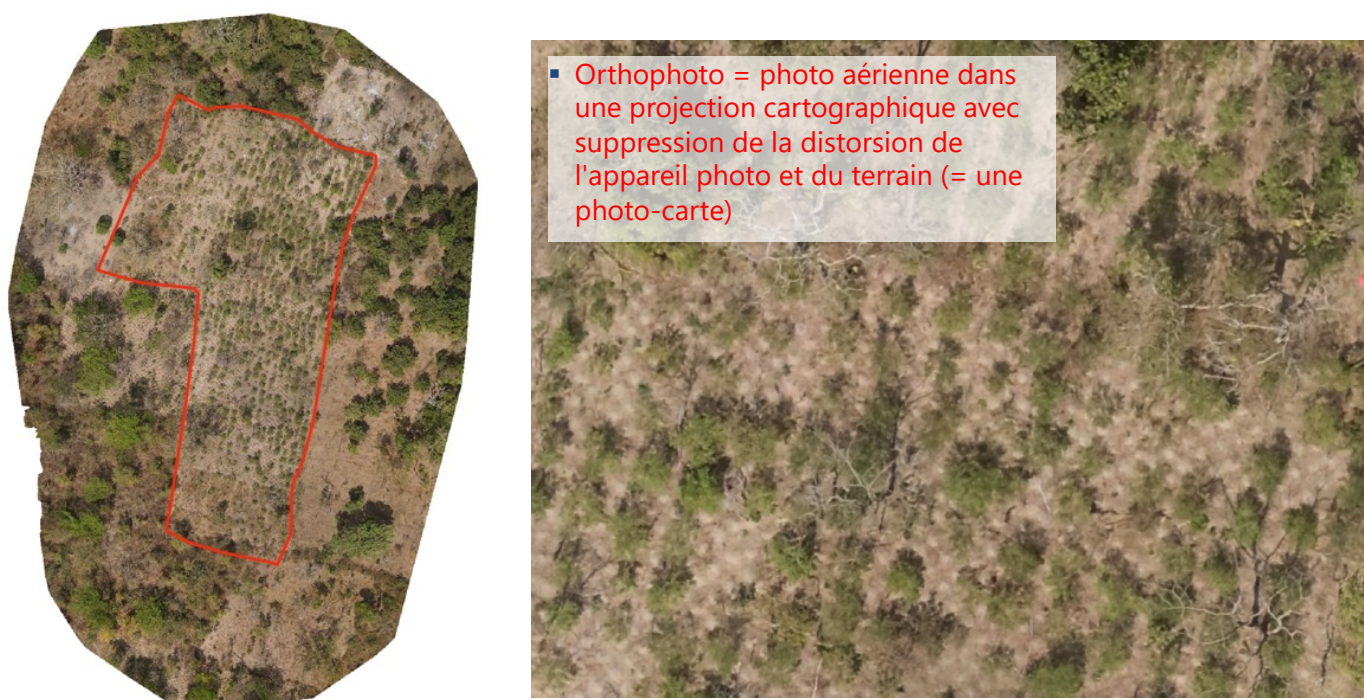


Figure IV - 20 : Inspection visuelle des orthophotos

IV.2.3.2 Modèle numérique de surface

Les données peuvent être facilement manipulées pour produire des modèles numériques de la canopée afin d'estimer la hauteur des arbres. Les instructions ci-dessous se réfèrent au traitement à l'aide de bibliothèques open source pour le logiciel R dans RStudio. En R, le modèle numérique de surface peut être dérivé d'un MNE en utilisant le package raster et le code suivant :

```
##Read in the Digital Surface Model (dsm), using the dem exported from WebODM  
dsm <- raster("odm_dem/dsm.tif")
```

La Figure IV - 21 montre un modèle de surface. Celui-ci est dérivé du nuage de points que l'on peut voir dans la Figure IV - 18. Cependant, le modèle numérique de surface est un raster (*.tiff) : il s'agit d'une image 2D où chaque pixel représente un nombre, dans ce cas-là (en mètres au-dessus du niveau de la mer). Dans l'image ci-dessous, les canopées des arbres qui s'élèvent au-dessus des autres arbres sont facilement identifiables grâce aux couleurs bleu foncé, violet et rose.

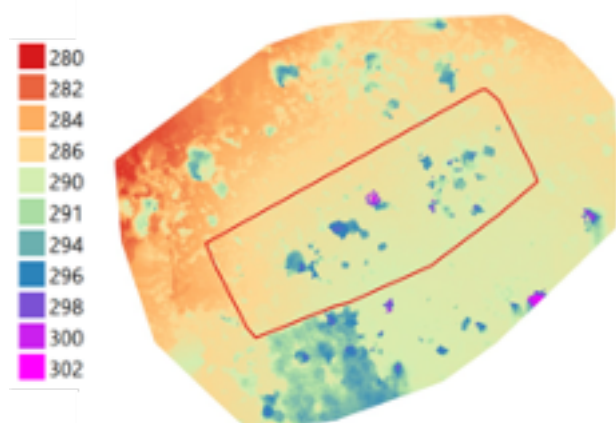


Figure IV - 21 : Modèle numérique de surface avec légende
(hauteur en mètres au-dessus du niveau de la mer)

IV.2.3.3 Modèle numérique de terrain

Comme pour le MNS, le modèle de terrain peut également être ouvert dans R en utilisant le package raster et le code :

```
##Produce the Digital Terrain Model (dtm), using the given "odm_dem"
dtm <- raster("odm_dem/dtm.tif")
```

IV.2.3.4 Modèle numérique de la canopée

Une simple opération permet d'obtenir un modèle numérique de la canopée. Un modèle de canopée est la soustraction du modèle de terrain du modèle de surface :

$$\text{MNS} - \text{MNT} = \text{MNC}$$

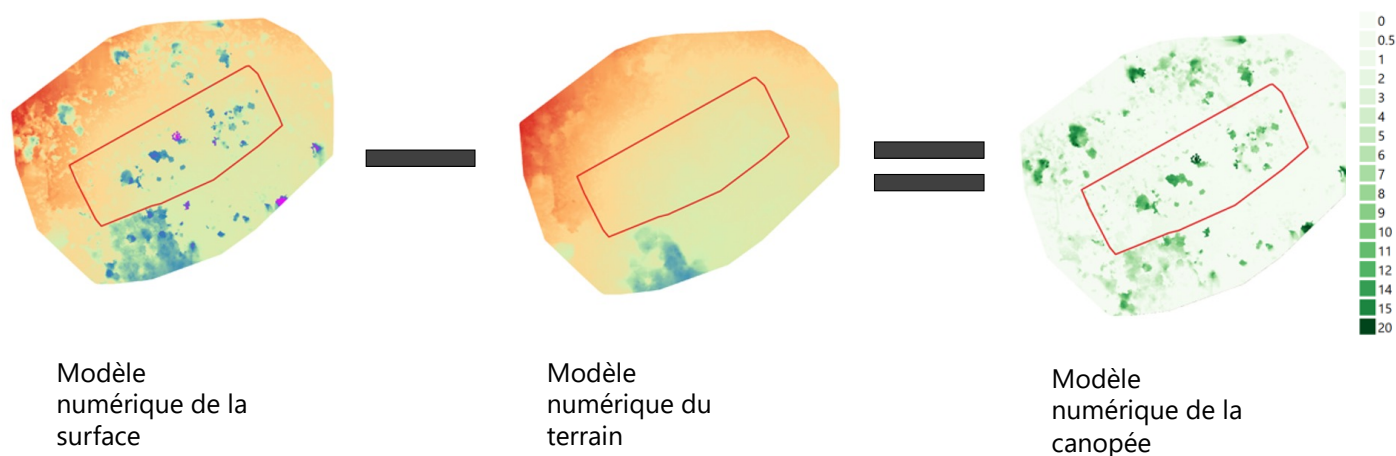


Figure IV - 22 : Dérivation d'un MNC (Modèle numérique de la canopée) à partir d'un MNS et d'un MNT (hauteur du MNC en m)

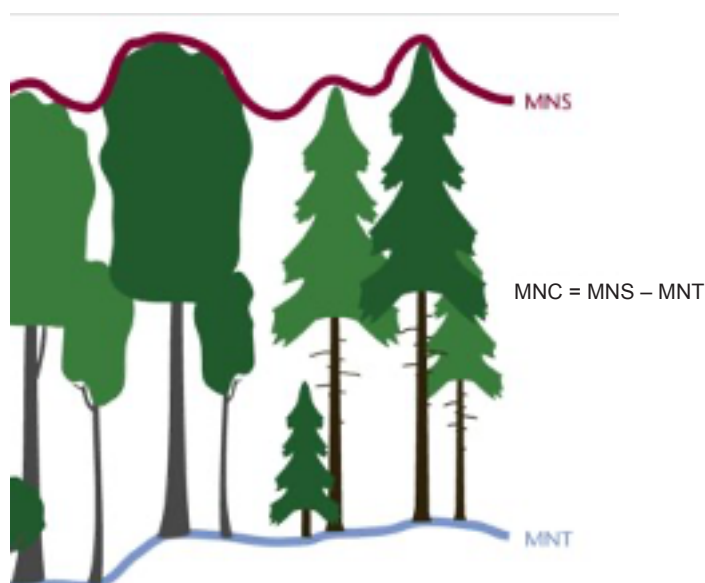


Figure IV - 23 : Illustration du concept de modèle de hauteur de la canopée ($MNC = MNS - MNT$)¹⁸

Le code R suivant explique comment effectuer le calcul du modèle de canopée (CHM). Il applique un facteur de correction au modèle de couronne pour compenser une sous-estimation de la hauteur de la couronne supérieure mesurée sur le terrain :

```
##Produce the Canopy Model (chm), by subtracting the dtm from the dsm
chm <- dsm - dtm
dir.create("CHM")
writeRaster(chm, "CHM/chm_orig.tif", overwrite = T)
chm_corr <- chm*chm_correction_factor
writeRaster(chm_corr, "CHM/chm_corr.tif", overwrite = T)
```

A première vue, le modèle de canopée ci-dessus reprend le modèle de surface. Cependant, la différence essentielle est que le modèle de canopée ne contient que des informations sur la hauteur et la densité de la végétation. Ces informations sont essentielles pour les étapes ultérieures de calcul de la biomasse et du carbone stocké dans cette biomasse.

Il est conseillé de procéder à une nouvelle inspection visuelle des modèles obtenus. Par exemple, un couvert végétal important peut rendre difficile le calcul du terrain sous-jacent. Par conséquent, le modèle de terrain peut ne pas être bon. Des plantations plus jeunes ou des prairies donnent des résultats plus précis pour un modèle de terrain. Il convient également d'examiner attentivement les bases des troncs d'arbres : parfois, une bosse peut être reconnue, qui peut être soit un véritable monticule où des arbres ont été plantés (s'ils ont été plantés intentionnellement), soit une erreur influencée par la haute canopée des arbres. Il convient d'évaluer si l'analyse peut se poursuivre avec les données telles qu'elles sont, ou s'il est nécessaire d'adapter l'analyse, par exemple en excluant ces bosses de l'analyse ultérieure.

¹⁸Bonnet, S., 2009. Un Modèle Numérique de Canopée pour l'estimation de la hauteur dominante des peuplements résineux en Région wallonne. Forêt Wallonne, 98, pp.53-59.



IV.2.3.5 Identification des arbres

L'étape suivante consiste à identifier des arbres individuels à partir du modèle de canopée. Cela est possible en identifiant les points les plus élevés (maxima locaux) dans un environnement adjacent, c'est-à-dire que les sommets des arbres sont plus élevés que la couronne des arbres environnants et que le sol.

Rousell et al. (2020) ont développé une méthodologie d'identification des arbres à l'origine pour l'analyse de données laser aéroportées. Néanmoins, elle peut également être appliquée aux nuages de points à partir de données. La méthodologie est disponible publiquement sous la forme d'un paquetage R.

Les lignes de code suivantes illustrent le processus :

```
##STEP 5: IDENTIFY SINGLE TREES

##the previously exported LAS point cloud is read into R using the lidR
package

mylas      <-      readLAS(paste0("las_pointcloud/",      id_exp,      "-
georeferenced_model.laz"))

#locate_trees function identifies trees based on local maximum
mytrees <- locate_trees(mylas, lmf(ws=5))
plot(mytrees)

# height is then extracted from the corrected MNC
treepoints_buffered <- st_buffer(mytrees_noZ, 1)
height <- exact_extract(chm_corr, treepoints_buffered, fun = "max")
treepoints_buffered <- cbind(treepoints_buffered, height)
treepoints_buffered_sample <- treepoints_buffered[mysample,]

st_write(treepoints_buffered, "tree_heights.shp", append = F)
st_write(treepoints_buffered_sample,      paste0("tree_heights_",      id_exp,
".shp"), append = F)
```

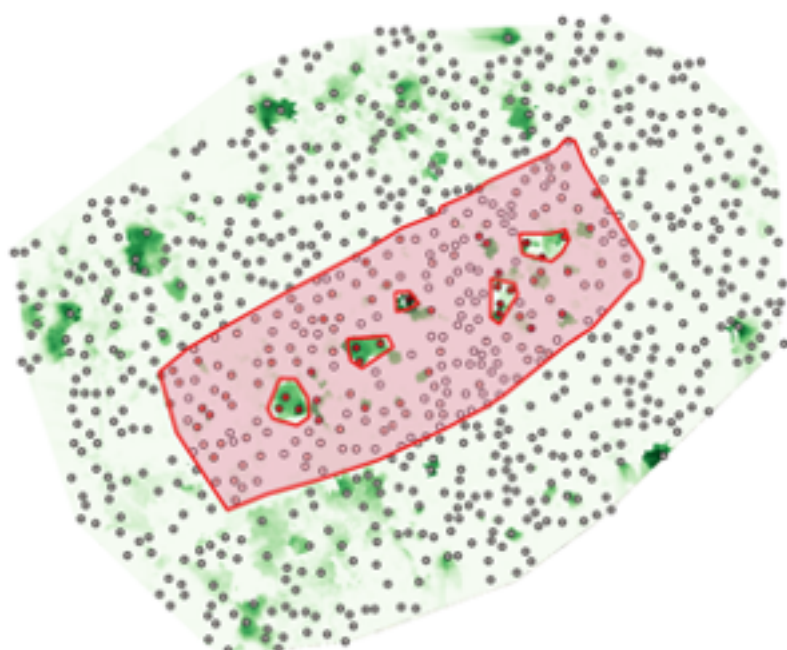



Figure IV - 24 : Identification des acacias plantés en R et manuellement. Le modèle de la canopée des arbres se trouve en dessous. Les points sont les cimes des arbres identifiés à partir du modèle de hauteur de la couronne. Les lignes rouges montrent les données vectorielles utilisées pour exclure les arbres autres que les acacias.

Ensuite, en fonction du paysage et des parcelles agroforestières, il est important d'identifier les arbres à inclure dans l'analyse de la biomasse. L'objectif est d'analyser la biomasse et le stockage de carbone des acacias ; les autres arbres sont donc identifiés et masqués.

Cela peut être fait manuellement dans QGIS. En regardant le modèle de canopée et les orthophotos sur QGIS, et en ayant une connaissance de la zone et des espèces, il est relativement simple de repérer les canopées d'arbres remarquables qui n'appartiennent pas à des acacias. Pour sélectionner la zone de plantation d'acacias et masquer les autres zones (autres arbres ou zones au sol), une couche de polygones (données vectorielles, sauvegardées sous *.shp) est créée dans QGIS, puis la zone plantée d'acacias et d'autres arbres est cartographiée visuellement.

Cette étape est importante afin d'exclure ultérieurement la biomasse des arbres autres que les acacias du calcul de la biomasse des acacias et du stockage du carbone.

IV.2.3.6 Calcul de la biomasse et du carbone de la biomasse

Les dernières étapes consistent à calculer la biomasse de la végétation d'acacia. Le premier volume de ce manuel a préalablement identifié et synthétisé les équations allométriques nécessaires pour les acacias de la zone d'étude. Il est donc possible d'appliquer ces équations aux modèles numériques. Dans le code suivant, les paramètres sont déjà adaptés à la zone et aux acacias. Le script suit ce processus :



Figure IV - 25 : Flux de calcul pour estimer la densité de la biomasse et de carbone d'acacia à partir de drones



```
#get area covered by acacia
acacia_area <- plots[plots$ID_Exploit == id_exp & plots$class == AcaciaKey,]
plot(acacia_area[, "class"])
treepoints_buffered_acacia <- treepoints_buffered[acacia_area,]
treepoints_buffered_acacia <-
treepoints_buffered_acacia[treepoints_buffered_acacia$height <
maxAcaciaheight & treepoints_buffered_acacia$height > minAcaciaheight,]
#Application of allometric formula by Kapp et al.(2023)
treepoints_buffered_acacia$biomass <- biomass_height <- 0.5195 *
(treepoints_buffered_acacia$height)^2 - 2.7786 *
treepoints_buffered_acacia$height + 5.3583
st_write(treepoints_buffered_acacia, "treepoints_buffered_acacia.shp",
append = F)
##STEP 6: CALCULATE BIOMASS AND PRODUCE BOXPLOTS
boxplot(treepoints_buffered_acacia$height, main = paste("Estimated heights
of Acacias in parcel", id_exp), ylab = "height[m]", xlab = id_exp )
boxplot(treepoints_buffered_acacia$biomass, main = paste("Estimated biomass
of Acacias in parcel", id_exp), ylab = "height[m]", xlab = id_exp )
```

```
mean_biomass <- mean(treepoints_buffered_acacia$biomass)
sd_biomass <- sd(treepoints_buffered_acacia$biomass)
se_biomass <- sd_biomass/sqrt(nrow(treepoints_buffered_acacia))

acacia_area$area <- as.numeric(st_area(acacia_area))
acacia_area$biomass <- acacia_area$area/10000 * 1055 * mean_biomass

totalEstimatedAcaciaBiomass <- sum(acacia_area$biomass)
totalEstimatedAcaciaBiomassDensity <- (totalEstimatedAcaciaBiomass /
sum(acacia_area$area/10000))/1000)
```

Le code effectue les calculs et produit les diagrammes en boîte suivants, qui analysent la hauteur des arbres et la biomasse :

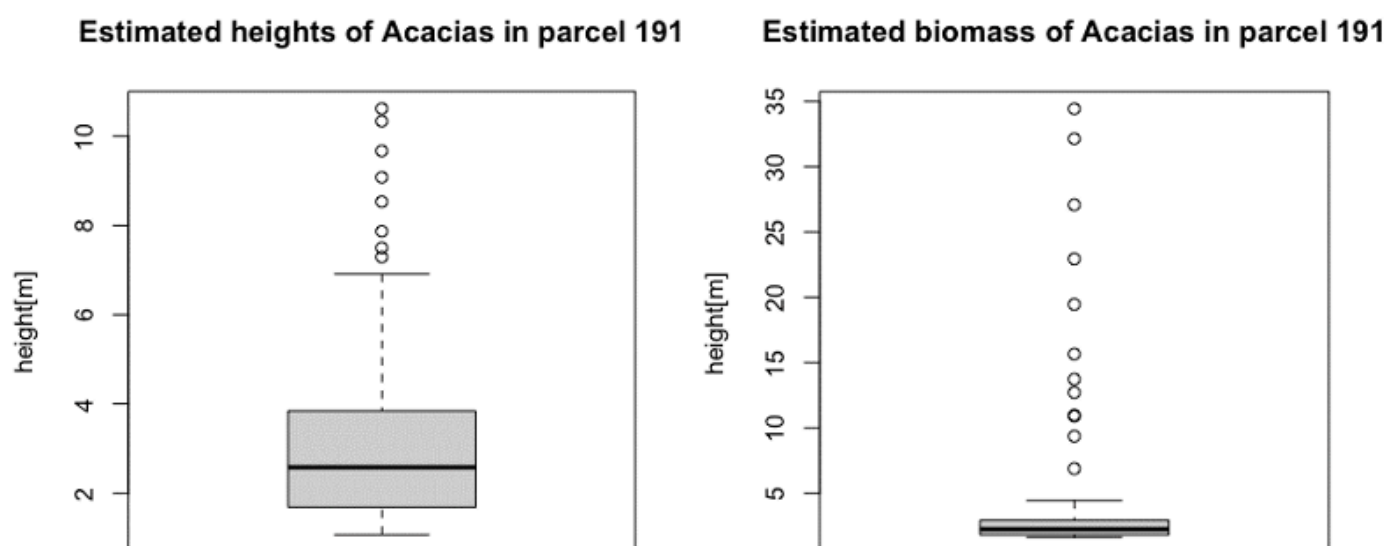


Figure IV - 26 : Graphique en boîte montrant la médiane (ligne noire épaisse), les quantiles de 25 % et 75 % (limites supérieure et inférieure de la boîte) et les valeurs aberrantes de la hauteur des arbres et de la biomasse d'une parcelle.

Enfin, il est utile d'explorer et de se familiariser avec les différents résultats produits, par exemple dans QGIS.

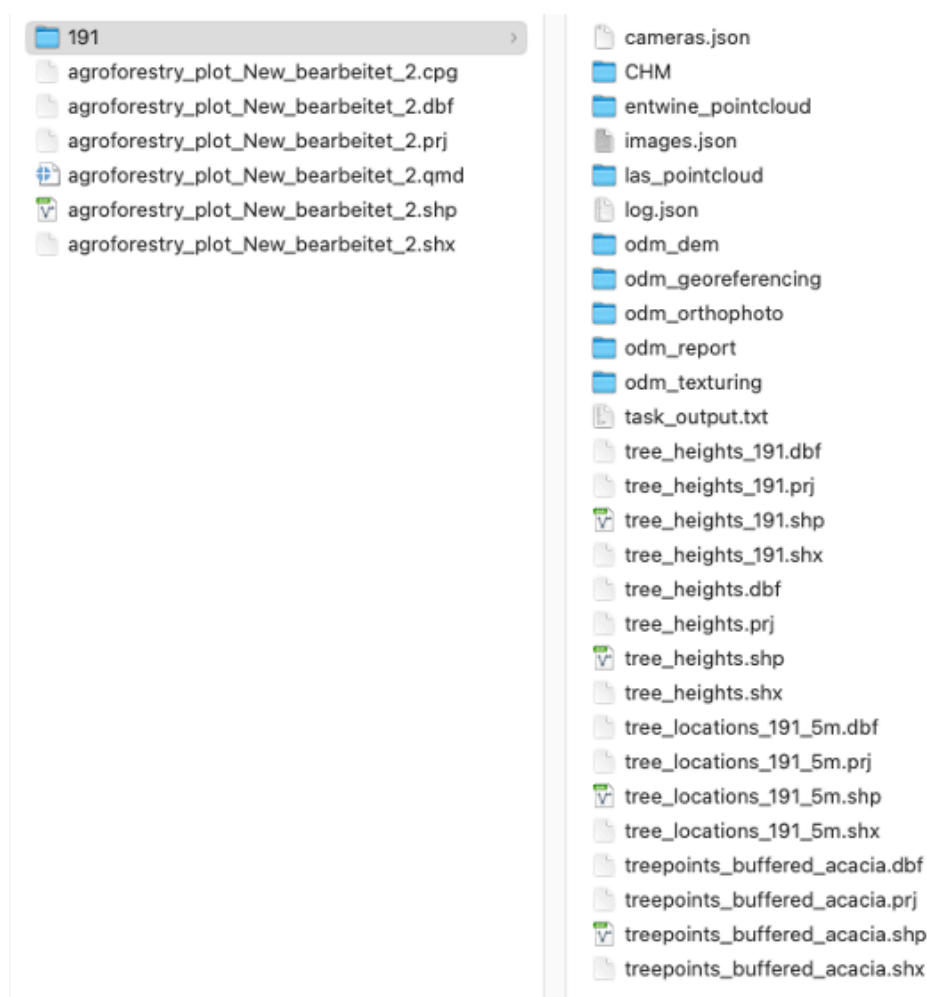


Figure IV - 27 : Contenu du dossier avec les résultats de l'analyse des drones



IV.3 Partie 2: Image satellite stéréo haute résolution

IV.3.1 Introduction

Comme pour les drones, l'utilisation d'images satellite à (très) haute résolution est basée sur la dérivation d'un modèle de hauteur de canopée par analyse photogrammétrique. Pour les images satellite, l'approche est légèrement différente. Alors qu'avec les données des drones, une approche multi-vues appelée « structure à partir du mouvement » est utilisée, dans le traitement des images satellite, des paires d'images stéréo sont évaluées. En utilisant différents angles de vue, la hauteur des objets peut être dérivée de la parallaxe stéréo.

Le processus d'analyse est décrit dans les paragraphes suivants et illustré dans la Figure IV - 30.

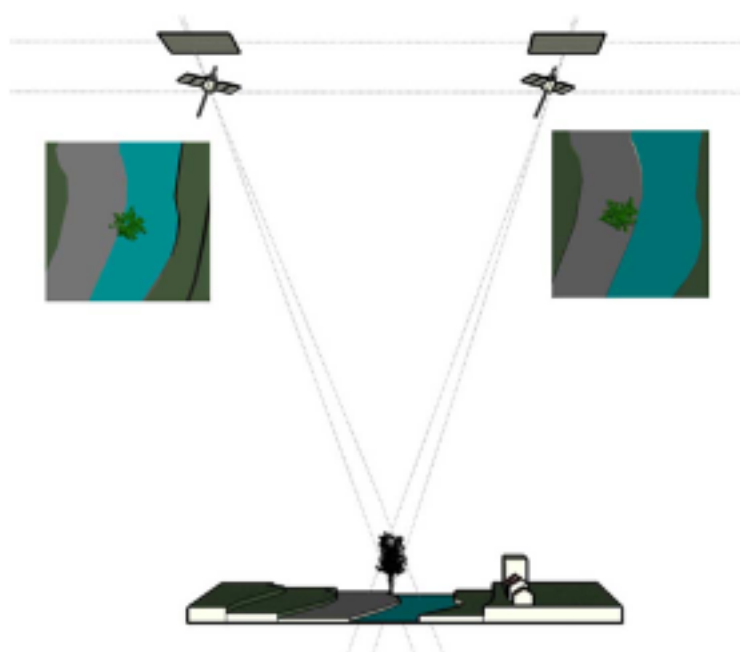


Figure IV - 28 : Illustration du concept de traitement des images stéréoscopiques ¹⁹

¹⁹ Kobayashi, Y., Karady, G.G., Heydt, G.T. and Olsen, R.G., 2009. The utilization of satellite images to identify trees endangering transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3), pp.1703-1709.

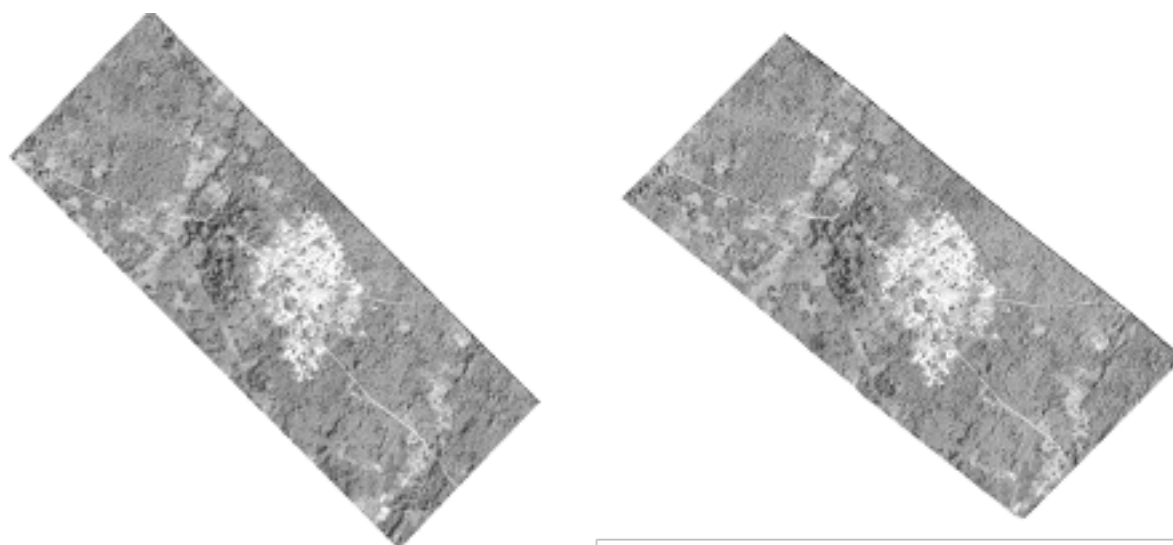


Figure IV - 29 : Deux images (montrant le village de Ségberé) se chevauchant largement et utilisées pour l'analyse stéréoscopique.

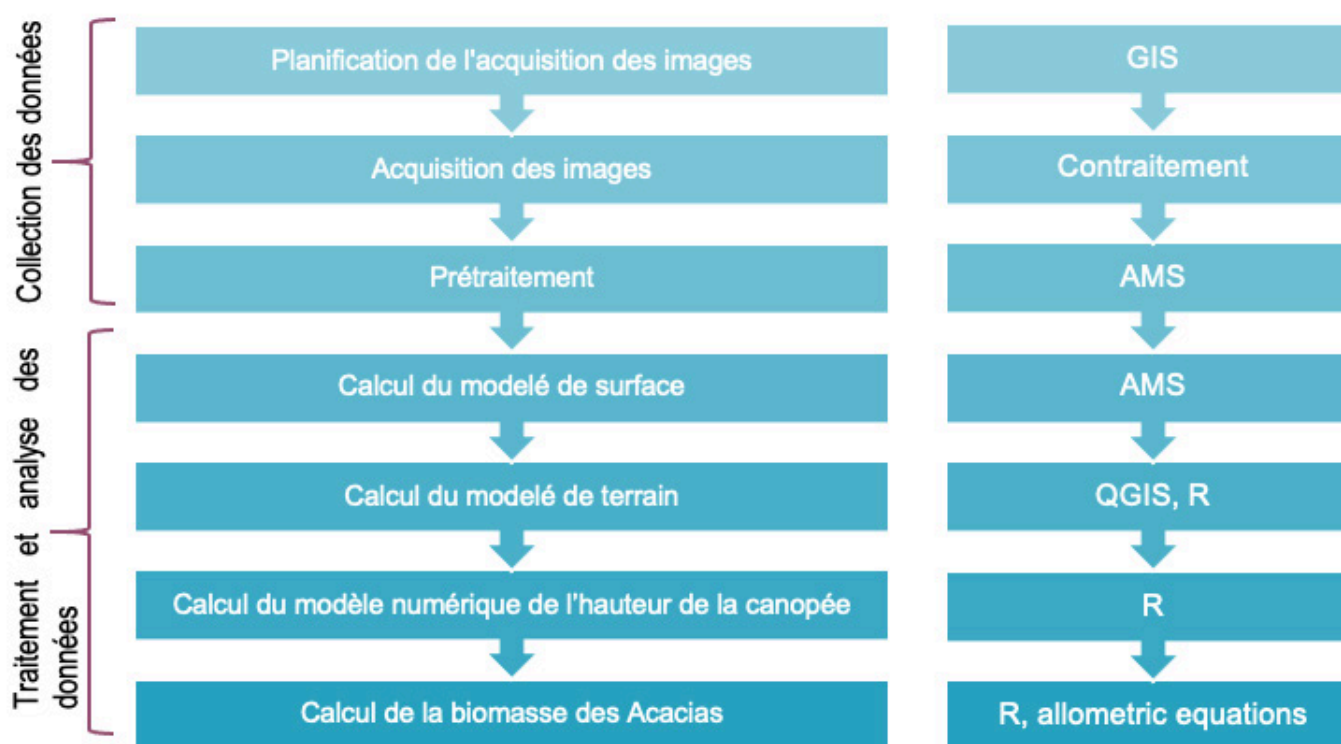


Figure IV - 30 : Flux de travail pour le traitement des images stéréoscopiques.



IV.3.2 L'obtention d'images

Les images stéréo à haute résolution sont fournies par Planet via la constellation Skysat, ou par Airbus via la constellation Pléiades (plus haute résolution disponible, mais des coûts plus élevés).

Les deux ensembles de données peuvent être commandés auprès de revendeurs. Sur Internet, les données peuvent être commandées par l'intermédiaire de Skywatch²⁰.

Les images stéréoscopiques ne sont généralement pas disponibles et le satellite doit être commandé pour acquérir des images. En fonction de la demande sur la plateforme et des conditions météorologiques, la réception des images peut prendre jusqu'à plusieurs mois. Pour le nord de la Côte d'Ivoire, le meilleur moment est pendant la saison sèche en raison de la faible couverture nuageuse (par exemple, de janvier à mars). Pour l'étude MNV, les images ont été disponibles environ deux semaines après la commande.

En raison du prix beaucoup plus abordable, le travail pour cette étude a été effectué en utilisant Skysat (prix de 2*12 €/km² pour une paire stéréo). Le paiement sur EarthCache se fait par carte de crédit. Les images peuvent également être obtenues auprès d'un revendeur local. Une description détaillée du format des données Skysat se trouve dans le manuel d'utilisation de Skysat²¹.

IV.3.3 Prétraitement

Après avoir téléchargé les paquets de données, on trouve la structure de fichier décrite ci-dessous. Cette étude a travaillé avec les fichiers panchromatiques qui se trouvent dans le dossier XX_PAN_skysatscene_basic_l1a_dn.

Chaque acquisition contient plusieurs fichiers, comme dans la figure ci-dessous (à gauche). Chaque sous-dossier contient le fichier image (extension *.tif) et un fichier de coefficients polynomiaux rationnels (extension .RPC) qui renseigne sur la géométrie de visualisation de la caméra. Le contenu d'un RPC est illustré ci-dessous (à droite)

²⁰ <https://skywatch.com>

²¹ https://assets.planet.com/docs/Planet_SkySat_Imagery_Product_Specification_Jan2020.pdf

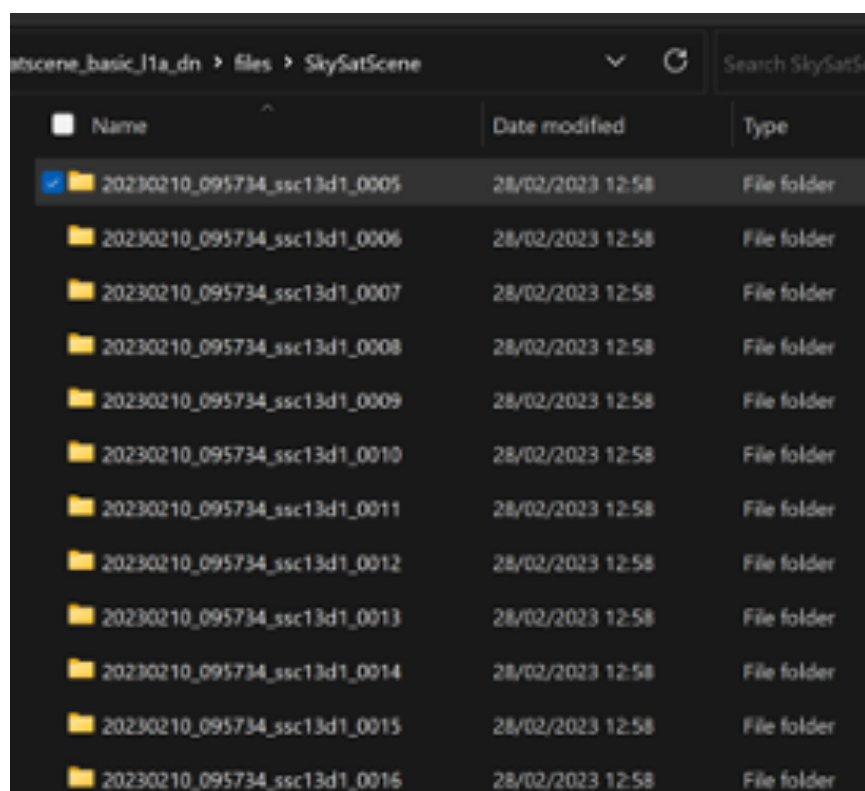


Figure IV - 31 : Structure du Dossier de l'image L1a de Base de Skysat

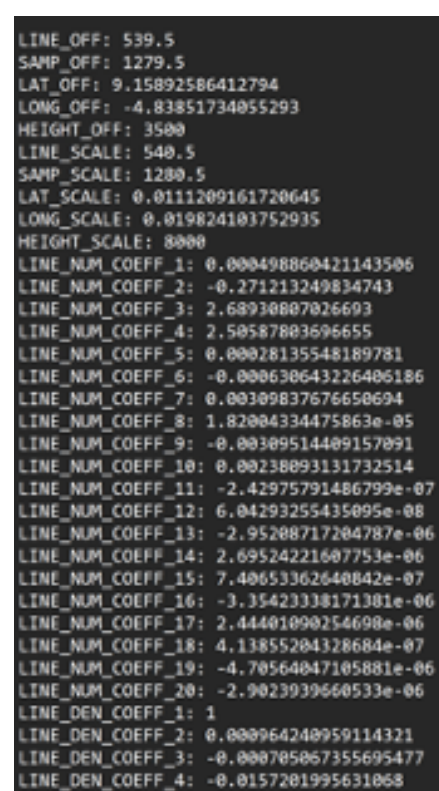


Figure IV - 32 : Exemple de Contenu de Fichier RPC

Ce fichier RPC contient des informations sur l'orientation de l'image et des coefficients de caméra qui sont nécessaires pour les étapes de traitement suivantes. Les détails se trouvent dans le manuel d'utilisation de Planet Skysat²².

Le fichier image contient les données réelles. Il peut être visualisé dans QGIS, il s'agit d'une image en niveaux de gris :

²² https://assets.planet.com/docs/Planet_SkySat_Imagery_Product_Specification_Jan2020.pdf

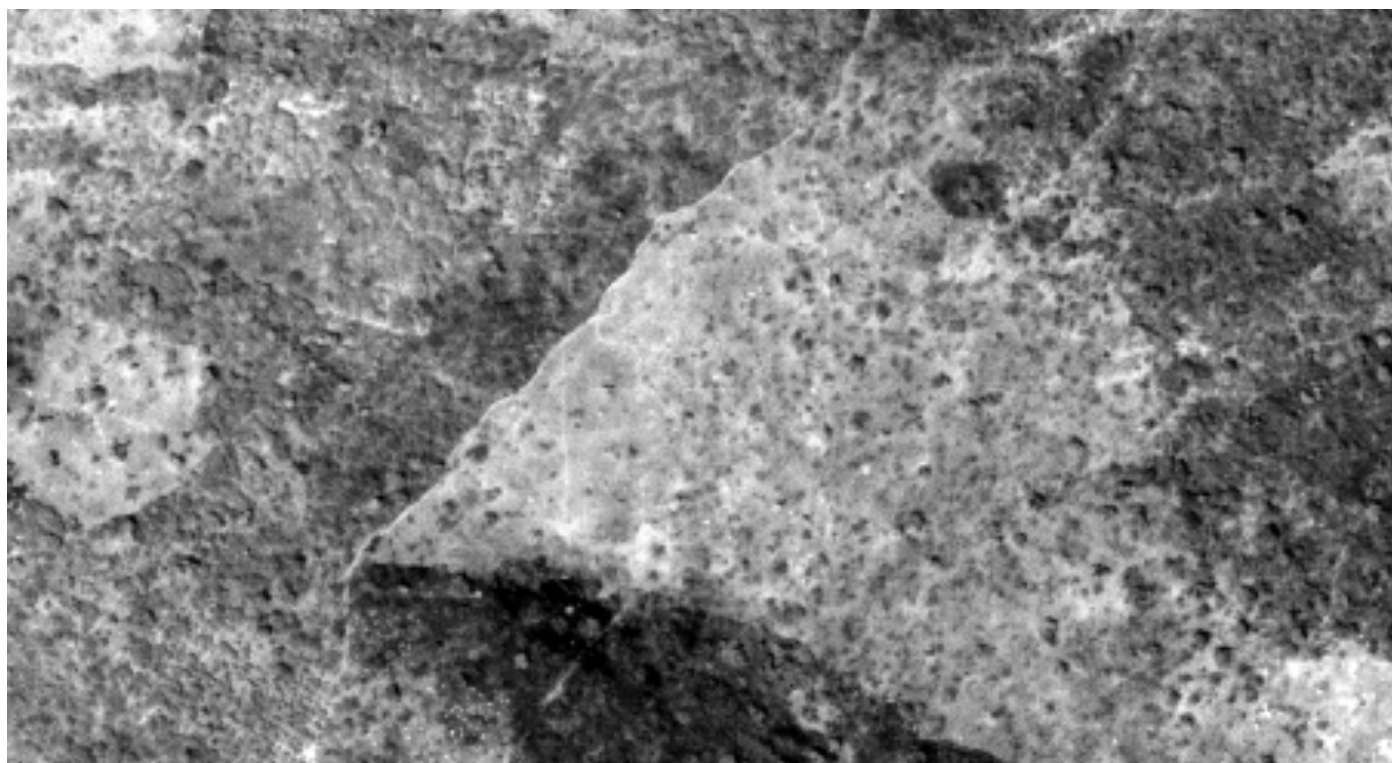


Figure IV - 33 : Image panchromatique utilisée pour l'analyse stéréoscopique montrant un zone agricole et de savane.

Pour effectuer l'analyse des images stéréoscopiques, un modèle de la caméra d'observation est créé. La première version de ce modèle est basée sur les données d'image et le fichier RPC. Ce modèle sera par la suite affiné au cours du flux de travail. Les fichiers de la caméra sont créés dans le Stereo Pipeline (ASP) d'AMES. ASP est un outil en ligne de commande qui ne fonctionne que sous Linux ou sous Windows dans le sous-système Linux (voir les instructions d'installation). Cela signifie que pour pouvoir exécuter ASP, vous devez taper ou copier/coller des commandes dans la ligne de commande Linux et appuyer sur la touche Entrée pour exécuter les commandes.

IV.3.4 Obtention d'un DEM de référence

Pour produire le MNS, un MNS de référence est nécessaire. Un MNS de référence peut être obtenu par exemple auprès d'Open Topography (par exemple le MNS Copernicus 30 m, ou le MNT SRTM). Le SRTM peut également être téléchargé directement à partir de la NASA ou très facilement à partir de cette page web <https://dwtkns.com/srtm30m/>. Le MNT/MNS de référence doit être découpé à la taille de la zone d'étude à l'aide d'outils standard dans QGIS.

IV.3.5 Script pour la génération d'un MNS

Le programme est conçu pour générer des MNS en une seule étape. Pour obtenir une vue d'ensemble des étapes sélectionnées, ouvrez le script 00_asp.sh. Les étapes des différents scripts y sont expliquées plus en détail.

Le programme est conçu pour fonctionner sans modification. Les modifications apportées aux différents scripts peuvent entraîner des erreurs.



IV.3.5.1 Étape 1

Naviguez jusqu'au répertoire dans lequel vous souhaitez exécuter le programme. Tous les fichiers de sortie seront enregistrés dans ce répertoire. Copiez la référence DEM dans votre répertoire de travail, dans un dossier appelé srtm. La structure du dossier doit être la suivante :

```
C:\.
  00_asp.sh
  01_folderstructure.py
  02_preprocessing.sh
  03_mapproject.sh
  04_identify_pairs.py
  05_parallel_stereo.sh
  06_DEM-Folder.py
  07_mosaic.sh
  stereo.default
  SkySatScene
  |   20230211_100700_ssc2d2_0009
  |   |   20230211_100700_ssc2d2_0009_metadata.json
  |   |   |   basic_l1a_dn
  |   |   |   |   20230211_100700_ssc2d2_0009_basic_l1a_panchromatic_dn.tif
  |   |   |   |   20230211_100700_ssc2d2_0009_basic_l1a_panchromatic_dn_RPC.TXT
  |   |   |   |
  |   |   |   20230211_100737_ssc2d2_0008
  |   |   |   |   20230211_100737_ssc2d2_0008_metadata.json
  |   |   |   |   |   basic_l1a_dn
  |   |   |   |   |   |   20230211_100737_ssc2d2_0008_basic_l1a_panchromatic_dn.tif
  |   |   |   |   |   |   20230211_100737_ssc2d2_0008_basic_l1a_panchromatic_dn_RPC.TXT
  |   |   |   |
  |   |   |   srtm
  |   |   |   |   srtm30.tif
```

Figure IV - 34 : Structure des dossiers pour le traitement de Skysat sous Linux

IV.3.5.2 Étape 2

Exécutez le script bash : 00_asp.sh. La syntaxe est la suivante :

```
./00_asp.sh
```

```
./00_asp.sh -f "SkySat-DataFolder"
```

IV.3.5.3 Output et structure des dossiers

Au cours du traitement, divers fichiers et dossiers seront générés. La structure des dossiers après le traitement sera la suivante :

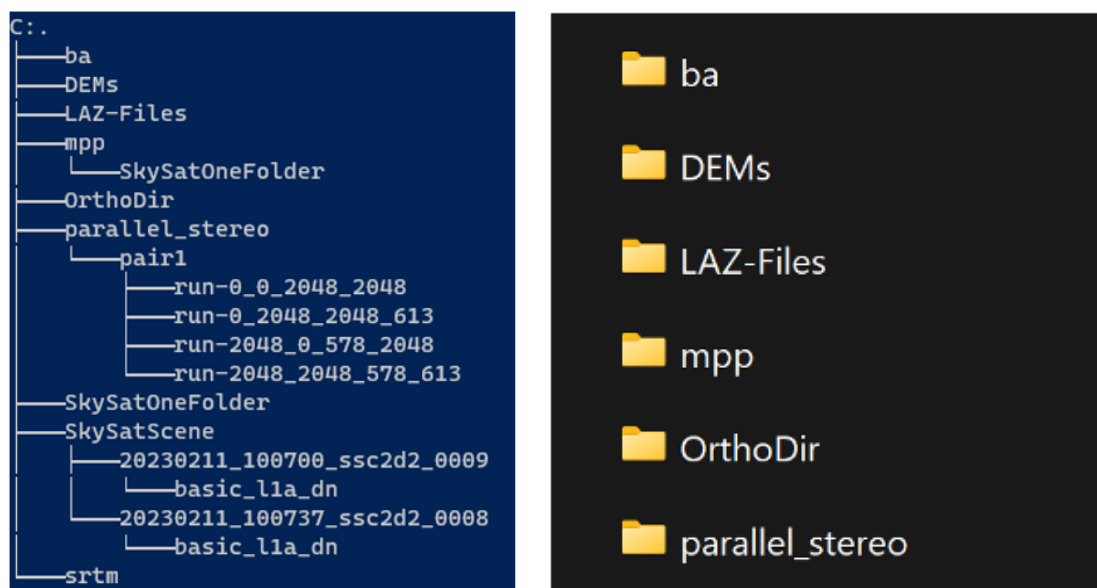


Figure IV - 35 : Output structure du dossier du traitement Skysat sous Linux (à gauche) et Windows (à droite)

Il s'agit simplement de la structure du dossier sans les fichiers. Les dossiers créés sous Linux sont également disponibles sous Windows (Figure IV - 35).

Les fichiers suivants sont produits :

- Cameras.txt : liste des fichiers de caméra pour l'ajustement de la liasse
- Images.txt : liste des fichiers « tif » pour l'ajustement de la liasse
- Dems.txt : liste des paires valides
- Max_overlap_pairs.txt : paires identifiées
- Mosaic.tif : sortie DEM-Mosaic
- Orbit.kml : fichier KML de Google Earth utile pour visualiser les positions des caméras

Les dossiers suivants sont produits :

Ba (Bundle Adjust)

Il s'agit de fichiers de traitement intermédiaires créés par le processus d'ajustement des liasses.

- Fichiers de correspondance (match files)
- Fichiers journaux de l'ajustement des paquets (Bundle Adjust Log Files)
- Nuages de points ajustés en tant que *.csv

DEMs:

- Stéreo DEMs (DSMs) en format *.Tiff.

LAZ-Files:

- Représentation par nuage de points des MNS au format .laz.



Mpp: - Mapprojected files. Il s'agit de fichiers intermédiaires des fichiers d'entrée. Ils sont utilisés pour le processus de stéréoscopie.

OrthoDir: - Stereo Orthofotos: Ce dossier contient les orthophotos qui ont les mêmes propriétés de géolocalisation (étendue, taille des pixels, etc.) que les MNE générés et qui sont utilisées ultérieurement pour la géolocalisation fine manuelle.

Parallel_stereo:

Ceci contient des données d'aide pour le processus stéréo :

- journaux Parallel_stereo (Parallel_stereo logs)
- Résultats intermédiaires
- Les résultats principaux sont copiés dans les dossiers DEMs, LAZ-Files et OrthoDir décrits ci-dessus.

SkySatOneFolder :

- Il s'agit de la structure de dossiers utilisée pour le traitement.
- Il contient également des données de transformation provenant de Point Cloud Align.

Le script principal appelle un certain nombre de scripts de tâches qui exécutent les différentes étapes du traitement :

```
# step wise execution of scripts
# Step 1:
# Python script for organizing the folder structure.
# Creates necessary directories for data processing.
python ./01_folderstructure.py "$src_dir"
# Step 2:
# Generate camera models and perform camera calibration.
# Create lists of image and camera files
# Perform bundle adjustment to optimize camera positions and orientations
# Create a KML file for visualization (Google Earth)
# Perform point cloud alignment
# Visualization (optinal)
./02_preprocessing.sh

# Step 3:
# orthorectify (map-project) a camera image onto a reference DEM
./03_mapproject.sh
```



```
# Step 4:
# Python script for identifying pairs of images.
# creates .json file of raster metadata
# calculates overlapping area (lower left corner, resolution, height/width)
# default threshold: 30%
# can be changed
python ./04_identify_pairs.py

# Step 5:
# parallel stereo processing
# creates an output point cloud image (of pairs) that can be processed into
a visualizable mesh or a DEM
./05_parallel_stereo.sh

# Step 6:
# save results in specific folders
# Folders created: DEMs, LAZ-Files, OrthoDir
python ./06_DEM-Folder.py
# Record the end time and calculate the runtime.
endtime=`date +%s`
runtime=$(( $endtime - $starttime ))
hours=$(( runtime / 3600 ))
minutes=$(( (runtime % 3600) / 60 ))
seconds=$(( (runtime % 3600) % 60 ))
```



Les étapes suivantes sont exécutées par le script :

1. Génération de fichiers de caméra : à l'aide des fichiers RPC, des fichiers de caméra sont créés. Ces caméras permettent de reconstruire la géométrie de capture de l'image.
2. Ajustement des paquets : Des erreurs mineures dans la caméra peuvent entraîner des déplacements importants sur le terrain. Dans ce processus, la géométrie d'acquisition de chaque image d'un paquet d'images traitées ensemble est ajustée de manière à ce que les positions reconstruites de la caméra soient nettement améliorées sur la base de la comparaison des géométries de l'ensemble du paquet d'images voisines.
3. Analyse stéréoscopique : il s'agit du processus d'analyse photogrammétrique proprement dit, qui produit un nuage de points où chaque point se voit attribuer ses trois coordonnées.
4. Exportation vers des fichiers de grille et de nuages de points : cette dernière étape permet de produire le MNE et un fichier de nuages de points.

IV.3.6 Ajustement du géoréférencement des fichiers de sortie

Si la géolocalisation du MNS Skysat et de l'orthophoto n'est pas encore assez précise, une simple transformation linéaire est nécessaire pour atteindre la précision requise. Cette opération peut être réalisée dans QGIS à l'aide de l'utilitaire « géoréférence ».

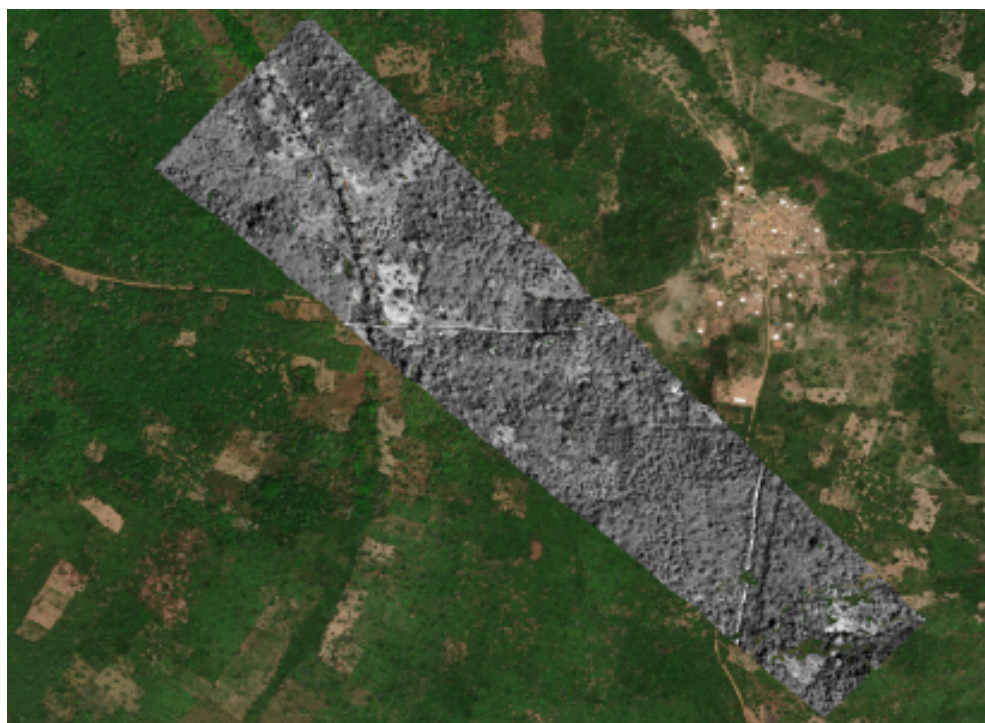


Figure IV - 36 : L'orthophoto traitée superposée sur une image satellite de Bing maps²³ .
L'examen des routes sur les deux images montre que l'orthophoto n'est pas encore géoréférencée avec précision.

²³Vous pouvez charger Bing Maps (le service de cartographie fourni par Microsoft) dans QGIS en utilisant ce lien : <http://ecn.t3.tiles.virtualearth.net/tiles/a{q}.jpeg?g=1> (en utilisant la connexion XYZ dans QGIS).



Le géoréférencement des données multispectrales Skysat acquises simultanément est cependant bien meilleur. Il est donc conseillé d'utiliser les données multispectrales comme référence. En utilisant l'outil de géoréférencement de QGIS, vous pouvez sélectionner trois points de rattachement à la fois dans l'image panchromatique et dans l'image multispectrale, puis exécuter la rectification.

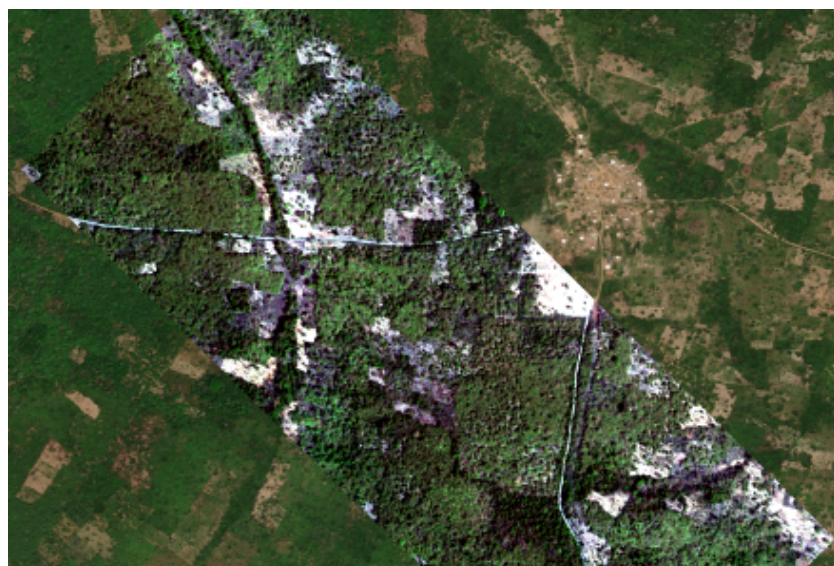


Figure IV - 37 : Image multispectrale Skysat sur des cartes Bing visualisées dans QGIS.

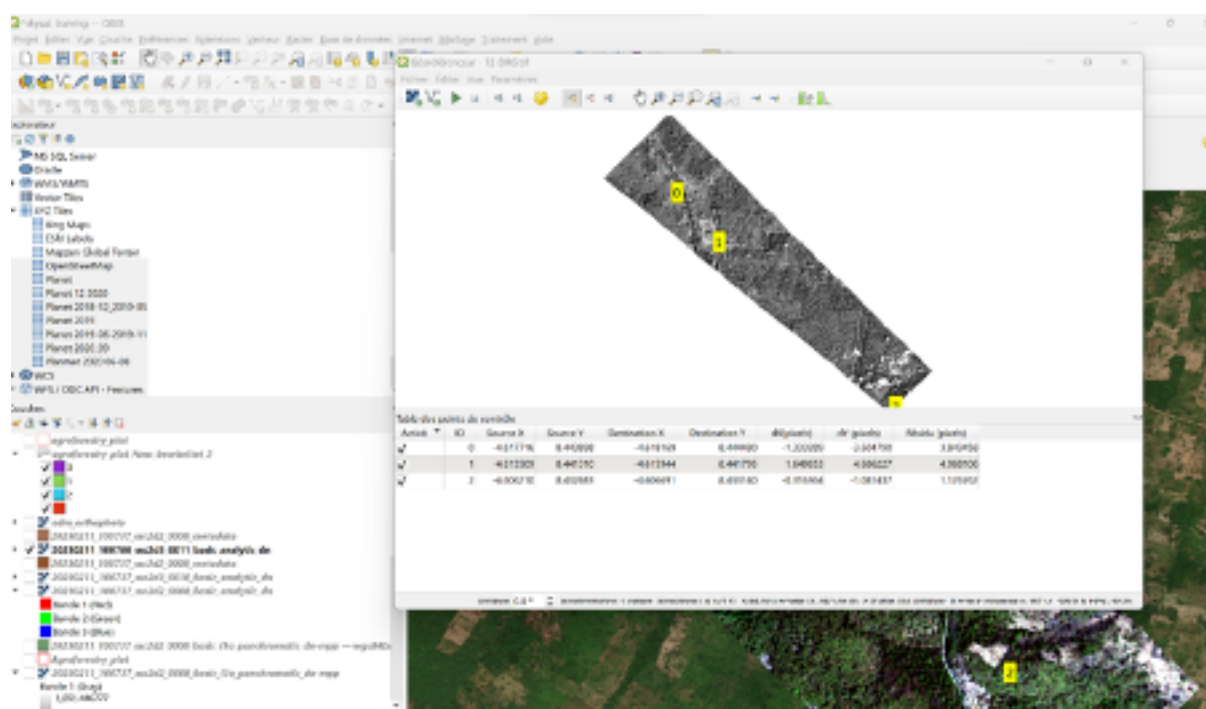


Figure IV - 38 : Utilitaire de géoréférencement avec points de rattachement pour une simple transformation linéaire.

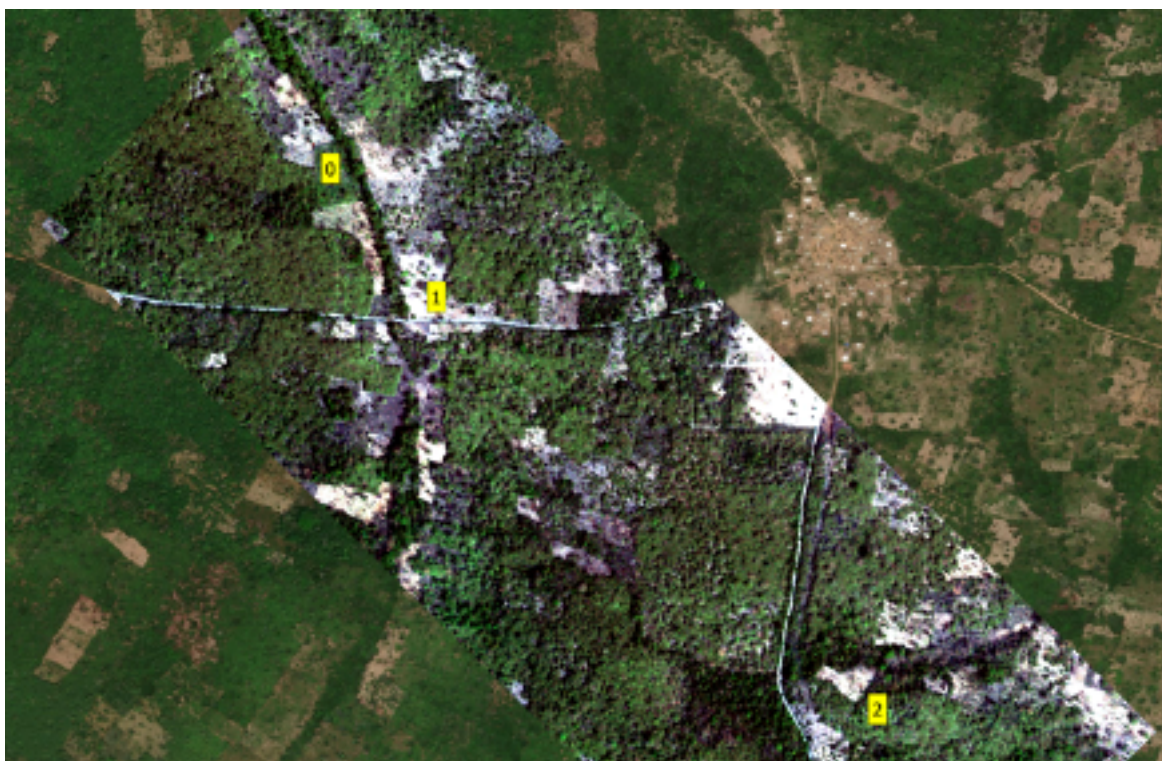


Figure IV - 39 : Les points de rattachement de la Figure IV 38 sur l'image multispectrale de référence Skysat

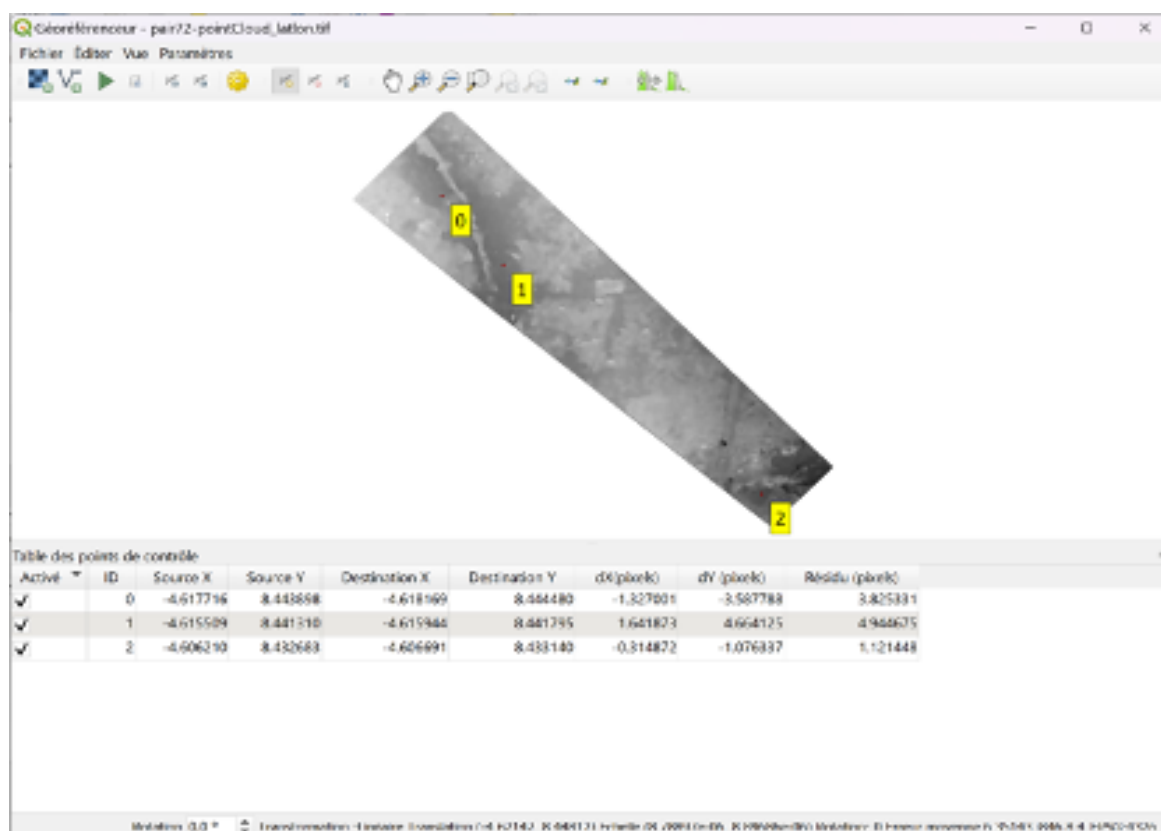


Figure IV - 40 : Fenêtre de géoréférencement utilisant les points de rattachement de la Figure IV - 38 pour corriger le géoréférencement du MNS

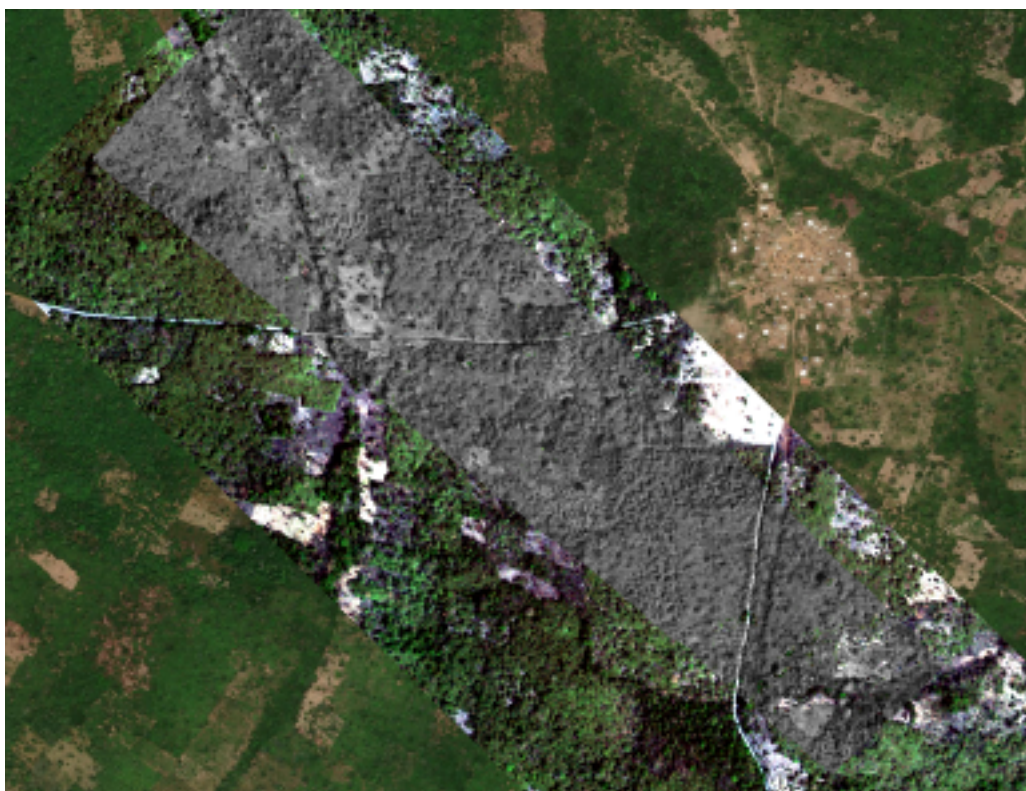


Figure IV - 41 : Orthophoto corrigée sur l'image multispectrale Skysat et l'image Bing maps en arrière-plan

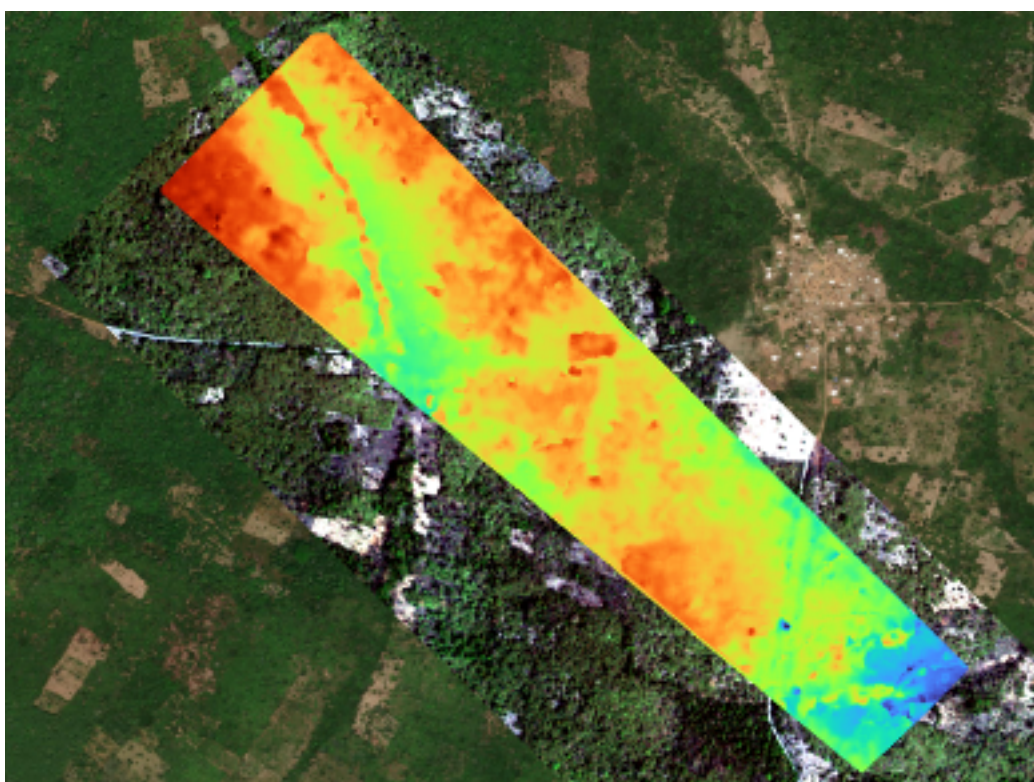


Figure IV - 42 : MNS corrigé sur l'image multispectrale Skysat et cartes Bing en arrière-plan (hauteur en m au-dessus du niveau de la mer)

Une instruction détaillée sur l'outil de géoréférencement de QGIS est donnée ici
: https://docs.qgis.org/3.28/fr/docs/user_manual/working_with_raster/georeferencer.html



IV.3.7 Interpolation de MNT

Les étapes suivantes jusqu'à l'estimation de la biomasse et de la teneur en carbone des acacias sont mises en œuvre dans un script R qui est disponible (avec tous les autres scripts) dans l'annexe de ce document.

Pour la création du modèle de hauteur de la canopée, un MNT doit être généré à partir du MNS. Pour cela, il faut interpoler la zone au sol qui n'est pas visible en raison du couvert végétal. Dans un paysage densément boisé et dans un paysage au relief accidenté, cela n'est pas possible. En raison du terrain relativement lisse dans les zones étudiées et de l'emplacement dans un paysage généralement agricole où une grande partie du sol est visible pendant la saison sèche, une reconstruction du MNT est possible dans la plupart des cas.

Pour ce faire, un processus en plusieurs étapes est suivi (et mis en œuvre de manière automatisée dans un script R, qui couvre toutes les étapes jusqu'au calcul de la biomasse d'acacia).

Tout d'abord, la parcelle ou le groupe de parcelles à analyser est sélectionné manuellement dans QGIS et exporté vers un fichier shapefile. La zone où se trouvent les acacias est également cartographiée visuellement à l'intérieur de la parcelle de manière à éviter que d'autres arbres n'entrent dans l'échantillon (comme dans le cas de l'exercice avec le drone). Ensuite, le MNS et l'image multispectrale sont recadrés à l'étendue (tamponnée) des plantations. Les zones végétalisées sont masquées en calculant la différence normalisée de l'indice de végétation en utilisant les bandes rouges et proche infrarouge des données multispectrales Skysat. On suppose que la zone restante est constituée de points au sol.

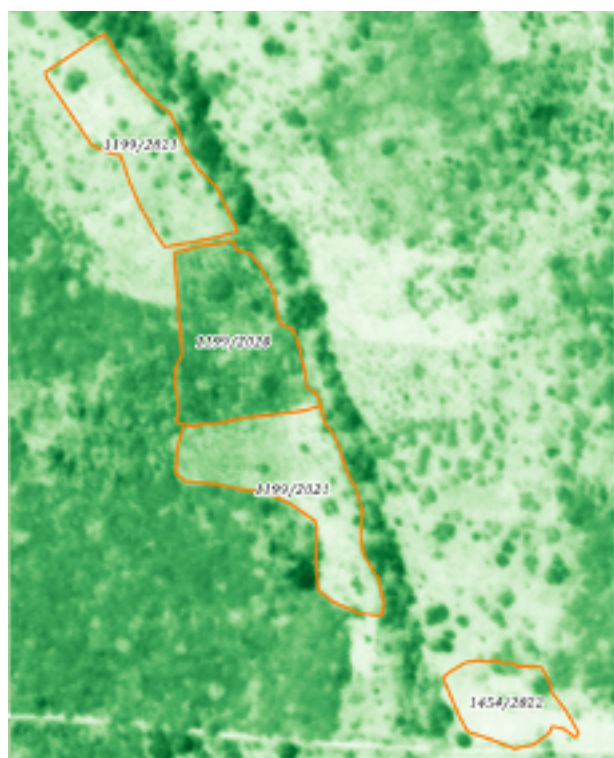
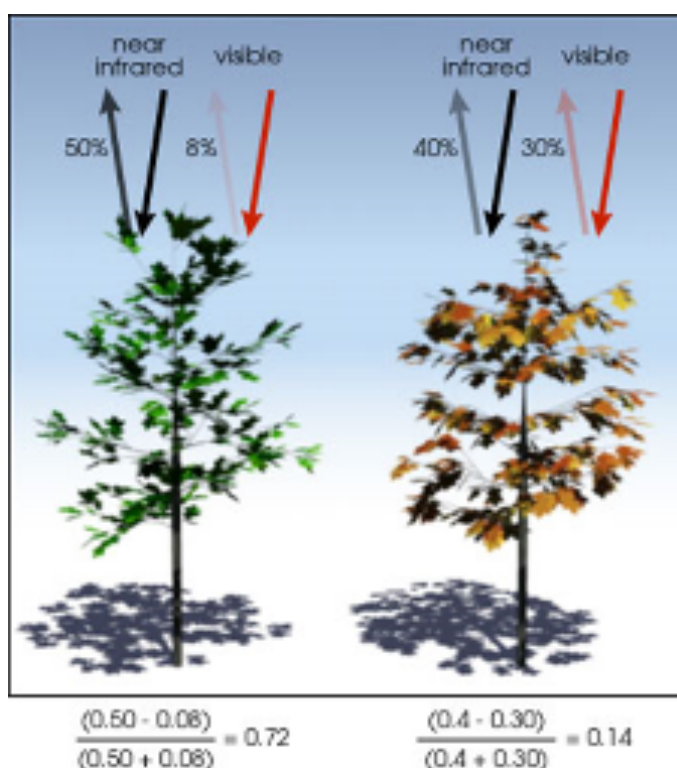


Figure IV - 43 : A gauche : Image NDVI illustrant l'état de la végétation utilisée pour masquer les points hors sol. Les zones en vert foncé ont une couverture végétale vigoureuse (NDVI élevé), les zones en vert clair ont une faible couverture végétale verte (NDVI faible).



A droite : illustration conceptuelle du NDVI (source : <https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/multispectral-remote-sensing-data/vegetation-indices-NDVI-in-R/>)



Un modèle de spline à plaque fine est utilisé pour interpoler entre les points au sol afin de créer un MNT. Ce modèle est utilisé pour interpoler la zone entre les points de surface connus (ceux qui n'ont pas de couverture végétale) et compléter les lacunes des points de surface inconnus (ceux qui ont une couverture végétale). Le modèle simule l'effet du passage forcé d'une fine plaque flexible (par exemple une feuille de papier ou une très fine plaque de métal) à travers les points de surface connus. Il est illustré dans la Figure IV - 44. Le MNT résultant et le MNS original sont illustrés dans la Figure IV - 45.

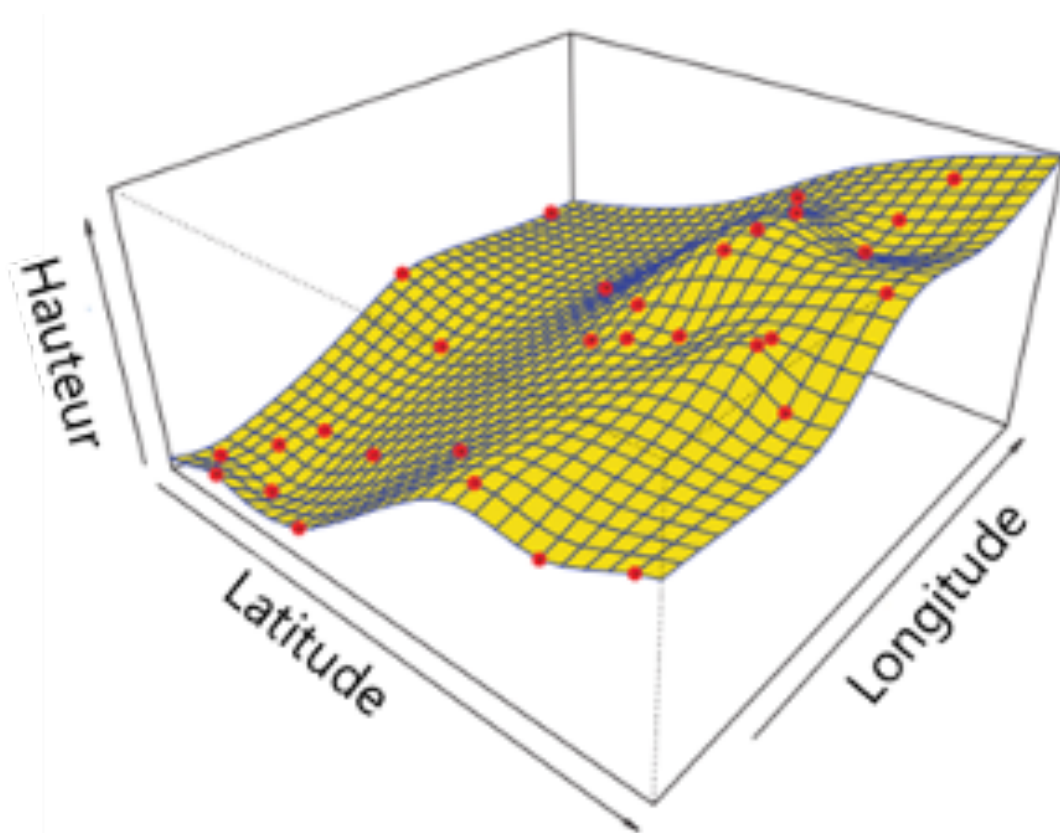


Figure IV - 44 : Illustration de l'interpolation par spline de plaque fine : les points rouges sont les points de hauteur du sol connus. La surface est la surface du sol interpolée²⁴.

²⁴Adapté de : James, G., Witten, D., Hastie, T. and Tibshirani, R., 2013. An introduction to statistical learning. New York: Springer.

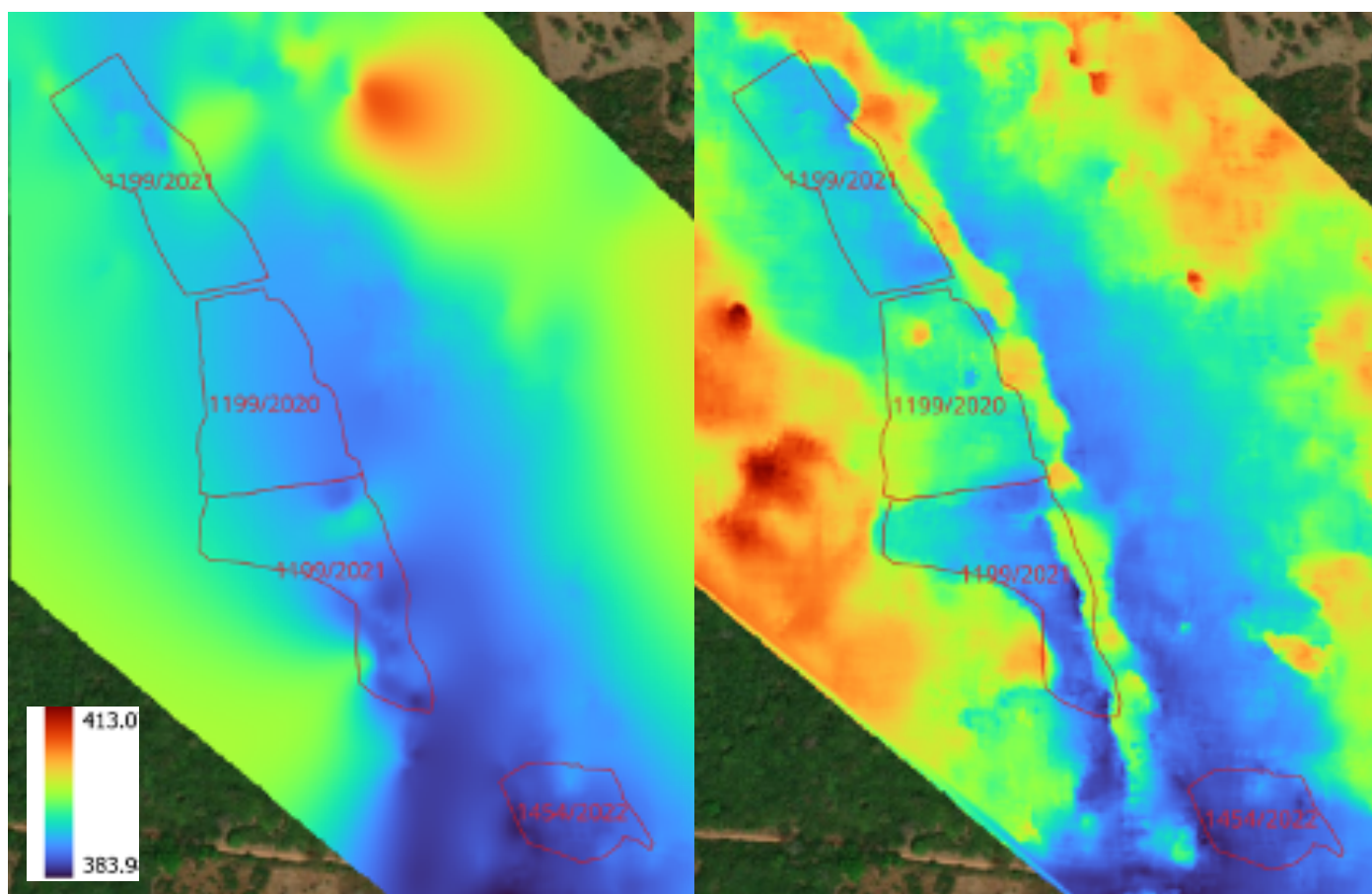


Figure IV - 45 : MNT interpolé (à gauche) et MNS (à droite). Hauteur en mètre au-dessus du niveau de la mer

IV.3.8 Création du Modèle Numérique de hauteur de Canopée (MNC)

Le modèle numérique de hauteur de canopée (MNC) est ensuite créé (comme dans le cas des drones) en soustrayant le MNT du MNS. En raison d'artefacts d'interpolation, des valeurs négatives peuvent apparaître. Celles-ci sont mises à zéro et ne sont pas évaluées.

IV.3.9 Estimation de la biomasse d'acacia

Pour estimer la biomasse d'acacias, la zone plantée d'acacias peut être cartographiée par interprétation visuelle à partir des données multispectrales (Figure IV - 47).

Pour calculer la biomasse d'acacia, la hauteur de la canopée est extraite du modèle de hauteur de la canopée pour la zone plantée d'acacia. Les statistiques de la hauteur de la canopée sont calculées et la hauteur du 95e centile est considérée comme la hauteur représentative des acacias. Cette valeur est celle qui représente le mieux la hauteur moyenne des acacias. L'approche est différente de celle des drones, car les cimes des arbres ne sont généralement pas faciles à identifier dans les données satellitaires à résolution plus grossière. Néanmoins, même une bonne partie des acacias âgés de deux ans ont pu être identifiés.

Ces valeurs représentatives sont ensuite utilisées pour estimer la biomasse moyenne des acacias et la densité de la biomasse sur la parcelle en la multipliant par la densité de plantation.

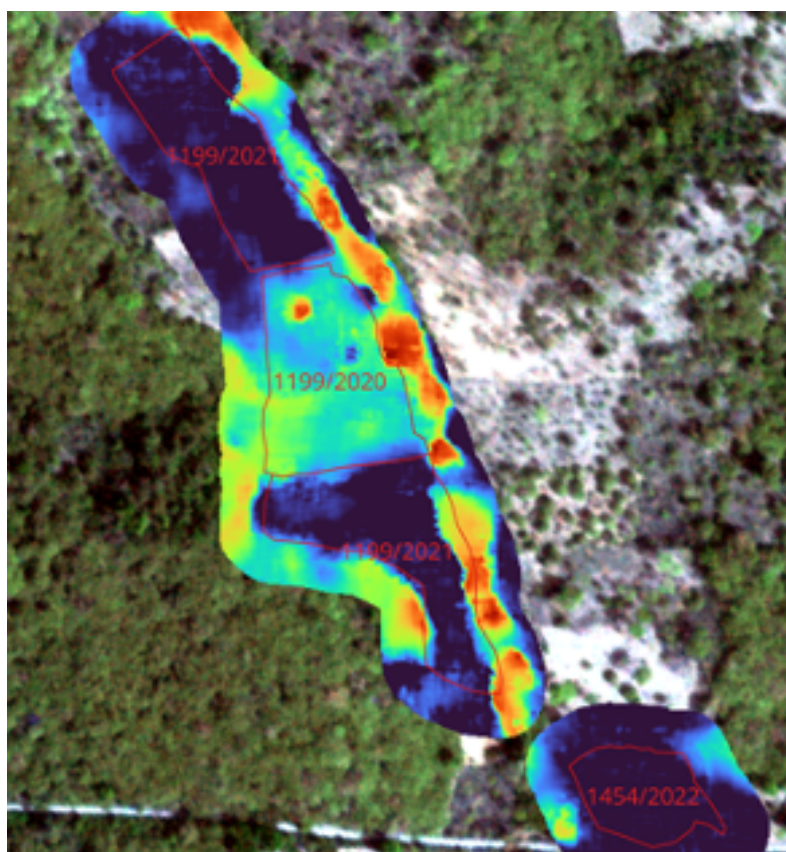


Figure IV - 46 : CHM pour les parcelles des plantations d'acacias

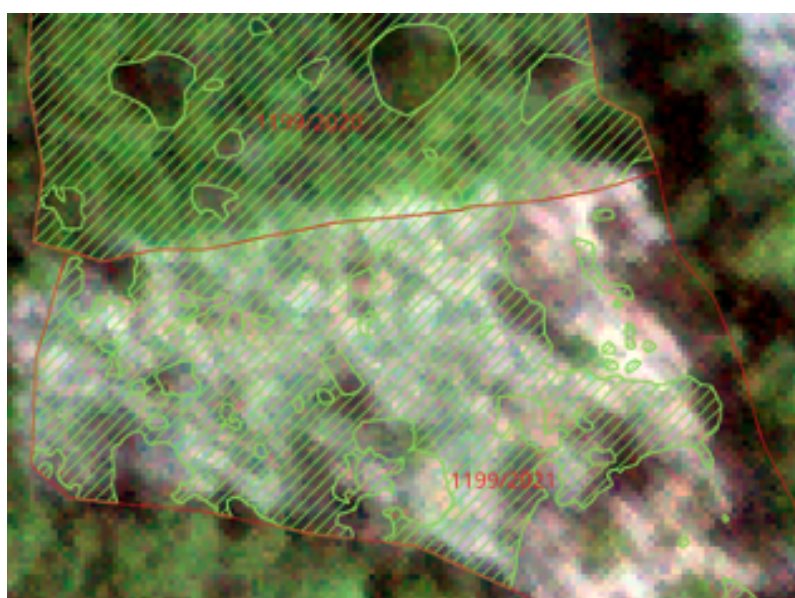


Figure IV - 47 : Gros plan sur les zones où poussent des acacias vivants.

Le résultat de l'analyse (sortie R-script) est un petit tableau qui caractérise les quantiles de hauteur de canopée estimés, la biomasse d'acacia totale estimée sur la parcelle (t), et la densité de biomasse estimée (t/ha) pour chaque parcelle analysée :

ID_Exploit	Année_pla	Zone	sum_area	q25	q50	q75	q95	q99	biomass	biomass_density
<dbl>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
1199	2020	Centre	2784.	6.32	8.38	9.42	11.2	12.1	25.3	26.1
1199	2021	Centre	4710.	0.396	0.737	1.55	6.29	12.5	2.30	1.14



IV.4 Conclusions et prochaines étapes recommandées

Ce manuel présente des méthodes de mesure de la biomasse des arbres des plantations d'acacia dans les parcelles des petits exploitants du centre et du nord de la Côte d'Ivoire. Les méthodes décrites ici ont été développées et testées dans le cadre d'études sur le terrain, et les résultats de ces études serviront de base à l'élaboration du MNV agroforestier pour les régions de Dabakala et Kong, conformément à la conception de l'MNV agroforestier local présentée. En outre, les méthodes peuvent être portées à d'autres régions et appliquées à différents systèmes agroforestiers qui partagent des caractéristiques similaires.

Dans ce qui suit, certaines contraintes et opportunités de développement sont énumérées :

- Le développement de la méthode se concentre autour de la mesure de la hauteur des Acacias qui sont densément plantés. A partir de la hauteur dérivée, de la surface cartographiée d'Acacias plantés et d'une densité de plantation par défaut, la densité de la biomasse aérienne et le carbone sont calculés à l'aide d'équations allométriques spécifiques.
- Les arbres autres que les acacias ne sont pas pris en compte dans ce manuel, mais en utilisant des drones, la hauteur de ces arbres peut également être mesurée si les équations allométriques correspondantes sont disponibles. La capacité des satellites à très haute résolution à mesurer la hauteur des arbres individuels est plus limitée en raison de la résolution plus grossière. Cette méthode est donc applicable si les arbres sont regroupés en petits peuplements. Pour les arbres plus grands ou les groupes d'arbres, le diamètre de la couronne peut être dérivé, et des équations allométriques existent pour utiliser le diamètre de la couronne afin d'estimer la biomasse de l'arbre.
- Pour d'autres espèces de plantation, des équations allométriques similaires peuvent être dérivées et les méthodes peuvent être appliquées.

L'extrapolation des méthodes développées pour le MNV agroforestier local d'acacia à différents cas d'utilisation de l'agroforesterie est examinée en détail dans les autres volumes du ce document.

Développer des méthodes et des manuels de formation est une chose, mettre en pratique les méthodes développées à l'échelle est un défi différent. Pour mettre en œuvre avec succès les mesures décrites dans ce manuel, plusieurs conditions préalables doivent être remplies :

- Clarification des responsabilités institutionnelles : la structure institutionnelle pour la mise en œuvre du MNV agroforestier local a été clarifiée au cours d'une série de réunions et d'un atelier avec les parties prenantes en octobre 2023. Les résultats de l'atelier sont documentés dans la version finale des dispositions institutionnelles, dans la documentation du projet. Pour mettre les dispositions en pratique, des accords entre les institutions doivent être conclus et mis en œuvre.
- Lignes budgétaires : un MNV opérationnel doit disposer du budget correspondant. Le budget nécessaire a été esquissé dans le rapport sur les outils numériques et l'analyse des besoins dans la documentation du projet.
- Externalisation : les dispositions institutionnelles prévoient que le travail d'analyse des images de télédétection doit être externalisé auprès d'entreprises publiques ou privées spécialisées. Pour cette externalisation, des termes de référence sont requis. Des projets de termes de référence sont disponibles pour les services d'un pilote de drone et pour l'acquisition d'images satellites stéréo à très haute résolution.
- Renforcement des capacités : même si la mise en œuvre de la méthode décrite dans le présent manuel doit être confiée à des prestataires spécialisés, un renforcement régulier des capacités est nécessaire dans le cadre de sessions de formation spécialisées et de formations sur le terrain.



Un certain nombre de scripts de traitement ont été développés pour mettre en œuvre les méthodes de mesure décrites dans ce manuel. Une version commentée des scripts est annexée à ce manuel. Les scripts seront également mis à disposition dans des dépôts de code publics.

IV.5 Liste des annexes pour le Volume 3

Les annexes suivantes sont téléchargeables sous

<https://changementsclimatiques.gouv.ci/index.php/initiatives/documents-strategiques> :

IV.5.1 Instructions d'installation des logiciels de traitement

Les instructions d'installation sont disponibles dans ce document : Annex_1_MRV-AgFor_Manuel-Vol3-Drones_SOFTWARE_FRA_v2.docx

IV.5.2 Script pour le traitement des données des drones

Les instructions d'installation sont disponibles dans ce dossier : Annex_2_DroneTreeCalc

IV.5.3 Script pour le traitement des données des satellites

Les instructions d'installation sont disponibles dans ce dossier : Annex_3_SatelliteAnalysis

IV.5.4 Exemple de termes de référence

Les exemples des termes de référence sont disponibles dans ce dossier : Annex_4_5_SampleToR



BIBLIOGRAPHIE

- Aabeyir, R.; Stephen Adu-Bredu, S.; Agyei Agyare, W.; Weir, M.J.C. 2020. Allometric models for estimating aboveground biomass in the tropical woodlands of Ghana, West Africa. *Forest Ecosystems* (2020) 7:4, 23 pp. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00250-3>
- Avery, T. E. and H. E. Burkhardt (2015). *Forest measurements*, Waveland Press.
- Bhushan, S., D. Shean, O. Alexandrov and S. Henderson (2021). «Automated digital elevation model (DEM) generation from very-high-resolution Planet SkySat triplet stereo and video imagery.» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 173: 151-165.
- Bonnet, S., 2009. Un Modèle Numérique de Canopée pour l'estimation de la hauteur dominante des peuplements résineux en Région wallonne. *Forêt Wallonne*, 98, pp.53-59.
- Bouvet, A., S. Mermoz, T. Le Toan, L. Villard, R. Mathieu, L. Naidoo and G. P. Asner (2018). «An above-ground biomass map of African savannahs and woodlands at 25 m resolution derived from ALOS PALSAR.» *Remote sensing of environment* 206: 156-173.
- Chave, J.; Réjou-Méchain, M.; Búrquez, A.; Chidumayo, E.; Colgan, M.S.; Delitti, W.B.C.; Duque, A.; Eid, T.; Fearnside, P.M.; Goodman, R.C.; Henry, M.; Martínez-Yrizar, A.; Mugasha, W.A; Muller-Landau, H.C.; Mencuccini, M.; Nelson, B.W.; Ngomanda, A.; Nogueira, E.M.; Ortiz-Malavassi, E.; Pélissier, R.; Ploton, P.; Ryan, C.M.; Saldarriaga, J.G.; Vieilledent, G. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biol.*, 20: 3177-3190
- Duncanson, L., M. Disney, J. Armston, J. Nickeson, D. Minor and F. Camacho Olmedo (2021). *Aboveground Woody Biomass Product Validation Good Practices Protocol. Version 1.0 – 2021*. C. o. E. O. S.-W. G. o. C. a. V. L. P. V. Subgroup.
- FAO, SEP-REDD+ 2017. Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire. Inventaire de la biomasse forestière pour l'estimation des facteurs d'émission. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et le Secrétariat Exécutif Permanent de la Commission Nationale REDD+ (SEP-REDD+), Abidjan, 62 pp
- Feldpausch, T.R., Lloyd, J., Lewis, S.L., Brien, R.J., Gloor, M., Monteagudo Mendoza, A., Lopez-Gonzalez, G., Banin, L., Abu Salim, K., Affum-Baffoe, K. and Alexiades, M., 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, 9(8), pp.3381-3403.
- Hewson, J., Steininger, M.K.; Pesmajoglou, S. eds. 2014. *Manuel de mesure, notification et vérification (MNV) de la REDD+, Version 2.0*. Programme carbone, marchés et communautés, avec le soutien de l'USAID. 248 pp
- IPCC 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IGES, Japan
- IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 4: Agriculture, forestry and other land use, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan



IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 4: Agriculture, forestry and other land use, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

James, G., Witten, D., Hastie, T. and Tibshirani, R., 2013. An introduction to statistical learning. New York: Springer.

Joshi, N., E. T. A. Mitchard, N. Woo, J. Torres, J. Moll-Rocek, A. Ehammer, M. Collins, M. R. Jepsen and R. Fensholt (2015). «Mapping dynamics of deforestation and forest degradation in tropical forests using radar satellite data.» Environmental Research Letters 10(3): 034014.

Kobayashi, Y., Karady, G.G., Heydt, G.T. and Olsen, R.G., 2009. The utilization of satellite images to identify trees endangering transmission lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 24(3), pp.1703-1709.

Koutika, L.-S. and D. M. Richardson (2019). «Acacia mangium Willd: benefits and threats associated with its increasing use around the world.» Forest Ecosystems 6(1): 1-13.

McNicol, I. M., C. M. Ryan and E. T. A. Mitchard (2018). «Carbon losses from deforestation and widespread degradation offset by extensive growth in African woodlands.» Nature communications 9(1): 3045.

Mermoz, S., Le Toan, T., Villard, L., Réjou-Méchain, M. and Seifert-Granzin, J., 2014. Biomass assessment in the Cameroon savanna using ALOS PALSAR data. Remote sensing of environment, 155, pp.109-119.

MINEDD–DLCC. 2022. Contributions Déterminées au niveau National de la Côte d'Ivoire. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/CDN_CIV_2022.pdf Abidjan, 39 pp.

MINEF. 2019. Stratégie Nationale de préservation, de réhabilitation et d'extension des forêts. Abidjan.

Pearson, T., S. Walker and S. Brown (2013). «Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects.»

Pearson, T.; Walker, S.; Brown, S. 2005. Sourcebook for Land use, Land-use change and forestry projects. World Bank's BioCarbon Fund and Winrock International. 57 pp . <https://www.cbd.int/doc/pa/tools/Sourcebook%20for%20Land%20Use,%20Land-Use%20Change%20and%20Forestry%20Projects.pdf>

Planet (2020). Skysat Imagery Product Specification. Cape Town, South Africa. 20 pp. Available at:https://assets.planet.com/docs/Planet_SkySat_Imagery_Product_Specification_Jan2020.pdf

PNIA. 2018. Programme National d'Investissement Agricole de deuxième génération (PNIA II) (2017 – 2025), Abidjan.

Reyes, G.; Brown, S.; Chapman, J.; Lugo, A.E. 1992. Wood densities of tropical tree species. New Orleans, LA.: U.S.Department of Agriculture, Forest Service

Roussel, J.R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Sánchez Meador, A., Bourdon, J.F., De Boissieu, F., Achim, A. (2020). lidR : An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. Remote Sensing of Environment, 251 (August)



SEP-REDD+. (2017). Niveau de référence pour les forêts de la Côte d'Ivoire. Présentation à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Abidjan
SEP-REDD+. 2017.Strategie national REDD+ de la Côte d'Ivoire. Abidjan

Tadiello, T.; Perego, A.; Valkama, E.; Schillaci, C.; Acutis, M. (2022). Computation of total soil organic carbon stock and its standard deviation from layered soils. Methods X, vol.9, p.102662, 2022

Toffanin, P. (2019). OpenDroneMap: The Missing Guide. A Practical Guide To Drone Mapping Using Free and Open Source Software, MasseranoLabs LLC.

UNFCCC (2016). The Paris Agreement, available at: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf

Van Wagner, C. E. (1968). «The line intersect method in forest fuel sampling.» Forest science 14(1): 20-26.

Verra (2023). VM0047: VCS Methodology for Afforestation, Reforestation and Revegetation Projects, Version 1.0 Verra.

Walker, S.M.; Pearson, T.R.H.; Casarim, F.M.; Harris, N.; Petrova, S.; Grais, A.; Swails, E.; Netzer, M.; Goslee, K.M.; Brown, S. 2012. Standard Operating Procedures for Terrestrial Carbon Measurement: Version 2012. Winrock International, USA

Warren, W. G. and P. F. Olsen (1964). «A line intersect technique for assessing logging waste.» Forest science 10(3): 267-276.



