



Suivi des plantations d'acacias et de leur taux de renouvellement dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa

Kossi Jacob Koffi

► To cite this version:

Kossi Jacob Koffi. Suivi des plantations d'acacias et de leur taux de renouvellement dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa. Sciences de l'environnement. 2023. dumas-04510900

HAL Id: dumas-04510900

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04510900>

Submitted on 19 Mar 2024

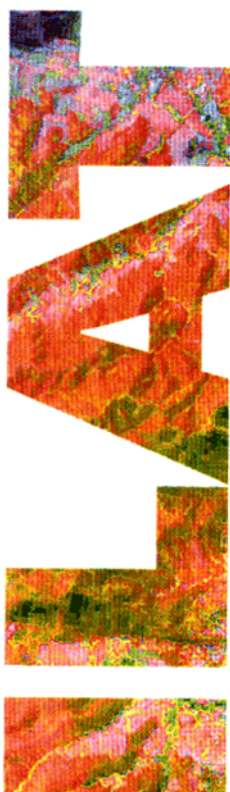
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

SYSTEMES D'INFORMATIONS LOCALISÉES POUR L'AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES



SYSTEMES
D'INFORMATIONS
LOCALISÉES POUR
L'AMÉNAGEMENT
DES TERRITOIRES

Suivi des plantations d'acacias et de leur taux de renouvellement dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa.



Kossi Jacob KOFFI

Directeur du projet : Emilien DUBIEZ, CIRAD – Unité Forêt et société
Tuteur SILAT : Kenji OSE, AgroParisTech
Encadrant : Simon MADEC, CIRAD – UMR TETIS
Rapporteur : Pierre COUTERON, UMR AMAP

Septembre 2023



Unité de recherche
**Forêts et
Sociétés**



Mastère Spécialisé de la Conférence des Grandes écoles



L'établissement AgroParisTech diffuse ce mémoire et se dégage de toute responsabilité sur le contenu proposé.

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition.

L'obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document doit être respectée selon la licence Creative Commons apposée

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation "Paternité – Pas d'utilisation commerciale – Pas de modification 4.0 France disponible en ligne : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Remerciements

Je souhaite exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de mon stage. Mes sincères remerciements vont à :

Monsieur Laurent GAZULL, qui a joué un rôle essentiel dans la mise en place du projet de stage et m'a prodigué de précieux conseils.

Monsieur Emilien DUBIEZ, pour sa confiance en moi et son suivi constant de mon travail.

Monsieur Simon MADEC, pour sa disponibilité, sa générosité à partager ses connaissances et compétences et son suivi constant du travail.

Messieurs Kenji OSE, Eric MARCON, dont l'expertise a été d'une grande importance dans l'approche scientifique et méthodologique de mon stage.

Monsieur Frédéric PORTET, responsable du Mastère Spécialisé SILAT, pour ses précieux conseils.

Monsieur Amah AKODEWOU, pour ses conseils avisés et ses orientations.

À toute l'équipe du master BioGET et du MS SILAT, qui ont créé une atmosphère conviviale pendant la formation et des échanges extrêmement enrichissants.

À l'équipe des stagiaires de 2023 à la Maison de la Télédétection, pour les moments passés ensemble et les échanges constructifs.

À toute l'équipe de la Maison de la Télédétection, pour les échanges, les conseils et leur chaleureuse hospitalité.

Votre soutien et votre collaboration ont grandement contribué à la réussite de mon stage, et je vous en suis sincèrement reconnaissant.

Matondo ☺

FICHE PROJET

Nom du Projet : Suivi des plantations d'acacias et de leur taux de renouvellement dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa.

Version : 1 Date : 04/04/2023

Commanditaire : Emilien DUBIEZ (Unité Forêt et société CIRAD)

Chef du projet : Jacob KOFFI

Objectif, résultats attendus, à quelle échéance :

Ce projet a pour objectif d'évaluer l'impact des projets d'afforestation à Acacia sur la demande en charbon de bois de la ville de Kinshasa dans la province de Kinshasa au cours des vingt dernières années.

Comme résultats attendus :

Le taux renouvellement des plantations d'acacias sur la période de 2003 – 2023 est évalué en distinguant les grands et les petits périmètres agroforestiers ;

L'impact des feux sur les plantations d'acacias sur la période de 2003 – 2023 est évalué en distinguant les grands et les petits périmètres agroforestiers ;

La cartographie à jour (2023) des plantations est réalisée ;

Les quantités de bois-énergie que les plantations ont pu produire sont estimées ainsi que le potentiel de production futur. Les Livrables sont attendus en septembre

Finalités, enjeux, origine(s) du projet :

Dans les années 70, face aux enjeux d'approvisionnement en bois-énergie de la ville de Kinshasa, des activités de recherche ont conduit à identifier l'*Acacia auriculiformis* comme une essence adaptée aux conditions pédoclimatique du plateau Batéké pour répondre à la demande en bois-énergie. A la fin des années 80, les plantations constituant le massif agroforestier de Mampu ont été installées par une société Hollandaise HVA. Ce n'est qu'au début des années 2000 que ce système a été diffusé par différents projets avec une augmentation significative des fonds dédiés à l'installation des plantations à partir de 2010. Ces plantations d'acacias ont été installées sur le plateau Batéké en réponses aux enjeux environnementaux liés à l'approvisionnement en charbon de bois de la ville de Kinshasa grâce à des financements des bailleurs internationaux. La recommandation est une exploitation des arbres huit ans après la plantation. La régénération naturelle assistée et le brulis

(pour le lever la dormance des graines stockées dans le sol et la litière) sont les méthodes utilisées pour assurer le renouvellement des plantations après abattage et carbonisation du bois. L'absence d'encadrement technique lors de cette phase de renouvellement remet en question la durabilité du système. Le maintien des plantations d'acacia dans le bassin d'approvisionnement en bois énergie de Kinshasa et la durabilité de l'itinéraire technique développé apparaît comme l'enjeu central de la pérennité de ces systèmes agroforestiers pour leur contribution à l'approvisionnement en charbon de bois durable de la ville de Kinshasa, la réduction des pressions sur les écosystèmes forestiers naturels et le maintien des revenus des agroforestiers.

Bénéficiaires, Intérêts du projet pour les différents acteurs :

Bénéficiaires directs :

- Les bailleurs de fonds : Les résultats de ce projet permettront aux bailleurs de connaître l'impact de leurs financements dans les projets d'afforestation dans la province de Kinshasa et d'améliorer leur approche.
- Le gouvernement de la RDC : Ce projet apportera des réponses sur la durabilité des plantations à vocation énergétique dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de la ville de Kinshasa.
- CIRAD : Ce projet permettra au CIRAD de connaître le taux de renouvellement des acacias pendant ces 20 dernières années et déduire l'efficacité des méthodes actuelles de renouvellement des plantations. Les résultats serviront de référence pour l'installation des plantations des acacias dans le cadre du projet PI-PUDT Congo (Programme d'utilisation Durable des Terres Congo) qui démarrera très prochainement.
- Les chercheurs : Les résultats serviront de base de données pour les futures études qui se réaliseront dans le bassin d'approvisionnement en bois énergie de Kinshasa.
- Moi-même : Ce projet me permet d'appliquer mes compétences, acquérir de nouvelles compétences.

Bénéficiaires indirects :

- Les agriculteurs : Renforcement de leur accompagnement pour une meilleure durabilité de leur plantation.
- Les consommateurs : production et distribution de charbon de bois de qualité.

Décomposition du projet en lots :

Démarches administratives : il s'agit de remplir toutes formalités d'accueil du chef de projet au sein de l'entreprise, gérer les mobilités.

Revue bibliographique : il s'agit de faire l'état de l'art des études antérieures se rapprochant de la thématique afin de définir la meilleure approche méthodologique et discuter les résultats qui seront obtenus.

Validation de la méthodologie : les membres de l'équipe projet valideront la démarche technique et scientifique du projet.

Mise au propre des bases de données : dans ce lot, nous allons retravailler les bases de données existantes regroupant les données vérité terrain pour l'entraînement et la validation de notre modèle.

Préparation des codes : lors de stage, le chef de projet travaillera avec un langage (Python) qui ne lui ai pas trop habituel. Il y aura donc une phase de préparation, de prise en main des codes et les adapter au présent projet.

Acquisition des données : il s'agira de télécharger les images optiques (Landstat 7, Sentinel 2, SPOT) disponibles sur la zone d'étude et de les commander si nécessaire.

Traitement des données : dans ce lot nous allons lancer les chaines de traitements des données pour faires des classifications supervisées, les analyses spatiales et les statistiques.

Rédaction de la thèse professionnelle : Il s'agira de rédiger un rapport scientifique avec un résumé en anglais.

Les modalités d'organisation :

Le comité de pilotage : Ce comité réuni le stagiaire (Jacob KOFFI), l'encadrant en entreprise (Simon MADEC), le commanditaire (Emilien DUBIEZ), les référents de formation : Volet statistique (Eric MARCON), volet Télédétection (Kenji OSE).

Le comité partenarial : Ce comité est formé par les référents du stagiaire à la maison de la télédétection et AgroParisTech (Kenji Osé, Eric MARCON), Le chef de projet (Jacob KOFFI), l'encadrant en entreprise (Simon MADEC), le commanditaire (Emilien DUBIEZ).

Équipe projet élargie : Il est constitué avec le chef de projet (Jacob KOFFI), le commanditaire (Emilien DUBIEZ, CIRAD, unité Forêts et Sociétés), l'encadrant en entreprise (Simon MADEC, CIRAD, unité TETIS), le référent de formation à la maison de la télédétection (Kenji Osé), Laurent GAZULL (Co-directeur de l'unité TETIS), deux chercheurs du CIRAD (Valery GOND, Amah AKODEWOU, unité Forêts et Sociétés), la déléguée service administratif de l'entreprise : Emmanuelle MAZZINI (CIRAD, unité Forêts et Sociétés), Annie HUGUET (CIRAD, unité TETIS). Des réunions collectives ne sont pas prévues, mais quelques entretiens individuels seront conduits pour discuter de l'avancement du projet.

Équipe Projet : Cette équipe est formée par le commanditaire (Emilien DUBIEZ), l'encadrant (Simon MADEC) et le chef projet (Jacob KOFFI). (Réunion régulière)

Moyens du projet :

Le projet est sous le patronage de l'unité Forêts et Sociétés du CIRAD, le chef de projet est suivi par un ingénieur de l'unité TETIS du CIRAD pour les appuis techniques.

Le budget bénéficie de l'appui du Projet de consommation durable et de substitution partielle au bois-énergie financé par l'Initiative pour les Forêts d'Afrique Centrale et mise en œuvre par le Programme des Nations Unis pour le Développement. Le budget est piloté par la commanditaire et le service ressource humaine de l'entreprise.

Plan d'actions et échéancier :

		Avril				Mai				Juin				Juillet				Août				Septembre			
Tâches	Ressources humaines	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Démarches administratives	Jacob & Emmanuelle																								
Revue bibliographique	Jacob & Emilien																								
Mise au propre des bases de données	Jacob																								
Validation de la méthodologie	Jacob & Simon & Emilien																								
Préparation des codes	Jacob & Simon																								
Acquisition des données	Jacob & Simon																								
Traitement des données	Jacob & Simon																								
Rédaction de la thèse professionnelle	Jacob & Emilien & Simon																								
Préparation du powerpoint de présentation	Jacob & Emilien																								
Soutenance de thèse professionnelle	Jacob																								
Présentation des résultats devant le personnel de l'entreprise	Jacob																								
Mise à disposition des livrables au commanditaire	Jacob																								

Plan de communication – référentiel qualité :

Le manager de projet (Jacob KOFFI) est en contact permanent avec l'encadrant basé à la maison de la télédétection (Simon MADEC). Des réunions régulières sont prévues avec le commanditaire (Emilien DUBIEZ) pour faire un point de l'avancement du projet et valider les points d'étapes. Emilien DUBIEZ et Simon MADEC feront le point des besoins logistiques avec l'entreprise (commande d'images). La responsable administrative contacte directement le manager de projet pour tout ce qui concerne les démarches administratives.

Indicateurs de résultat :

Comme Indicateur de résultats nous produiront :

- Des cartes des plantations et d'autres occupations des sols (à définir) à l'échelle d'une année ou deux (à définir) ;

- Des graphiques montrant le taux de renouvellement des plantations après chaque exploitation en distinguant les grands et les petits périmètres agroforestiers ;
- Des graphiques de corrélation entre l'occupation des acacias et les autres occupations afin de voir les changements d'affectation sur la zone d'étude ;
- Une carte à jour de l'occupation des plantations agroforestières à acacia en 2023.
- Une estimation du potentiel de production du charbon de bois à partir des superficies et de l'âge des plantations en 2023.

LETTRE DE MISSION

<u>Commanditaire</u>	<u>Tuteur</u>	<u>Chef du projet</u>
DUBIEZ Emilien <u>Entreprise : CIRAD</u>	OSE Kenji MARCON Eric	KOFFI Kossi Jacob

Intitulé du projet : Suivi des plantations d'acacias et de leur taux de renouvellement dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa.

Échéance du projet : 03/04/2023 au 29/09/2023

Contexte : Dans les années 70, face aux enjeux d'approvisionnement en bois-énergie de la ville de Kinshasa, des activités de recherche ont conduit à identifier l'*Acacia auriculiformis* comme une essence adaptée aux conditions pédoclimatique du plateau Batéké pour répondre à la demande en bois-énergie. A la fin des années 80, les plantations constituant le massif agroforestier de Mampu ont été installées par une société Hollandaise HVA. Ce n'est qu'au début des années 2000 que ce système a été diffusé par différents projets avec une augmentation significative des fonds dédiés à l'installation des plantations à partir de 2010. Ces plantations d'acacias ont été installées sur le plateau Batéké en réponse aux enjeux environnementaux liés à l'approvisionnement en charbon de bois de la ville de Kinshasa grâce à des financements des bailleurs internationaux. La recommandation est une exploitation des arbres huit ans après la plantation. La régénération naturelle assistée et le brulis (pour lever la dormance des graines stockées dans le sol et la litière) sont les méthodes utilisées pour assurer le renouvellement des plantations après abattage et carbonisation du bois. L'absence d'encadrement technique lors de cette phase de renouvellement remet en question la durabilité du système. Le maintien des plantations d'acacia dans le bassin d'approvisionnement en bois énergie de Kinshasa et la durabilité de l'itinéraire technique développé apparaît comme l'enjeu central de la pérennité de ces systèmes agroforestiers pour leur contribution à l'approvisionnement en charbon de bois durable de la ville de Kinshasa, la réduction des pressions sur les écosystèmes forestiers naturels et le maintien des revenus des agroforestiers.

Objectifs : Ce projet a pour objectif d'évaluer l'impact des projets d'afforestation à Acacia sur la demande en charbon de bois de la ville de Kinshasa dans la province de Kinshasa au cours des vingt dernières années.

Spécifiquement il s'agira :

- D'évaluer le taux de renouvellement des plantations d'acacia sur la période 2003 – 2023 distinguant les grands et les petits périmètres agroforestiers ;
- D'évaluer l'impact des feux sur les plantations d'acacias sur la période de 2003 – 2023 en distinguant les grands et les petits périmètres agroforestiers ;
- De produire une carte à jour (2023) des plantations d'acacia ;
- D'évaluer les quantités de bois énergie que ces plantations ont pu produire et le potentiel de production futur.

Finalités

- Valider ou non l'itinéraire technique développée jusqu'à ce jour pour l'entretien et le renouvellement des plantations ;
- Avoir une base de données de la localisation actuelle des plantations sur laquelle on pourra se baser pour le suivi des plantations et pour l'installation de nouvelle plantation.

Livrables

- Des cartes des plantations et d'autres occupations des sols (à définir) à l'échelle d'une année ou deux (à définir) ;
- Des graphiques montrant le taux de renouvellement des plantations après chaque exploitation ;
- Des graphiques de corrélation entre l'occupation des acacias et les autres occupations afin de voir les changements d'affectation sur la zone d'étude
- Une carte à jour des plantations
- Graphiques de l'estimation de la quantité de bois énergie produite après chaque renouvellement.

Organisme commanditaire : CIRAD – Forêt et société

Commanditaire : Emilien DUBIEZ

Ce document, régulièrement mis à jour, permet de faire le point avec l'équipe-projet, de disposer d'une mémoire de la vie du projet et d'exposer sous forme synthétique, par exemple lors d'un comité de pilotage, les avancées ou difficultés rencontrées, ainsi que les points nécessitant arbitrage. La tendance générale peut être visualisée par des pictogrammes expressifs (mains, feux, visages ...)

Projet [: Suivi des plantations d'acacias et de leur taux de renouvellement dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa]

REPORTING DU [Avril 2023]

Rédigé par : Jacob KOFFI

Fonction / projet : Chef du projet

Le 27/04/2023

Validé par : Emilien DUBIEZ &

Simon MADEC

Fonction / projet :

Respectivement Commanditaire

et tuteur

Le 27/04/2023

@ Faits marquants survenus au cours de la période concernée

Revue de la littérature : Analyse documentaire

Établissement des limites géographiques en collaboration avec le commanditaire : En collaboration avec notre commanditaire, nous avons précisé la zone géographique qui constituera le champ d'étude.

Collecte de données : Examen des images accessibles et des données de terrain mises à notre disposition pour l'analyse.

- **Pilotage du planning**

Le calendrier s'est déroulé conformément au plan, incluant l'exploration des données et la recherche bibliographique.

- **Pilotage du budget**

La responsabilité de la gestion du budget incombe au commanditaire et à l'administration.

- **Pilotage des équipes**

Ma responsabilité implique de développer une méthodologie adaptée au projet ainsi que d'effectuer une recherche approfondie sur l'état de l'art. Le commanditaire fournit des ressources bibliographiques, tandis que les tuteurs de TETIS (Simon) et d'AgroParisTech (Kenji) collaborent à la conception de la méthodologie et apportent des réflexions pour surmonter les défis rencontrés.

- **Pilotage du prestataire**

Cela ne découlait pas de mes actions.

- **Pilotage des risques et opportunités**

Le risque majeur résidait dans la réussite de l'ensemble des objectifs. En collaboration avec l'équipe, nous avons établi une hiérarchie de priorités parmi les divers objectifs à accomplir.

- **Problèmes rencontrés et solutions envisagées**

Insuffisance de données : Les données de terrain prévues pour le calibrage du modèle de classification étaient inadéquates, car certaines classes censées être représentées n'étaient pas présentes dans certains polygones. Pour combler cette lacune, une étape de photo-interprétation a été envisagée afin de compléter les données.

Caractéristiques spécifiques de la zone d'étude : La zone d'étude se caractérise par une forte couverture nuageuse, même pendant la période sèche. Pour pallier cette situation, nous avons envisagé une approche méthodologique adaptée à ces conditions particulières.

- **Demandes d'arbitrages**

Communication ouverte : J'ai maintenu un dialogue ouvert avec le commanditaire pour partager les divers obstacles rencontrés, en vue d'ajuster les objectifs de l'étude en conséquence.

Ce document, régulièrement mis à jour, permet de faire le point avec l'équipe-projet, de disposer d'une mémoire de la vie du projet et d'exposer sous forme synthétique, par exemple lors d'un comité de pilotage, les avancées ou difficultés rencontrées, ainsi que les points nécessitant arbitrage. La tendance générale peut être visualisée par des pictogrammes expressifs (mains, feux, visages ...)

Projet [: Suivi des plantations d'acacias et de leur taux de renouvellement dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa]

REPORTING DU [Mai 2023]

Rédigé par : Jacob KOFFI

Fonction / projet : Chef du projet

Le 30/05/2023

Validé par : Emilien DUBIEZ &

Simon MADEC

Fonction / projet :

Respectivement Commanditaire
et tuteur

Le 30/05/2023

- **Faits marquants survenus au cours de la période concernée**

Création de la base de données de vérité terrain (par photo-interprétation sur Google Earth Pro)

Création des premiers modèles de classification en utilisant des images provenant de Landsat 7 ETM+ et Sentinel-2.

- **Pilotage du planning**

Le calendrier s'est déroulé conformément au plan, incluant l'analyse des données

- **Pilotage du budget**

La responsabilité de la gestion du budget incombe au commanditaire et à l'administration.

K Pilotage des équipes

Mon rôle consiste à créer des modèles de classification en utilisant des images provenant de Landsat et Sentinel-2, afin de mener une analyse comparative. Le commanditaire, étant familiarisé avec la région, participe à l'évaluation des premières cartes pour déterminer leur adéquation avec le terrain réel. Les tuteurs de TETIS (Simon) et d'AgroParisTech (Kenji) jouent un rôle dans l'interprétation des résultats obtenus.

- **Pilotage du prestataire**

Cela ne découlait pas de mes actions.

- **Pilotage des risques et opportunités**

Le principal risque était lié à la possibilité de confondre différentes classes et à une évaluation incorrecte, soit en sous-estimant, soit en surestimant la présence des zones occupées par l'Acacia. En concertation avec l'équipe, nous avons opté pour des capteurs qui pourraient apporter une plus grande précision à cette étude.

- **Problèmes rencontrés et solutions envisagées**

Confusion marquée entre les petits et les grands massifs d'acacia : Les algorithmes de classification que nous avons évalués ne parvenaient pas à différencier efficacement les deux types de massifs. Le modèle se trouvait souvent désorienté. Pour pallier cette lacune, en accord avec le commanditaire, nous avons choisi de regrouper les massifs de petite et de grande taille en une seule classe (acacia).

Surévaluation des surfaces occupées par l'acacia dans les images Landsat, avec une forte confusion entre les différentes classes.

En concertation avec l'équipe, nous avons convenu d'utiliser les images Sentinelles et de réduire la période de l'étude à la période de 2016 à 2023. Cette décision ne devrait pas poser de problèmes majeurs, car les projets pris en compte dans le cadre de cette étude remontent au plus tard à l'année 2012.

- **Demandes d'arbitrages**

Communication ouverte : J'ai maintenu un dialogue ouvert avec le commanditaire pour partager les divers obstacles rencontrés, en vue d'ajuster les objectifs de l'étude en conséquence.

Ce document, régulièrement mis à jour, permet de faire le point avec l'équipe-projet, de disposer d'une mémoire de la vie du projet et d'exposer sous forme synthétique, par exemple lors d'un comité de pilotage, les avancées ou difficultés rencontrées, ainsi que les points nécessitant arbitrage. La tendance générale peut être visualisée par des pictogrammes expressifs (mains, feux, visages ...)

**PROJET [: SUIVI DES PLANTATIONS D'ACACIAS ET DE LEUR TAUX DE RENOUVELLEMENT
DANS LE BASSIN D'APPROVISIONNEMENT EN BOIS-ENERGIE DE KINSHASA]**

Reporting du [JUILLET 2023]

Rédigé par : Jacob KOFFI

Fonction / projet : Chef du projet

Le 30/07/2023

Validé par : Emilien DUBIEZ &

Simon MADEC

Fonction / projet :

Respectivement Commanditaire
et tuteur

Le 30/07/2023

- **Faits marquants survenus au cours de la période concernée**

Conception des cartes

La rédaction du rapport avance

Contribution au projet Optipalmex (Cartographie des palmiers à huile dans la province de Campeche au Mexique : CIRAD TETIS)

- **Pilotage du planning**

Le calendrier s'est déroulé conformément au plan, incluant l'analyse des données et la rédaction du rapport.

- **Pilotage du budget**

La responsabilité de la gestion du budget incombe au commanditaire et à l'administration.

- **Pilotage des équipes**

Mon rôle consiste à finaliser le premier modèle de classification, se baser sur ce modèle et produire les cartes des autres années, commencer les analyses spatiales et les statistiques.

Le reste de l'équipe contribuait à l'analyse des résultats. En parallèle j'avais pour mission de produire un premier modèle de classification permettant de cartographier les occupations des palmiers à huile du projet Optipalmex.

- **Pilotage du prestataire**

Cela ne découlait pas de mes actions.

- **Pilotage des risques et opportunités**

Le principal risque était lié au fait que le modèle ne soit pas reproductible pour les autres années en raison de la qualité des données.

- **Problèmes rencontrés et solutions envisagées**

La reproductibilité du modèle était limitée pour certaines années. Cependant, nous avons réussi à générer des cartes à des intervalles temporels qui nous ont permis d'effectuer un suivi cohérent des plantations des divers projets.

- **Demandes d'arbitrages**

Communication ouverte : J'ai maintenu un dialogue ouvert avec le commanditaire pour partager les divers obstacles rencontrés, en vue d'ajuster les objectifs de l'étude en conséquence.

RESUME

Les plantations d'acacia jouent un rôle important dans la filière bois-énergie en contribuant à la production de charbon de bois tout en préservant les forêts naturelles. L'utilisation de l'imagerie satellite s'est avérée efficace pour étudier les systèmes agroforestiers à base d'acacia dans la région d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa. L'objectif de cette étude était d'évaluer la faisabilité méthodologique de produire des cartes annuelles des plantations d'acacia dans cette région, puis d'évaluer l'impact des initiatives d'afforestation à base d'acacia dans la zone. Cette étude s'est déroulée en trois phases distinctes : tout d'abord, la création d'un jeu de données par photo-interprétation à partir d'archives d'images à très haute résolution spatiale (THRS) disponibles sur Google Earth Pro, ce jeu de données a servi à calibrer le modèle de classification en utilisant une combinaison d'images Sentinel-1, Sentinel-2 et PlanetScope du programme NICFI. Ensuite, l'automatisation a été mise en œuvre pour produire des cartes en 2016 et 2021. Enfin, une analyse spatiale et statistique a été réalisée pour suivre les plantations d'acacia des projets Makala (2009-2013) et PGAPF (2017-2018) afin d'analyser leur durabilité dans le temps. Les résultats de la classification ont montré une précision globale de 90 % avec un coefficient kappa de 0,87, et une précision de 92 % pour la classe 'acacia'. La surface des plantations s'élevait à 16 991 hectares en 2016, puis est passée à 11 919 hectares en 2019 avant de revenir à 21 463 hectares en 2021. Cependant, les plantations d'acacia présentent un état alarmant. On observe un taux de perte de 57 % pour le projet Makala et six pourcents pour le projet PGAPF. Seulement six pourcents des plantations du projet Makala ont été renouvelées. Les incendies ont également eu un impact significatif, avec un taux d'incendie atteignant 80 % en 2016, 49 % en 2019 et 60 % en 2021 pour le projet Makala, tandis que pour le projet PGAPF, les taux d'incendie étaient de 20 % en 2019 et 57 % en 2021. Compte tenu des services écosystémiques que les systèmes agroforestiers peuvent fournir dans la région d'approvisionnement en bois, il est impératif de revoir les pratiques techniques actuelles et d'adopter des mesures de gestion durable afin de pérenniser les plantations dans le temps et leur contribution à l'approvisionnement en bois-énergie de la ville de Kinshasa.

ABSTRACT

Acacia plantations play a significant role in the wood-energy sector by contributing to charcoal production while preserving natural forests. The use of satellite imagery has proven effective in studying acacia-based agroforestry systems in the wood-energy supply region of Kinshasa. The objective of this study was to assess the methodological feasibility of producing annual maps of acacia plantations in this region and then evaluate the impact of acacia afforestation initiatives in the area. This study was conducted in three distinct phases: firstly, the creation of a dataset through photo interpretation from archives of very high-resolution spatial (VHRS) images available on Google Earth Pro. This dataset was used to calibrate the classification model using a combination of Sentinel-1, Sentinel-2, and PlanetScope images from the NICFI program. Next, automation was implemented to produce maps for 2016 and 2021. Finally, spatial and statistical analysis was conducted to track acacia plantations from the Makala (2009-2013) and PGAPF (2017-2018) projects to assess their long-term sustainability. The classification results showed an overall accuracy of 90% with a kappa coefficient of 0.87, and an accuracy of 92% for the 'acacia' class. The area of acacia plantations was 16,991 hectares in 2016, then decreased to 11,919 hectares in 2019 before rising to 21,463 hectares in 2021. However, the state of acacia plantations is alarming. There is a 57% loss rate for the Makala project and a 6% loss rate for the PGAPF project. Only 6% of the Makala project plantations have been renewed. Fires have also had a significant impact, with a fire rate of 80% in 2016, 49% in 2019, and 60% in 2021 for the Makala project, while for the PGAPF project, fire rates were 20% in 2019 and 57% in 2021. Given the ecosystem services that agroforestry systems can provide in the wood supply region, it is imperative to review current technical practices and adopt sustainable management measures to ensure the long-term viability of plantations and their contribution to the wood-energy supply of the city of Kinshasa.

Table des matières

REMERCIEMENTS	Erreur ! Signet non défini.
RESUME.....	i
ABSTRACT	xvi
Introduction	1
1. Caractéristique du système agroforestier à Acacia	3
2. Matériels et méthode	4
2.1. Zone d'étude	4
2.2. Collecte et présentation des données.....	5
2.3. Présentation des outils	6
2.4. Analyse des données`	6
2.4.1.1 Constitution du jeu de données par photo-interprétation.....	6
2.4.1.2. Téléchargement et prétraitement des images.....	8
2.4.1.3 Traitement et analyse d'images	8
2.4.1.3. Post-traitement des images classifiées	11
2.4.1.4. Analyse spatiale	11
2.4.1.5. Statistiques.....	11
2.3.2. Autres tests.....	12
3. Résultats	13
3.1. Produits globaux.....	13
3.2. Modèle de classification	13
3.3. Cartes d'occupations du sol et dynamique spatio-temporelle de la zone d'étude. .	14
3.4. Suivi des plantations d'acacia.....	21
3.4.1. Suivi des plantations du projet Makala	21
3.4.3 Suivi des plantations du PGAPF	23
4. Discussion	25
4.1. Occupation de sol.....	25
4.2. Suivi des plantations et impact des feux.....	27
4.3. Limites des autres tests.....	29
Conclusion et perspectives.....	31
Références Bibliographiques	33
Liste des figures	38
Liste des tableaux	38
Annexes :	40

Introduction

L'histoire de la filière bois-énergie témoigne d'une révolution majeure et de son importance actuelle dans le monde. Le bois-énergie planté est une source d'énergie renouvelable qui contribue à la préservation des forêts naturelles en limitant les pressions anthropiques (Gazull et *al.*, 2019). Il aide également à réduire les émissions de gaz à effet de serre et atténue les impacts des changements climatiques (Leturcq, 2010). De plus, le bois-énergie peut être utilisé à des fins domestiques, commerciales et industrielles (Remedio, 2002).

En Afrique, le bois-énergie est une source d'énergie vitale (Madon, 2017). Dans l'ensemble des pays africains, la filière bois-énergie contribue à plus de 80 % de la consommation totale d'énergie domestique (Marien, 2008). En République démocratique du Congo (RDC), les ménages dépendent fortement du bois-énergie pour la cuisson des aliments. 97 % des ménages de la ville de Kinshasa utilisent régulièrement le charbon de bois comme source d'énergie domestique (Gazull et *al.*, 2020). La consommation moyenne d'une personne a été estimée à 0,346 kg de charbon de bois par jour, ce qui équivaut à une consommation annuelle de 2,256 millions de tonnes de charbon de bois, dont 1,667 million de tonnes sont consommées par les ménages et 0,859 million de tonnes par les utilisateurs à des fins productives. Cela représente 18 millions de m³ de bois consommés par an, en considérant un rendement de carbonisation de 12,5 % (Dubiez et *al.*, 2022).

Pour répondre à la demande croissante en charbon de bois. Le gouvernement Congolais, à la fin des années 70, avait déjà identifié le développement de plantation comme un moyen de répondre à l'augmentation de la demande en charbon de bois de Kinshasa et réduire les pressions sur les espaces forestiers en périphérie de la ville (Bisiaux et *al.*, 2009).

Suite à des essais de plantation au Centre Forestier de Kinzono, situé à 170 km de Kinshasa sur le plateau Batéké, l'*Acacia auriculiformis* a été particulièrement remarqué comme essence adaptée aux conditions pédoclimatiques du plateau Batéké (Gerkens et Kasali, 1988). A la fin des années 80, 8000 ha de plantations ont été installées sur les savanes du plateau Batéké (Mampu). Depuis, de nombreux projets ont accompagné le développement de plantations d'acacia à vocation énergétique sur le plateau Batéké (Proces et *al.*, 2017). Les plantations d'acacia sont largement reconnues pour leur rôle essentiel dans la fourniture de bois-énergie durable et la lutte contre la dégradation des terres (Marien et *al.*, 2008). Toutefois ces plantations sont exposées à des feux fréquents et la durée des projets de développement (4 à 5 ans) ne permet pas un encadrement technique complet jusqu'à exploitation de ces plantations (7 à 8 ans) remettant en question la réussite du renouvellement de ces plantations et donc leur durabilité. Pour évaluer l'impact des

projets, il est primordial de suivre l'évolution des plantations dans le temps notamment en évaluant leur taux de renouvellement et la proportion des plantations affectées par le feu.

L'utilisation de la télédétection par satellite est désormais essentielle pour la surveillance des évolutions de la couverture terrestre. Cette technique offre des mesures régulières et normalisées qui sont à la fois continues dans l'espace et comparables dans le temps (Nagendra, 2001). Cette méthode permet d'observer l'évolution des plantations dans le temps et suivre leur dynamique (Akodewou et *al.*, 2022).

Suite à l'appui des différents projets d'afforestation à acacia financés par les bailleurs internationaux (UE, Banque Mondiale, Banque Africaine de Développement), la superficie théorique des plantations d'acacia, sur le plateau Batéké, devrait être de autour de 35 000 hectares. Cependant, les observations actuelles, de terrain, remettent en question ce chiffre. Deux facteurs impactent la durabilité des plantations. La première est l'exposition au feu, très fréquente sur les savanes et occasionnant des dégâts importants sur les plantations. La seconde est l'absence d'encadrements techniques lors de la première exploitation des plantations (7 à 8 ans) (Bisiaux et *al.*, 2009). Après exploitation, les plantations sont renouvelées par régénération naturelle assistée via un brûlis levant la dormance des graines présentes dans le sol et la litière (Bisiaux et *al.*, 2009; Proce et *al.*, 2017). Cette technique permet de renouveler la plantation sans passer par une étape de production de plants en pépinière dans un environnement où l'accès à l'eau est difficile.

Actuellement, ils existent des plantations de petites superficies (0,5 à 50 ha) et de grandes superficies (plusieurs milliers d'hectares d'un seul tenant), avec des techniques de gestion différentes (Proce et *al.*, 2017). Le maintien des plantations dans le temps est crucial pour assurer un approvisionnement durable et stable de la ville de Kinshasa en charbon de bois et limiter la pression sur les écosystèmes forestiers naturels situés dans le bassin d'approvisionnement de la ville.

L'objectif global comporte deux volets : tout d'abord, il s'agit d'examiner la faisabilité méthodologique de créer des cartes annuelles des plantations d'acacia dans une partie de la région d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa. Ensuite, l'objectif est d'évaluer l'incidence des initiatives d'afforestation à base d'acacia dans la zone.

Spécifiquement, nous allons :

- Évaluer la dynamique spatio-temporelle des plantations ;
- Évaluer le taux de renouvellement des plantations sur un échantillon réduit ;
- Évaluer l'impact des feux sur les plantations sur un échantillons réduit.

1. Caractéristique du système agroforestier à Acacia

En réaction aux problèmes d'approvisionnement en bois-énergie et en produits vivriers à Kinshasa, qui ont été identifiés depuis les années 1980, le système agroforestier à acacia a été progressivement mis en place sur les savanes du plateau Batéké (Proces et *al.*, 2017). Il s'agit d'un système agroforestier séquentiel alternant la production de cultures vivrières et de bois pour la production de charbon (Dubiez et *al.*, 2019). Les acacias sont des légumineuses appartenant à la famille des Fabaceae. Ils possèdent la faculté de fixer l'azote atmosphérique dans les sols peu riches des savanes du plateau Batéké. En effet, les sols des plateaux Batéké sont sableux, chimiquement pauvre et avec une faible rétention hydrique (Dubiez et *al.*, 2019). Cette capacité permet donc de favoriser la croissance des plants d'acacia ainsi que des cultures vivrières (Reyniers, 2019). Une fois que les plantations atteignent leur maturité, les arbres sont abattus et le bois utilisé pour la production de charbon de bois par la construction de meule de carbonisation traditionnelle. Une fois le charbon produit, un brûlis est conduit sur la parcelle permettant d'activer la germination des graines d'acacia contenues dans le sol et renouvelant le peuplement d'acacia.

Ce modèle agroforestier, qui combine la technique traditionnelle de l'abattis-brûlis, facilite l'adoption de l'itinéraire technique par les agriculteurs et favorise une régénération naturelle assistée à moindre coût (Bisiaux et *al.*, 2009).

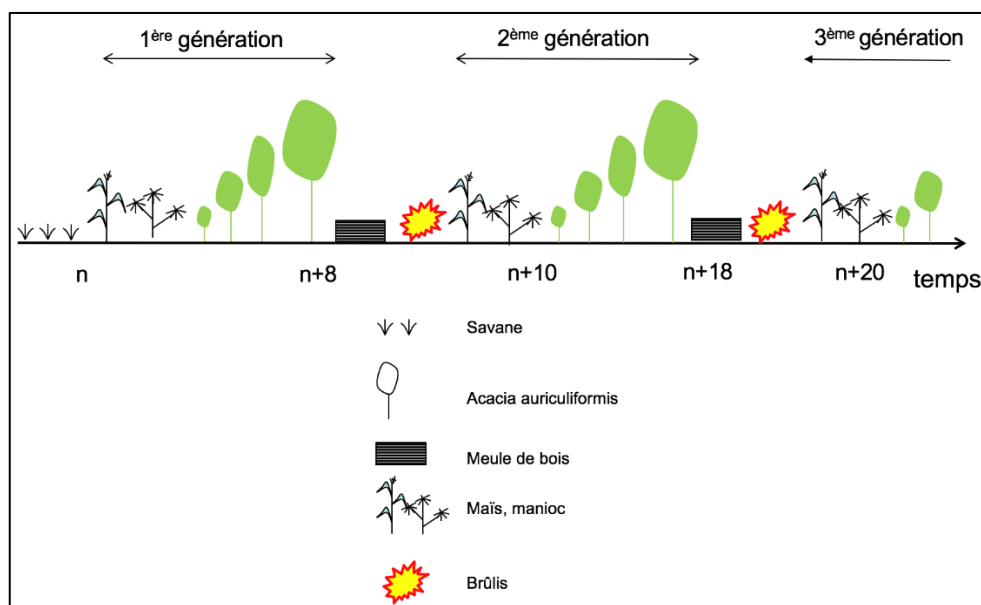


Figure 1 : Schéma illustrant l'évolution théorique du système agroforestier à acacia dans le temps sur le plateau Batéké en RDC (adapté de (Dubiez et *al.*, 2019))



Planche 1 : Quelques illustrations du système agroforestier à acacia : A : meule traditionnelle de carbonisation pour la production de charbon de bois ; B : régénération d'acacia après brûlis ; C : tubercules de manioc exploités sur une parcelle en premier plan et en deuxième plan des plantations d'acacia ; D : à gauche des plantations d'acacia et à droite des pieds d'acacia abattus pour les cultures vivrières avec la régénération de l'acacia ; E : Sacs de charbon de bois après transformation. (Source des images : Emilien DUBIEZ)

2. Matériels et méthode

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude (Figure 2) est localisée dans la province de Kinshasa en République démocratique du Congo (RDC), qui est l'un des plus vastes pays d'Afrique avec une superficie de 2 329 374 km² (Gigaud, 2012). Plus spécifiquement, la zone d'étude se trouve sur le plateau Batéké, couvrant environ 7 500 km², soit 75% de la province de Kinshasa. Le plateau Batéké s'étend vers l'est de Kinshasa et forment un haut plateau avec une altitude variant entre 600 et 700 mètres (Biloso Moyene, 2008).

Le climat de la zone d'étude est de type tropical humide (Dubiez et *al.*, 2019). Le sol dans cette zone est principalement sableux (Kachaka et *al.*, 2023). Il y a une grande saison sèche d'une durée de 4 mois, allant de juin à septembre. La température annuelle moyenne est de 26°C, avec une hauteur de précipitation d'environ 1400 mm/an et une humidité relative moyenne de 80%

(moyenne journalière). Les plateaux Batéké sont généralement occupés par de la savane arborée, tandis que les versants autour des rivières abritent des forêts galeries (Boulogne et *al.*, 2013; Gigaud, 2012)

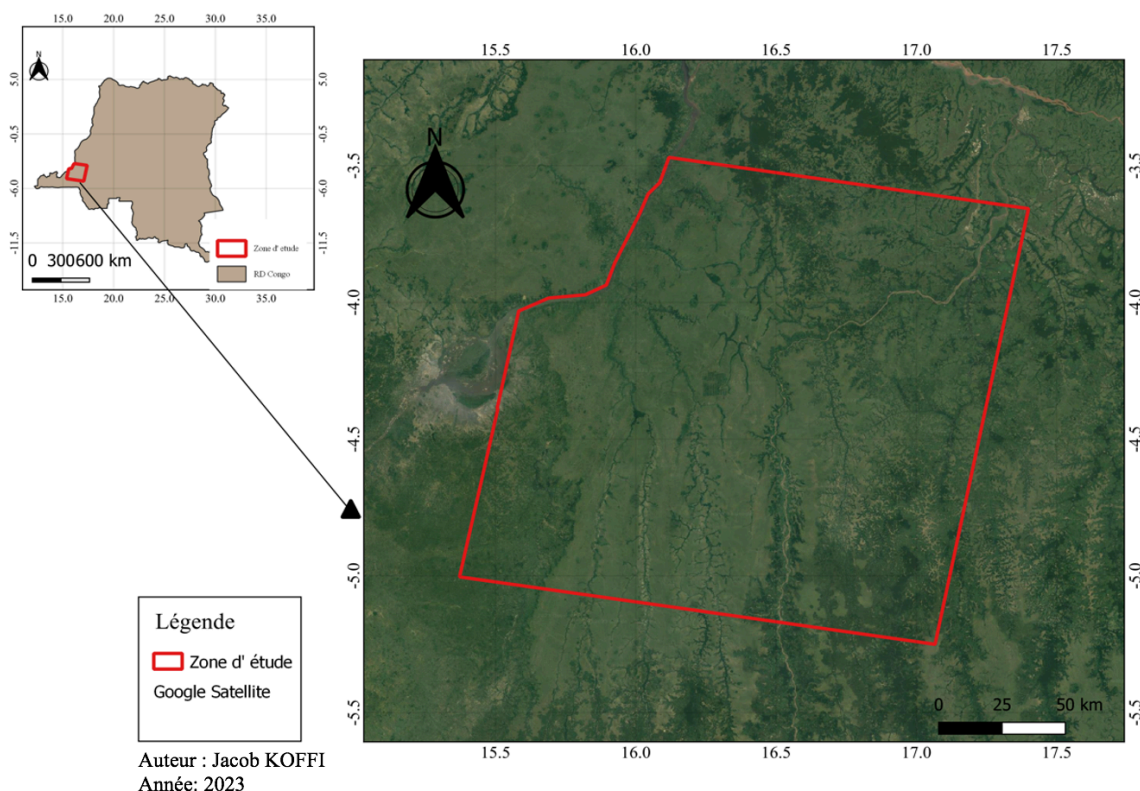


Figure 2 : : Délimitation de la zone d'étude pour le suivi de l'évolution des plantations agroforestières d'acacia sur le plateau Batéké en RDC

2.2. Collecte et présentation des données

Pour la conduite de cette étude, nous avons utilisé des données de terrain ainsi que des données satellitaires. Les données de terrain ont été fournies par le commanditaire et comprennent des points GPS ainsi que des polygones délimitant principalement les plantations d'acacias et d'autres types d'occupations du sol, collectés lors des sorties sur le terrain dans le cadre de deux projets d'afforestation à acacia. Le projet UE Makala (2009-2013) et le Projet de Gestion Améliorée des Paysages Forestiers (PGAPF) entre 2015-2019 financé par la Banque Mondiale.

En raison des restrictions sécuritaires en vigueur en République démocratique du Congo, aucune phase de terrain n'a pu être conduite au cours de ce stage. Sur l'ensemble des données de terrain récupéré, certains polygones qui devraient représenter les plantations d'acacia ne l'étaient pas ce

qui a nécessité de compléter les données par une photo-interprétation réalisée à partir de Google Earth Pro.

Les données satellitaires ont été collectées à partir de la plateforme Google Earth Engine. Les données optiques comprennent des images Landsat7 ETM+ en surface réflectance, des images Sentinel-2 en surface réflectance ainsi que des images radar Sentinel-1 GRD. En plus de cela des composites d'images provenant du programme NICFI PlanetScope et des produits dérivés du Global Forest Cover (GFC) ont été utilisés.

Tableau 1 : Récapitulatifs des images et leur résolution spatiale et temporelle

Images	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Landsat7 ETM+	30 mètres	16 jours
Sentinel-1 GRD	10 mètres	6-12 jours
Sentinel-2_SR	10 mètres	5 jours
PlanetScope (NICFI)	4,77 mètres	Un composite par mois

2.3. Présentation des outils

La réalisation de cette étude a nécessité l'utilisation de plateformes de traitements en ligne tels que Microsoft Planetary Computer et Google Earth Engine en raison de leur facilité d'accès aux données et de leur rapidité de calcul. Plusieurs arguments justifient ce choix :

- Échelle planétaire : Les données spatiales disponibles sur ces plateformes couvrent l'ensemble de la planète. Ce n'est pas le cas, par exemple, des produits Theia qui ne sont pas disponibles dans notre zone étude.
- Google Earth Engine dispose de ressource de calculs sur le cloud ce qui permet de traiter rapidement la quantité de données utilisées dans cette étude.
- Les données sont prétraitées et une bibliothèque d'algorithme est disponible (Cardall et *al.*, 2021).

Cependant, il convient de noter que ces plateformes ont des limitations en termes de capacité de calcul.

2.4. Analyse des données`

2.4.1. Méthodes

2.4.1.1 Constitution du jeu de données par photo-interprétation

La première étape a consisté à constituer les données d’entraînement et de validation du modèle de classification et faire un nettoyage des données. Pour cela des polygones distinguant sept classes (Figure 3) ont été construits à partir de GEP (Tableau 2). Les archives couvrant une grande partie de la zone d’étude correspondent à l’année 2019. Très peu d’archives sont disponibles pour les autres années.

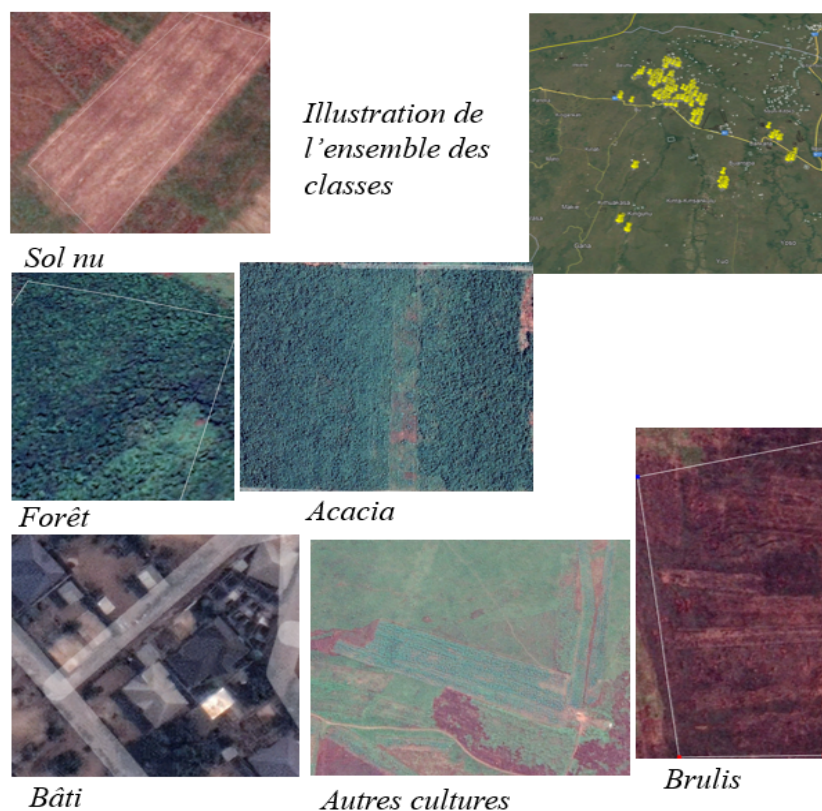


Figure 3 : Illustration de la phase de photo-interprétation et les différentes classes

Tableau 2 : Caractéristiques des données d’apprentissage et de validation

Nombre de classe	Nombre de Polygones	Surface moyenne (ha)	Surface totale (ha)
Acacia	290	5,83	1089,45
Forêt	307	17,70	3899,38
Surface Brulée	107	8,31	889,45
Sol nu	229	6,75	1546,62
Autre végétation	356	5,38	1918,33
Eau	44	1,61	71,02
Bâti	130	0,029	3,89

2.4.1.2. Téléchargement et prétraitement des images

Les images utilisées ont été obtenues avec leur résolution spatiale native via la plateforme Google Earth Engine. Nous avons utilisé le masque de nuage fourni, associé aux données et accessible via la plateforme pour masquer les nuages. Les images exploitées dans le cadre de cette étude sont en surface réflectance (SR) (ce qui supprime l'influence de l'atmosphère sur les valeurs des indices). Les images, non corrigées (Sentinel-2 en 2016), ont été corrigées par la chaîne de traitement SIAC (Sensor Invariant Atmospheric Correction) disponible sur la plateforme (Sherjah et *al.*, 2023).

2.4.1.3 Traitement et analyse d'images

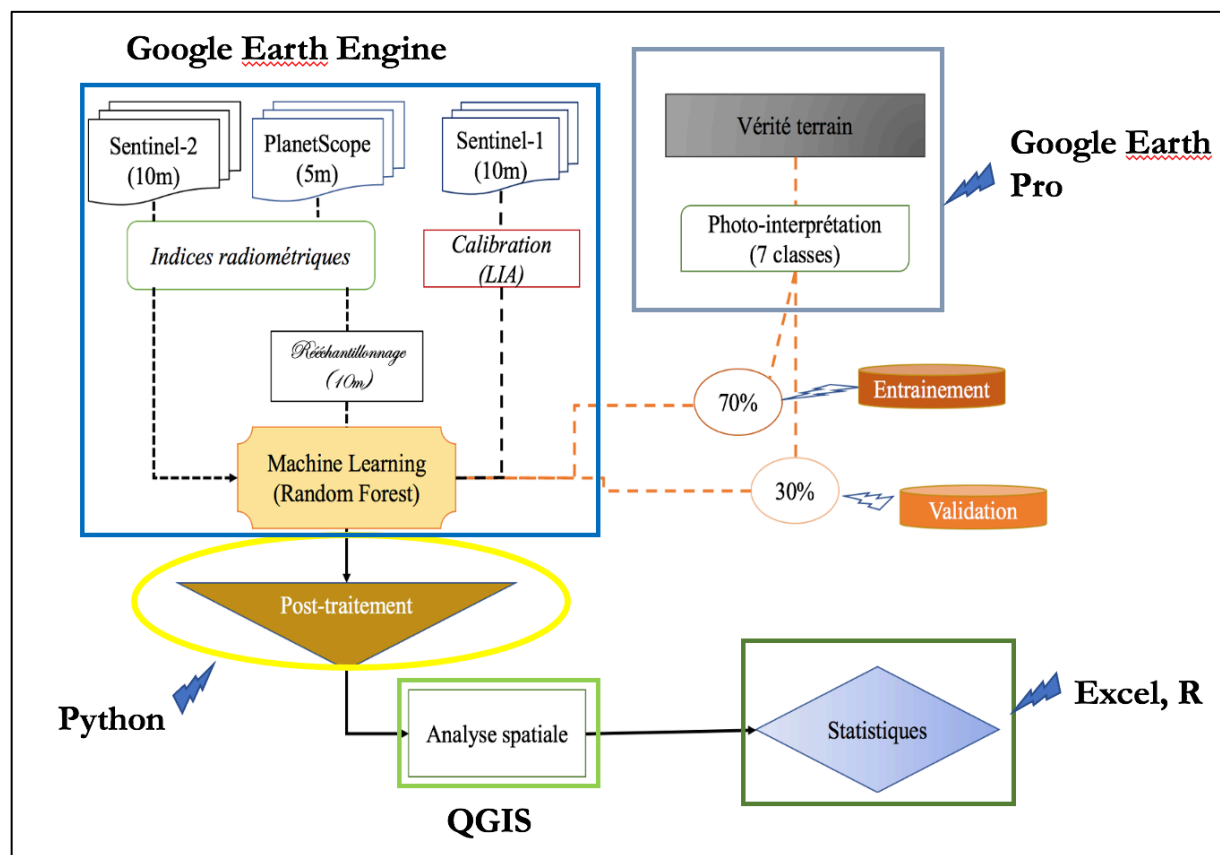


Figure 4 : Synthèse de la méthodologie mise en œuvre pour étudier l'évolution des plantations d'acacia dans le temps sur le plateau Batéké en RDC (Koffi, 2023)

Cette phase s'est faite en 2 étapes : La première étape est le calcul des descripteurs qui vont permettre d'entraîner notre modèle de classification. On utilise dans ces études des indices radiométriques qui permettent la discrimination des différentes classes (Tableau 3).

Tableau 3 : Récapitulatif des indices radiométriques

Acronymes	Définitions	Formules	Références
NDVI	Indice de Végétation Différenciée Normalisée	$(\text{NIR} - \text{Rouge}) / (\text{NIR} + \text{Rouge})$	(Pettorelli, 2013)
NDWI	Indice de l'Eau Normalisé Différencié	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	(Gu et <i>al.</i> , 2007)
NBR	Indice de Brûlure Normalisé	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	(Roy et <i>al.</i> , 2006)
MSAVI2	L'indice de Végétation Ajusté au Sol Modifié 2	$\text{MSAVI2} = (2 * \text{NIR} + 1 - \sqrt{(2 * \text{NIR} + 1)^2 - 8 * (\text{NIR} - \text{Rouge})}) / 2$	(Bégué et Myneni, 1996)
IB	Indice de brillance	$((\text{Red} * \text{Rouge}) + (\text{NIR} * \text{NIR}))^{1/2}$	(Bannari et <i>al.</i> , 1996)
RECI	Indice de Couverture Végétale Efficace en Infrarouge	$(\text{NIR} / \text{Rouge}) - 1$	
EVI	Indice d'État de la Végétation	$2.5 * ((\text{NIR} - \text{Rouge}) / (\text{NIR} + 6 * \text{Rouge} - 7.5 * \text{bleu} + 1))$	(Matsushita et <i>al.</i> , 2007)
ICV	Indice de Végétation Combiné	$(\text{NIR} / \text{Vert}) - 1$	
VARI	Indice de Réflectance à Variation des Angles	$(\text{Vert} - \text{Rouge}) / (\text{Vert} + \text{Rouge} - \text{Bleu})$	
LAI	Indice de Surface Foliaire	$(3.618 * \text{EVI} - 0.118)$	(Adam et <i>al.</i> , 2010)
NDBI	Indice de construction de différence normalisée	$(\text{SWIR2} - \text{NIR}) / (\text{SWIR2} + \text{NIR})$	(Zha et <i>al.</i> , 2003)

La deuxième étape vise à développer un modèle de référence pour l'année 2019 en utilisant les données de vérité terrain obtenues via GEP. Ce modèle servira ensuite à l'automatisation pour les autres années. L'année 2019 a été choisie en raison de la disponibilité des données et la qualité des données à cette année (plusieurs archives GEP couvraient la zone, moins de nuage). Afin d'éviter les biais lors de l'automatisation de la carte pour l'année 2016 où les images n'étaient pas en SR, la

même correction SIAC a été appliqué aux images en 2019 en prenant des images non corrigées pour la production de la carte en 2016.

La construction du modèle de référence a été réalisée en utilisant une classification supervisée orientée pixels sur la plateforme Google Earth Engine (GEE). Un premier essai a été effectué en utilisant des images composites sentinel-2_SR sur la période de la saison sèche. Ces composites d'images permettent d'éliminer les nuages en prenant la médiane des pixels des images sur la période couverte par le composite. Cependant, si une zone est constamment couverte de nuages pendant cette période, les nuages seront présents dans l'image finale et réduiront la zone couverte par l'étude. Les attributs spatiaux ont été calculés à partir de ces composites, puis différents algorithmes de classification ont été testés. Les bandes B2 à B12 de Sentinel-2, ainsi que les attributs spatiaux, ont été utilisées comme prédicteurs pour le modèle.

La cartographie des occupations de sol est souvent réalisée soit à l'aide d'un seul capteur ou par la combinaison de plusieurs capteurs, comme observé dans les travaux de (Adam et *al.*, 2010; Njutapvou et *al.*, 2021; Reiche et *al.*, 2021). Une autre méthode a également été explorée, basée sur la combinaison d'images de différentes sources : Sentinel-2, Sentinel-1 et des images PlanetScope. Le traitement des images Sentinel-2 (10 mètres de résolution) a impliqué la création de composites pour chaque mois, en calculant les attributs sur chaque composite. Les attributs pris en compte sont le NDVI, NDWI, NBR, NDBI, et MSAVI2. Concernant le traitement Sentinel-1 (Radar, 10 mètres de résolution), un composite a été réalisé sur une période de saison sèche. La correction LIA (Logarithmic Intensity Ratio) a été appliquée pour réduire les effets de la topographie sur les images radar en mesurant les variations du coefficient de rétrodiffusion entre différentes acquisitions (Descals et *al.*, 2021). La bande VH a été sélectionnée pour la prédiction du modèle de classification. La bande VH pourrait fournir des informations sur la structure horizontale de la végétation permettant de discriminer les cultures et autres types végétations (Talab Ou Ali et *al.*, 2017). Enfin, le traitement PlanetScope (5 mètres de résolution) a utilisé des images composites mensuelles fournies par le programme NICFI, comprenant les bandes rouge, verte, bleue et proche infrarouge. Les attributs spatiaux calculés incluent l'IB, LAI, VARI, ICV et RECI, ils ont été tous calculés à l'échelle de 5 mètres de résolution puis ensuite ré-échantillonné à 10 mètres.

Après divers essais d'algorithmes, le Random Forest s'est révélé être le plus performant en termes de scores, et il a également un temps d'exécution plus courts.

2.4.1.3. Post-traitement des images classifiées

Après la classification, des opérations de morphologie mathématique sont employées en étape de post-traitement : une érosion avec un masque de dimension 3x3 est appliquée pour éliminer les pixels isolés. Par la suite, afin d'assurer la cohérence et la continuité des objets classifiés, trois itérations de dilatation sont appliquées avec un masque de dimension similaire.

2.4.1.4. Analyse spatiale

Pour évaluer le taux de renouvellement des plantations d'acacia, nous avons procédé à un échantillonnage des polygones pour les deux projets inclus dans notre étude. Au total, 70 polygones ont été sélectionnés, dont 35 provenant du projet Makala et 35 du projet PGAPF. Les polygones utilisés ont été choisis de manière aléatoire sur l'ensemble des polygones constitué d'acacia. Pour le projet Makala, les polygones sélectionnés correspondent à des plantations établies entre 2010 et 2013, tandis que ceux du projet PGAPF représentent des plantations établies entre 2017 et 2018.

Nous avons veillé à délimiter soigneusement les polygones afin de garantir qu'ils représentent des plantations d'acacia. Pour cela, nous avons effectué une intersection entre les polygones des projets et les polygones d'occupation du sol issus de la polygonisation des cartes d'occupation du sol que nous avons produites avec le logiciel QGIS. En plus des polygones d'acacia qui intersectent nos polygones de projets, nous avons également considéré comme des plantations d'acacia les polygones de la classe "forêt" qui intersectent ces polygones. Cette décision a été prise en raison de la confusion possible entre la classe "acacia" et la classe "forêt" et afin de ne pas sous-estimer la superficie occupée par les plantations d'acacia.

2.4.1.5. Statistiques

Le calcul du taux de perte a été effectué suivant la formule :

$$\text{Taux de perte de surface} = \frac{\text{Surface après} - \text{Surface avant}}{\text{Surface avant}} * 100 ,$$

Les « surfaces avant » peuvent être aussi des surfaces initiales

Le taux de surface impactée par le feu a été calculé suivant la formule :

$$\text{Taux de surface impactée par le feu} = \frac{\text{Surface brûlée}}{\text{Surface totale}} * 100$$

Un taux de perte de zéro indique un renouvellement complet de la plantation, tandis qu'un taux positif indique une augmentation de surface et un taux négatif une diminution de surface.

Un taux de surface impactée par le feu de zéro indique une plantation non affectée par le feu, tandis qu'un taux plus élevé indique la détection de surface brûlée.

2.3.2. Autres tests

Dans l'optique d'identifier une méthode fiable pour répondre aux objectifs de cette étude, plusieurs autres tests ont été effectués :

- Exploitation de produits globaux

Pour surveiller les changements dans la couverture arborée des parcelles d'acacia, nous avons utilisé les données provenant de Global Forest Change (GFC), une source fournissant des cartes annuelles détaillant les pertes et les gains de couverture forestière à l'échelle mondiale. Ces cartes ont été élaborées en utilisant des images Landsat7 avec une résolution de 30 mètres, en tenant compte des arbres d'une hauteur supérieure à 5 mètres depuis l'année 2000 jusqu'en 2022. Notre hypothèse sous-jacente est que les acacias peuvent être détectés par GFC dans le contexte forestier étant donné que ces derniers peuvent atteindre une hauteur de 20 mètres. En effectuant une superposition entre les zones géographiques échantillonnées sous forme de polygones et les cartes de changement de couverture forestière (pertes et gains), nous avons pu calculer l'évolution au fil du temps de la superficie forestière perdue et gagnée spécifiquement dans les zones couvertes par les polygones d'acacia. Nous avons ensuite procédé à une validation en établissant une corrélation entre les observations des surfaces obtenues par photo-interprétation, auxquelles nous avons attribué des taux de pertes, et les données fournies par GFC.

- Série temporelle Landsat7 ETM, Sentinel 1, Sentinel 2

Un autre test utilisé a consisté à suivre l'évolution temporelle des parcelles d'acacia. Il convient de noter que la zone d'étude est souvent couverte de nuages, ce qui rend difficile l'obtention d'une bonne série temporelle. Nous avons réalisé plusieurs tests en utilisant des séries temporelles composées uniquement de données Sentinel 2 Surface Reflectance (SR), uniquement de données Landsat7 ETM, ou en combinant les données Sentinel-1 Ground Range Detected (GRD) et Sentinel-2_SR. Dans un premier temps, nous avons utilisé la bande VH du Sentinel-1, puis nous avons calculé le quotient de la bande VH par la bande VV du Sentinel 1.

Nous avons également testé des séries temporelles annuelles basées sur des composites d'images satellites.

3. Résultats

3.1. Produits globaux

En ce qui concerne les produits fournis par GFC, seul neuf plantations échantillonnées sur 35 ont été identifiées à la fois comme des pertes et des gains de couverture forestière, ce qui a été en contradiction avec les observations issues de la photo-interprétation. De plus, il n'y a pas eu de corrélation évidente entre les résultats obtenus par photo-interprétation et ceux fournis par GFC (annexe 6).

3.2. Modèle de classification

Les différentes évaluations de classification issues des capteurs individuels d'une part, et la combinaison de ces capteurs d'autre part, sont présentées ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4 : Synthèse des résultats obtenus dans les différents tests de classification

	Composite L7 ETM+	Composite S2	Composite par mois S2	Composite par mois S1 + S2	Composite par mois S2 +S1+ Planet
Précision Globale	0,78	0,73	0,88	0,89	0,90
Kappa	0,72	0,65	0,85	0,86	0,87
Précision Acacia	0,60	0,69	0,86	0,87	0,92

On observe une précision globale de 0,78 et 0,73 en utilisant respectivement un composite Landsat7 et S2. Cette précision est augmentée à 0,88 lorsqu'un composite par mois est considéré. La précision globale est fortement impactée par des confusions entre les classes « Sol nu » « brulis » et « autre végétation » (Annexes 3, 4, 5). La classe Acacia est quant à elle confondue avec la classe forêt.

L'intégration des données radar et des informations provenant de la composition PlanetScope a permis d'améliorer la précision de certaines catégories et de réduire les confusions entre la classe "acacia" et la classe "forêt". Les résultats de classification présentent une précision globale de 90,9 %, avec un coefficient kappa de 0,87. Notamment, la précision de la classe "acacia" est remarquablement élevée, atteignant 92,47 %. Cela signifie que 92,47 % des pixels correspondant aux plantations d'acacia ont été correctement identifiés, tandis que 7,53 % ont été mal classés.

Les autres classes telles que "forêt", "brûlis", "sol nu", "autre végétation" et "eau" sont également bien classées, avec des précisions allant de 83,93% à 97,74%. Cependant, il est important de noter

qu'il existe une confusion notable entre les bâtiments et les zones dépourvues de végétation ("sol nu"). En effet, 43,14% des surfaces correspondant à des bâtiments sont classées à tort comme "sol nu" (Figure 4) mais cela n'impacte pas les résultats de notre étude

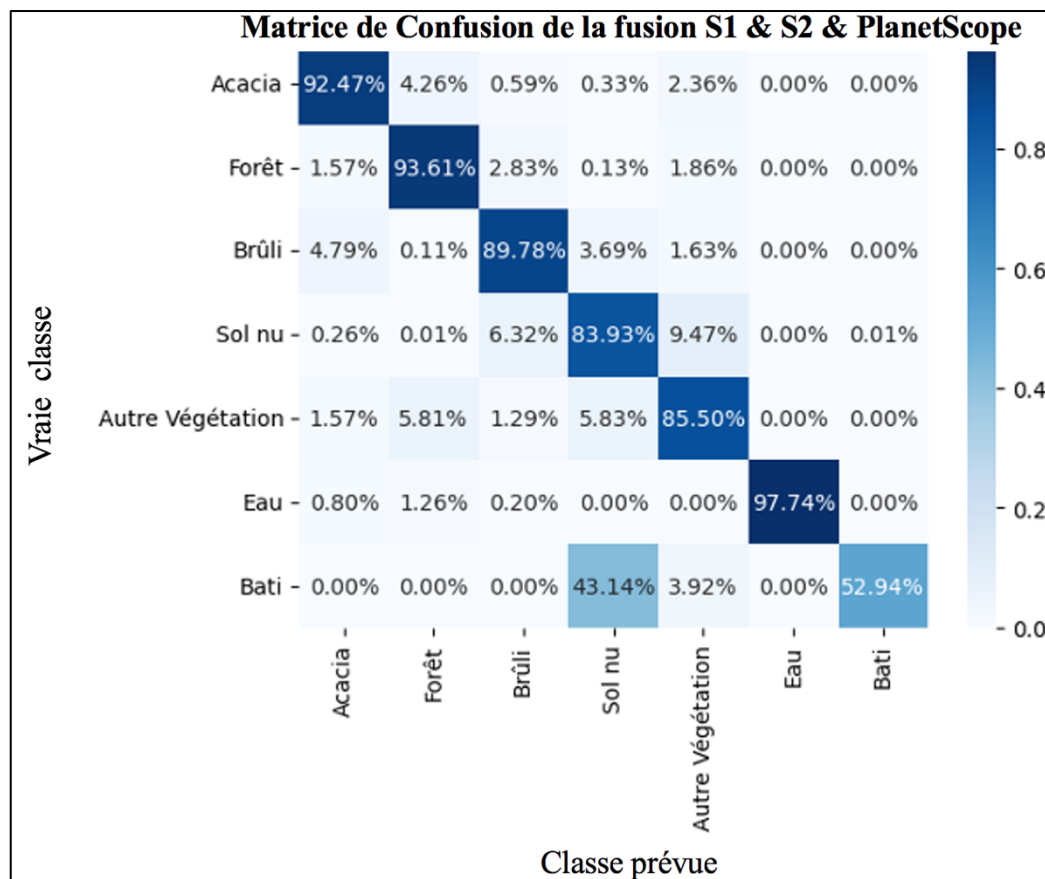


Figure 5 : Matrice de confusion résultant de la combinaison des images provenant des capteurs S1, S2 et PlanetScope

3.3. Cartes d'occupations du sol et dynamique spatio-temporelle de la zone d'étude.

Les diverses analyses que nous avons entreprises ont été confrontées à différents obstacles. Parmi ceux-ci, la présence fréquente de nuages a entravé la création d'une série temporelle cohérente. De plus, un autre défi majeur a résidé dans la faible différenciation du NDVI entre les classes "acacia" et "autre végétation", ce qui a compliqué la détection des chutes du NDVI pouvant indiquer un changement d'occupation des sols lié à une exploitation du peuplement.

Ces contraintes nous ont conduit à s'intéresser à l'analyse de cartes en 2016, 2019 et 2021 où nous disposons d'images peu impactées par la présence de nuages. On note que les images téléchargées pour 2016 ont subi une correction SIAC.

Selon les cartes d'occupation du sol produites en 2016, les plantations d'acacia couvraient 5% de la zone d'étude, soit une superficie de 16991 hectares (Figure 9). La région était caractérisée par une importante étendue de zones brûlées, occupant 30% de la zone, suivies des forêts (20%), des autres végétations (18%), de sols nus (15%) et de surface en eau et de bâtiments, chacune représentant 1% de la superficie (Figure 6 ; Figure 10).

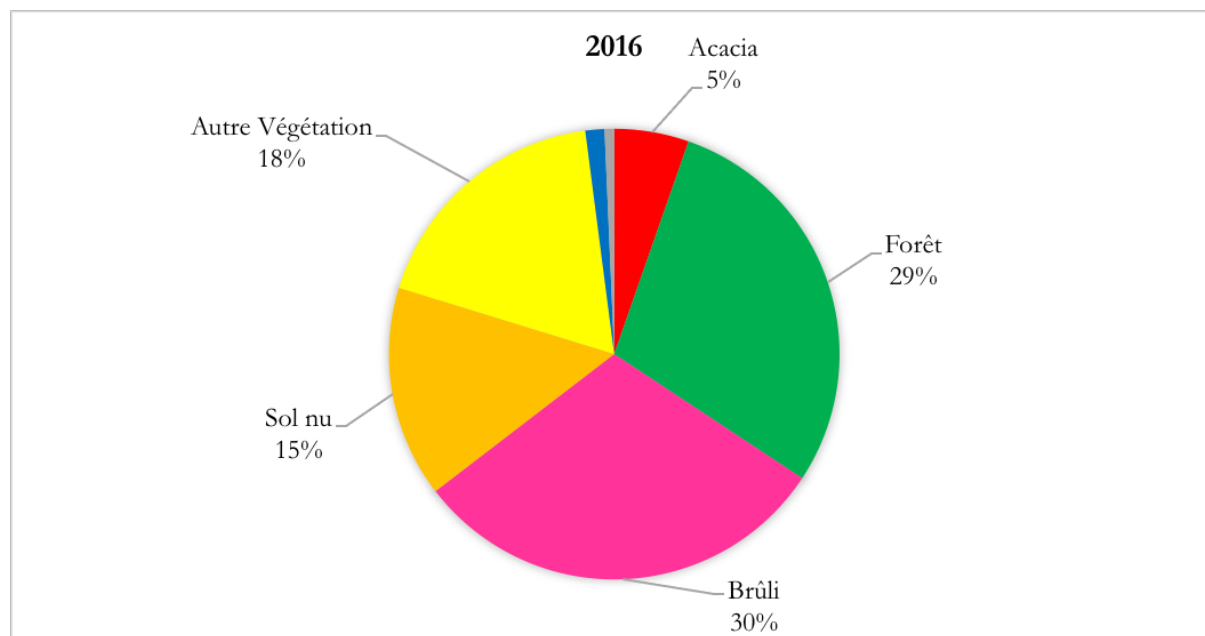


Figure 6 : Répartition des occupations de sol en 2016

En 2019, la couverture des plantations d'acacia a légèrement diminué à 4%, équivalant à 11920 hectares (Figure 9). On observe une augmentation des surfaces forestières (32%) et des autres végétations (36%), tandis que les zones brûlées (14%) et les sols nus (13%) ont diminué. (Figure 7 ; Figure 11).

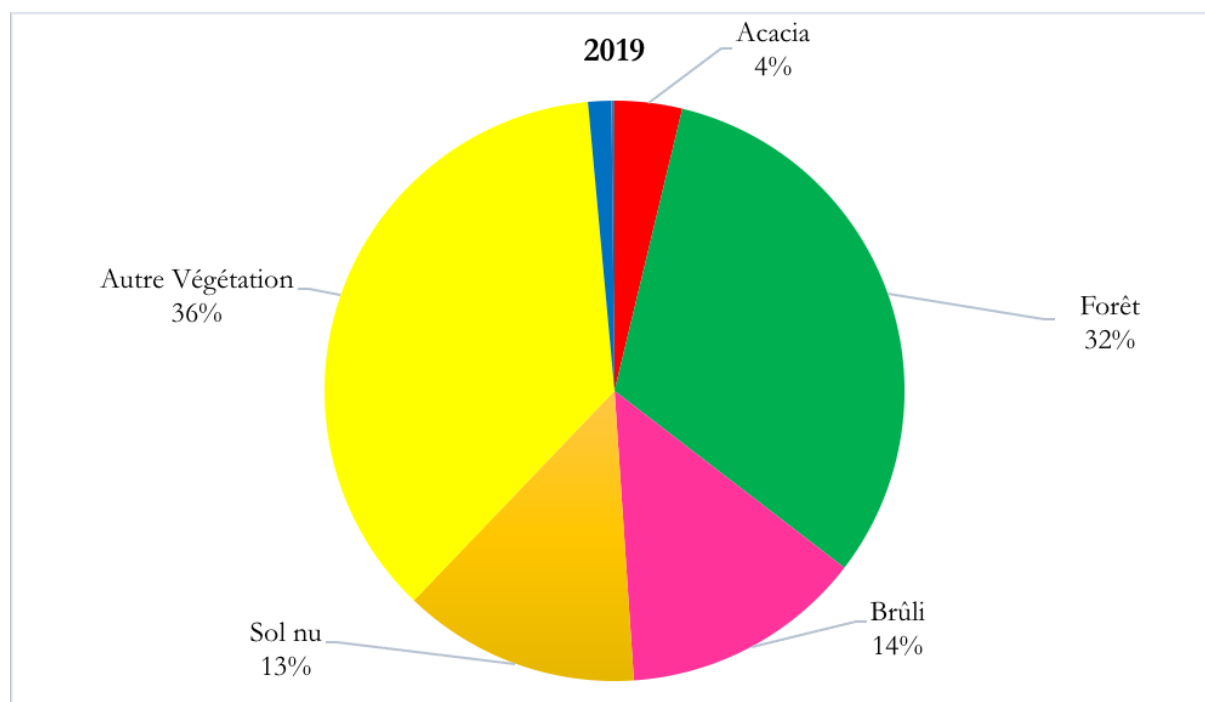


Figure 7 : Répartition des occupations de sol en 2019

En 2021, on observe une augmentation des plantations d'acacia (7%), couvrant désormais une superficie de 21463 hectares (Figure 9), ainsi que des surfaces forestières (35%) et des sols nus (16%). La surface des autres végétations a diminué (28%). Les zones brûlées sont restées plus ou moins constantes (13%) comparé à l'année 2019 (Figure 8 ; Figure 12).

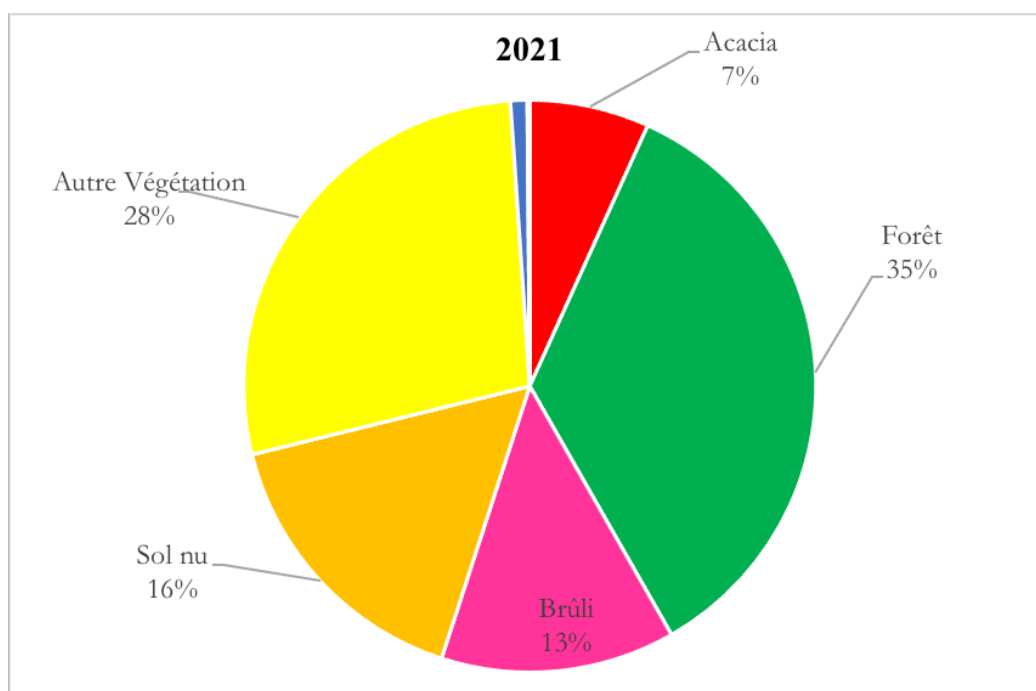


Figure 8 : Répartition des occupations de sol en 2021

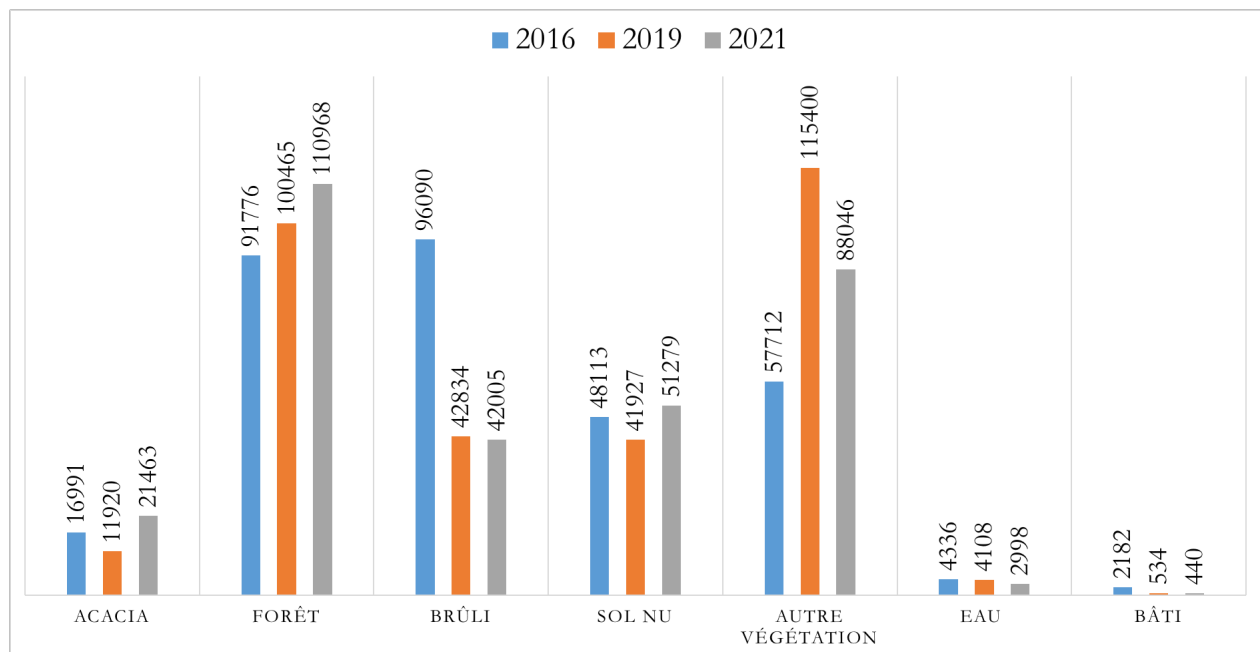


Figure 9 : Superficies des différentes occupations de sol.

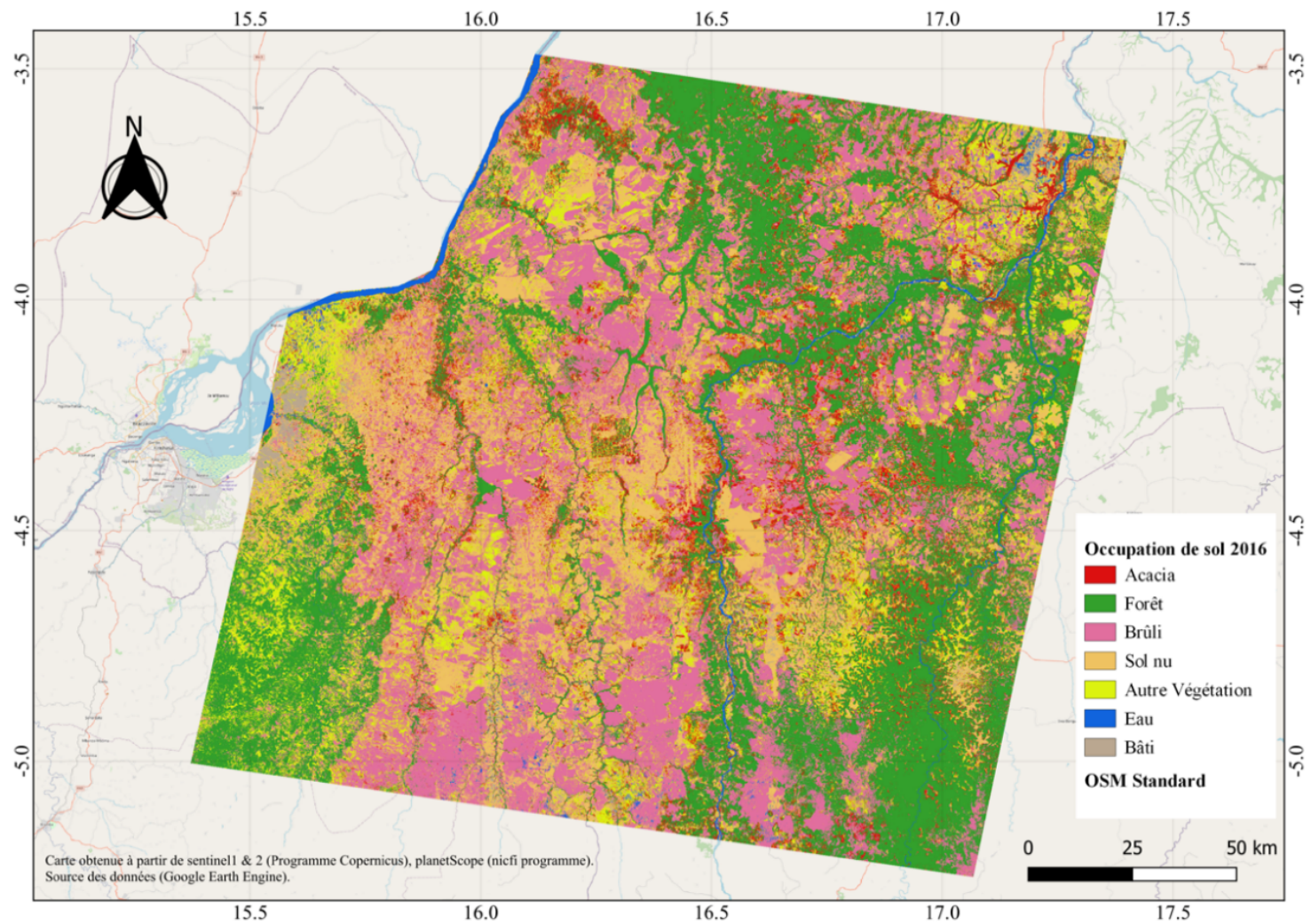


Figure 10 : Carte de d'occupation de sol en 2016 (Koffi, 2023).

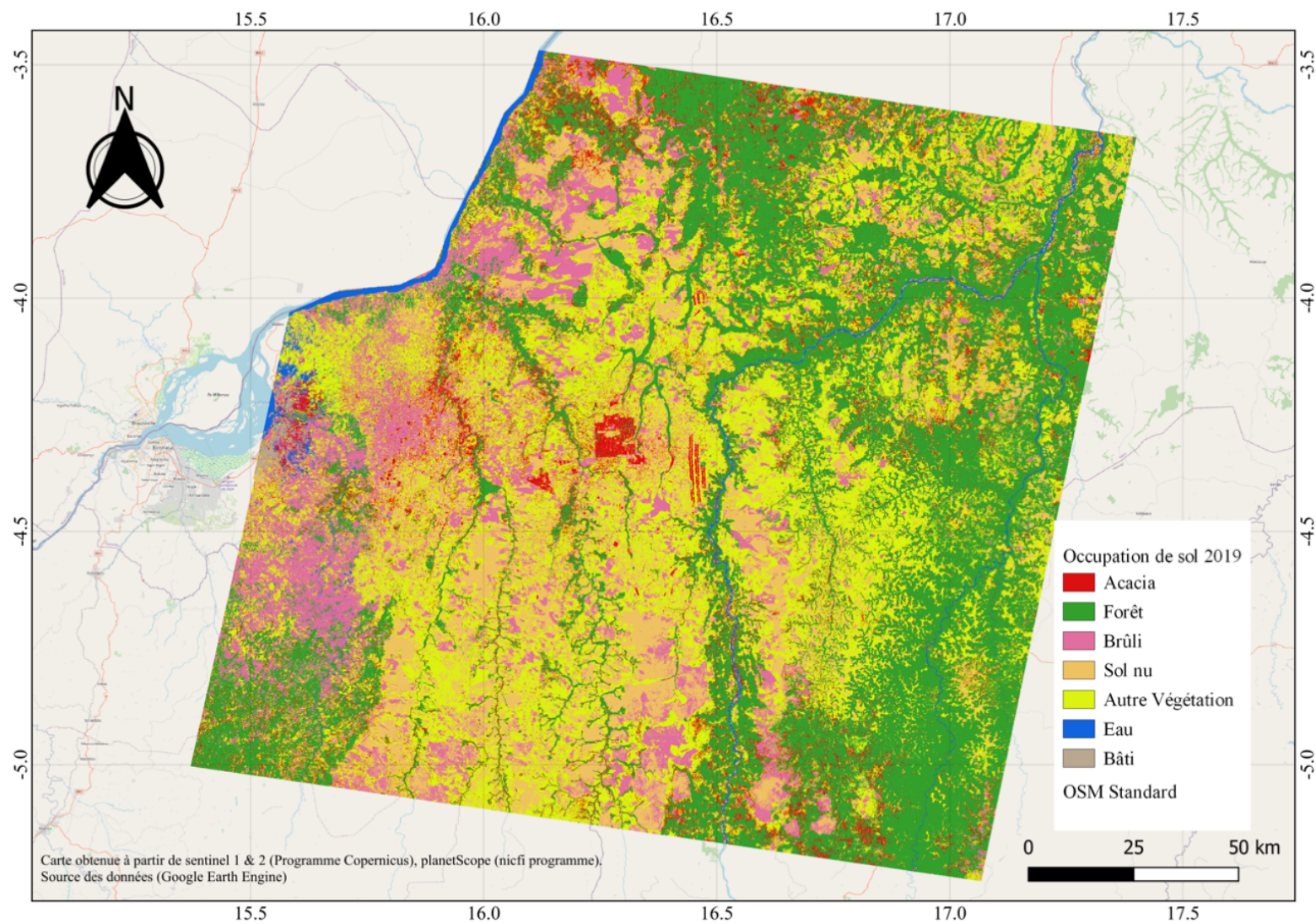


Figure 11 : Carte d'occupation de sol en 2019 (Koffi, 2023)

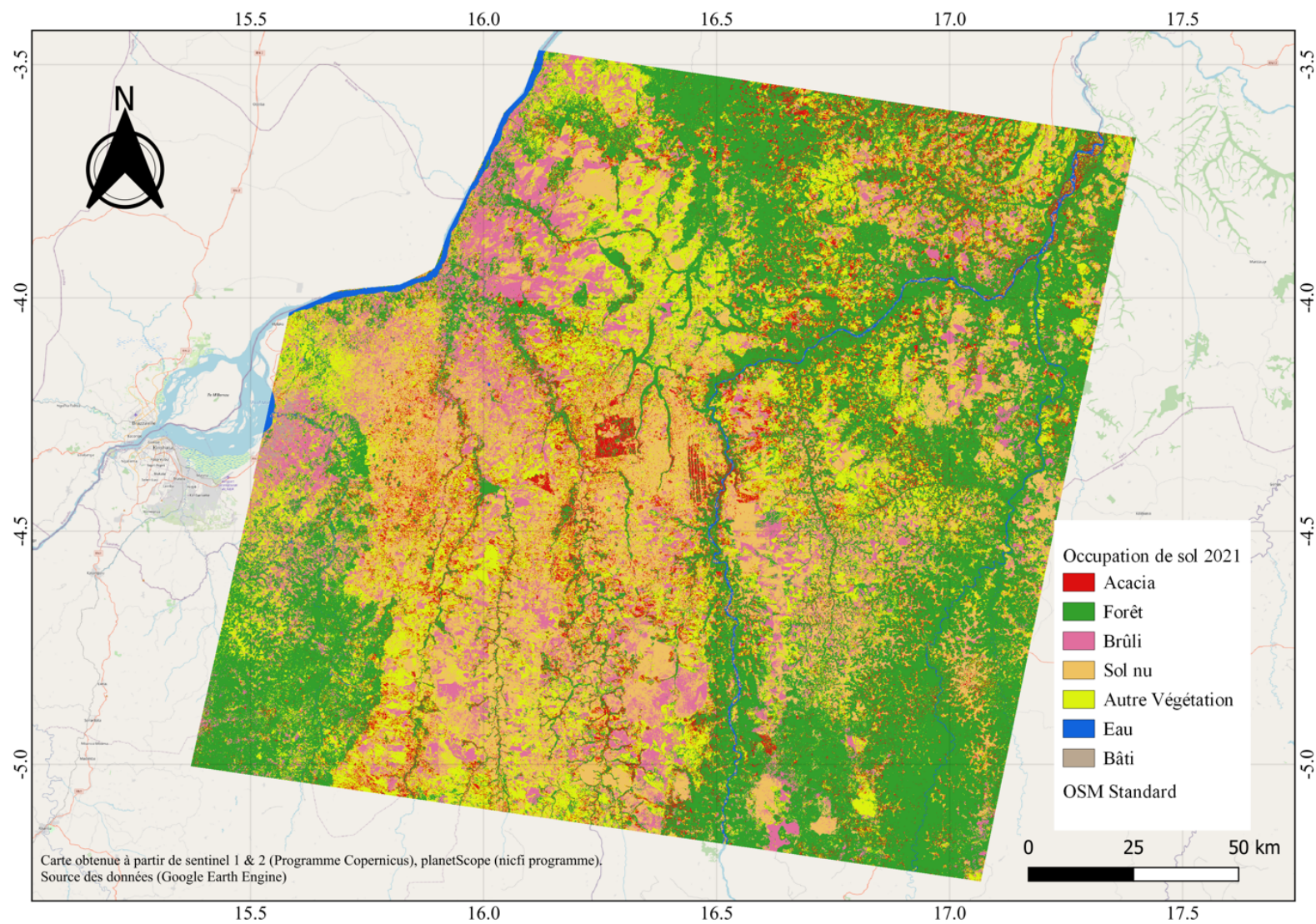


Figure 12 : Carte d'occupation de sol en 2021 (Koffi, 2023).

3.4. Suivi des plantations d'acacia

A partir de ces cartes nous pouvons produire des statistiques de suivi des plantations des projets Makala et PGAPF.

3.4.1. Suivi des plantations du projet Makala

L'analyse du (Tableau 5) met en évidence qu'en 2016, il y a eu une perte significative des plantations d'acacia, ainsi qu'un impact considérable des incendies sur ces dernières. Parmi les 35 parcelles échantillonnées, neuf plantations ont complètement disparu, ce qui représente 26 % de l'échantillon total. De plus, 17 plantations, soit 49 %, ont vu leur superficie réduite de moitié, et 28 plantations, soit 80 %, ont été touchées par le feu (Tableau 5).

En 2019, le nombre de plantations disparues a augmenté, passant de neuf à 20, ce qui représente une augmentation de 57 %. Seules deux plantations, soit six pourcents, ont été renouvelées. Des traces d'incendie sont visibles sur 17 parcelles, soit 49 % (Tableau 5).

En 2021, on recense 20 plantations perdues, ce qui équivaut à 57 %. Trois plantations, soit neuf pourcents, ont été renouvelées, tandis que 12 parcelles, soit 34 %, sont présentes mais dans un état dégradé. Environ 21 parcelles, soit 60 %, ont été touchées par le feu (Tableau 5).

Finalement, entre les années de plantations et l'année 2021 (dernière année de suivi), seul une plantation a été entièrement renouvelée soit 3%. Vingt plantations ont totalement disparu soit 57% de notre échantillon et 40% des plantation (14) sont dégradées dont la moitié ont un taux de perte de surface supérieur à 50%.

Tableau 5 : Récapitulatif des données du projet Makala

		Surface Parcelle (ha)				Taux de perte (%)				Surface brûlée (ha)		
Id	AP	Ai	2016	2019	2021	Ai-2016	2016-2019	2019-2021	Ai-2021	2016	2019	2021
1	A2011	3,28	2,41	2,51	2,51	-27%	4%	0%	-23%	0,00	0,00	0,40
2	03_2010	2,10	1,50	0,00	0,00	-29%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,75	0,66
3	03_2011	0,74	0,65	0,00	0,00	-12%	-100%	-100%	-100%	0,03	0,69	0,69
4	03_2011	0,44	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,16	0,44	0,34
5	03_2011	2,78	0,74	0,00	0,00	-73%	-100%	-100%	-100%	0,32	0,00	1,18
6	03_2011	1,67	0,80	0,00	0,00	-52%	-100%	-100%	-100%	0,04	0,20	0,50
7	03_2010	0,60	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,28	0,14	0,20
8	03_2011	1,34	0,66	0,00	0,00	-50%	-100%	-100%	-100%	0,12	0,00	0,49
9	03_2012	3,41	0,04	0,00	0,00	-99%	-100%	-100%	-100%	2,82	0,00	1,74
10	03_2012	3,74	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,19	0,66
11	03_2010	0,35	0,02	0,00	0,00	-94%	-100%	-100%	-100%	0,08	0,01	0,10
12	03_2011	1,20	1,20	0,00	0,00	0%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,04	1,00
13	03_2011	1,05	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,26	0,71
14	01_2011	0,49	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,43	0,34
15	03_2013	1,07	0,30	0,44	0,44	-72%	46%	0%	-59%	0,36	0,01	0,00
16	03_2013	0,65	0,26	0,12	0,12	-60%	-53%	0%	-81%	0,16	0,00	0,00
17	03_2013	0,39	0,19	0,26	0,26	-52%	38%	0%	-34%	0,05	0,00	0,00
18	03_2013	0,94	0,33	0,67	0,67	-65%	106%	0%	-28%	0,20	0,00	0,00
19	03_2013	0,66	0,01	0,23	0,23	-98%	1761%	0%	-66%	0,31	0,00	0,00
20	03_2013	1,43	0,47	1,11	1,11	-67%	135%	0%	-23%	0,29	0,00	0,00
21	03_2013	0,27	0,00	0,18	0,18	-100%	-100%	0%	-34%	0,00	0,00	0,00
22	03_2012	0,83	0,00	0,01	0,01	-99%	38%	0%	-99%	0,71	0,09	0,12
23	03_2012	0,59	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,53	0,50	0,27
24	02_2013	0,65	0,49	0,04	0,04	-25%	-91%	0%	-93%	0,12	0,01	0,00
25	02_2013	0,33	0,02	0,04	0,04	-93%	65%	0%	-89%	0,07	0,00	0,00
26	03_2013	1,74	0,02	0,00	0,00	-99%	-100%	-100%	-100%	0,60	0,00	0,56
27	03_2013	3,19	3,01	0,00	0,00	-6%	-100%	-100%	-100%	0,07	0,44	1,65
28	03_2013	1,78	1,21	0,00	0,00	-32%	-100%	-100%	-100%	0,48	0,04	0,00
29	B2012	1,69	0,80	0,60	0,60	-52%	-25%	0%	-65%	0,11	0,00	0,08
30	03_2012	0,62	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,40	0,00	0,30
31	03_2012	0,84	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,26	0,07	0,38
32	03_2012	0,72	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,27	0,00	0,00
33	03_2010	8,81	0,68	8,55	8,55	-92%	1154%	0%	-3%	0,03	0,00	0,00
34	03_2010	7,04	7,00	6,70	6,70	-1%	-4%	0%	-5%	0,04	0,00	0,00
35	03_2010	2,78	0,60	2,78	2,78	-78%	364%	0%	0%	1,07	0,00	0,00

3.4.3 Suivi des plantations du PGAPF

Il est important de noter que le deuxième ensemble de polygones utilisé dans cette étude provient du projet de la Banque mondiale (PGAPF) et concerne des plantations établies entre 2017 et 2018. En conséquence, les analyses ont été réalisées en utilisant les cartes de l'année 2019 et celles de 2021.

La carte d'occupation du sol de 2019 révèle que parmi les 35 échantillons de plantations, trois d'entre elles, représentant environ neuf pour cent, n'ont pratiquement pas connu de perte de superficie. Pour 22 plantations, soit environ 63%, une réduction de superficie a été enregistrée. En outre, dix plantations, soit environ 29%, n'ont pas pu être détectées. De plus, sept plantations, soit environ 20%, présentent des signes d'incendie.

En 2021, six plantations ont disparu, ce qui représente environ 17%. En revanche, 18 plantations, soit environ 51 %, sont restées intactes par rapport à leur superficie initiale, tandis que 11 plantations, soit environ 31 %, sont toujours présentes mais dans un état dégradé. 20 plantations soit 57%, présentent des signes d'incendies.

L'analyse conjointe des deux années révèle que 17 plantations ayant enregistré une perte de superficie en 2019 sont redevenues intactes en 2021.

Entre les années de plantation et l'année 2021, 18 plantations sont intactes (51%), 6 plantations ont disparu (17%) et 11 plantations (31%) ont subi des pertes de superficies dont 18% avec une perte de superficie supérieur à 50%.

Tableau 6 : Récapitulatif des données du projet PGAPF

		Surface parcelle (ha)			Taux de perte (%)			Surface brûlée (ha)	
Id	AP	Ai	2019	2021	Ai- 2019	2019-2021	Ai-2021	2019	2021
1	B2018	43,78	39,33	43,78	-10%	11%	0%	0,00	0,00
2	B2018	26,68	21,68	26,68	-19%	23%	0%	0,00	0,02
3	B2018	25,27	0,00	25,27	-100%	0%	0%	0,00	0,00
4	A2018	21,68	4,29	10,54	-80%	146%	-51%	0,00	0,02
5	B2018	21,55	3,21	11,41	-85%	256%	-47%	0,55	1,50
6	B2018	18,32	6,27	17,47	-66%	178%	-5%	0,00	0,76
7	B2018	13,64	2,66	7,53	-81%	183%	-45%	0,00	0,27
8	A2017	13,15	6,11	9,43	-54%	54%	-28%	0,00	0,18
9	A2017	10,76	3,97	10,75	-63%	171%	0%	0,00	3,55
10	A2017	10,28	10,05	10,28	-2%	2%	0%	0,00	0,00
11	B2018	9,58	7,38	9,58	-23%	30%	0%	0,00	0,09
12	A2018	9,55	8,63	9,55	-10%	11%	0%	0,00	0,00
13	B2018	9,53	0,22	0,00	-98%	-100%	-100%	0,25	0,22
14	A2017	9,26	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	0,02	3,71
15	B2018	9,00	4,38	9,00	-51%	105%	0%	0,00	0,98
16	A2017	8,60	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	4,02	2,52
17	A2017	8,06	0,02	0,00	-100%	-100%	-100%	1,54	1,61
18	B2018	7,82	5,70	6,82	-27%	20%	-13%	0,00	0,00
19	B2018	7,01	2,46	7,01	-65%	185%	0%	0,00	0,00
20	A2017	6,91	3,70	5,82	-46%	57%	-16%	0,00	0,00
21	B2018	6,20	2,52	6,18	-59%	145%	0%	0,00	0,52
22	A2017	4,95	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	0,00	2,93
23	A2017	4,83	0,00	0,09	-100%	0%	-98%	0,03	1,99
24	B2018	4,63	2,29	4,56	-50%	99%	-2%	0,00	0,08
25	A2017	4,46	0,09	4,46	-98%	4900%	0%	0,00	2,47
26	A2017	4,20	1,34	4,20	-68%	213%	0%	0,00	0,00
27	A2018	4,17	3,62	4,17	-13%	15%	0%	0,00	0,02
28	A2017	4,07	0,00	4,06	-100%	0%	0%	0,02	2,21
29	B2018	3,72	3,69	3,72	-1%	1%	0%	0,00	0,00
30	B2018	3,53	0,71	0,00	-80%	-100%	-100%	0,00	0,27
31	A2017	2,96	0,00	2,96	-100%	0%	0%	0,00	1,78
32	A2017	2,83	2,66	2,72	-6%	2%	-4%	0,00	0,00
33	A2017	2,77	2,60	2,67	-6%	2%	-4%	0,00	0,00
34	A2017	2,46	1,05	2,46	-57%	135%	0%	0,00	0,50
35	B2018	1,44	1,41	1,44	-2%	2%	0%	0,00	0,00

4. Discussion

4.1. Occupation de sol

La méthode finalement retenue dans cette étude est le suivi à partir des cartes d'occupation de sol annuelles de 2016, 2019, 2021. L'occupation des terres revêt une importance cruciale pour la planification à l'échelle régionale ainsi que pour la compréhension environnementale (Foody, 2002). Plus spécifiquement, ces cartes sont plus fiables et elles permettent d'analyser l'évolution de l'occupation des plantations d'acacia sur le plateau Batéké et de discuter de l'impact des projets de développement et des contraintes potentielles.

L'utilisation d'images Sentinel-2 s'est avérée plus informative et précise grâce à leur haute résolution spatiale et temporelle. L'importance des séries temporelles dans la classification des occupations du sol a été mise en avant dans cette étude. Les résultats ont montré des différences significatives de précision globale (0,73 à 0,88) et d'indice kappa (0,65 à 0,85) entre la classification basée sur le composite Sentinel-2 de la période sèche et les composites mensuels. Cette constatation est en ligne avec les travaux de (Njutapvou et *al.*, 2021), qui ont démontré l'amélioration de la précision de la classification grâce à l'utilisation de séries d'images Sentinel-2 associées à des indices de végétation. Les images Sentinel-1, bien que généralement moins précises que les images optiques, ont été utilisées en combinaison avec les images optiques pour améliorer la précision des classifications d'occupation du sol, comme l'a suggéré (Kwarteng et *al.*, 2008) et a été confirmé dans cette étude.

En outre, cette étude a testé une combinaison entre les données optiques (Sentinel-2, planetScope) et radar (Sentinel-1). Les résultats de cette classification ont montré une précision avoisinant les 91 %, soulignant l'efficacité de cette fusion. La valeur de kappa obtenue (0,87) indique une concordance substantielle entre les classifications obtenues et les classes réelles, au-dessus à l'échelle de classification proposée par Landis et Koch, (1977). La précision de la classe "acacia" à 92 % démontre la capacité du modèle à identifier avec fiabilité les zones de plantations d'acacia, un élément central dans cette étude.

Les confusions observées entre les différentes classes pourraient être dues à la surface de certaines plantations ainsi qu'à l'hétérogénéité observée dans certaines parcelles. Notons que certaines plantations ont des surfaces inférieures à 0,5 ha. Les ressemblances entre les acacias et les lisières de forêt, toutes deux marquées par des structures fragmentées, pourraient expliquer ces confusions. Ces constatations sont cohérentes avec les travaux de Smith et *al.*, (2003), qui a souligné l'impact de la taille des taches et de l'hétérogénéité sur la précision de la classification. Des études antérieures,

telles que celles d'O'Neill et *al.*, (1996) et de Ju et *al.*, (2003), ont également confirmé que la résolution spatiale et l'hétérogénéité des parcelles jouent un rôle crucial dans la précision des classifications.

Cependant, des défis persistent dans la classification. Une confusion notable a été constatée entre la classe de sol nu et la classe des bâtiments, malgré l'intégration d'indices de brillance et de structure. Cette situation pourrait être expliquée par la petite taille des bâtiments, comme évoqué dans les considérations antérieures sur la contribution de la taille des taches à la précision des classifications. Une autre raison possible de cette confusion pourrait être l'échelle de l'entraînement du modèle de classification. En raison des contraintes de calcul sur la plateforme GEE, le modèle a été calibré à une résolution spatiale de 15 mètres. Cette échelle réduite aurait pu entraîner une perte d'informations importantes dans le processus.

La superficie occupée par les plantations d'acacia dans la région a connu une évolution au fil du temps. Elle s'élevait à 16 991 hectares en 2016, puis est passée à 11 919 hectares en 2019 avant de revenir à 21 463 hectares en 2021. En jaune dans le (Tableau 7) qui présente les données du projet PGAPF installée en 2017 et 2018, nous pouvons constater que certains acacias n'ont pas été détectés en 2019, mais qu'ils ont été retrouvés intacts en 2021. Cette observation pourrait expliquer les différences de superficie observée en 2019, suggérant ainsi que le modèle de classification n'a pas réussi à détecter les jeunes acacias âgés de 1 à 2 ans. Cependant, cette perte de superficie peut également s'expliquer par l'exploitation des plantations ou la dégradation de ces dernières par le feu. De plus, la carte de 2016 montre une confusion importante entre les acacias et les zones forestières. Il est important de rappeler que les images utilisées pour créer cette carte ont été corrigées avec SIAC, ce qui pourrait expliquer les confusions observées et, par conséquent, les variations de surface. Ces confusions s'observent dans le massif agroforestier de Mampu où nous sommes certains que cet ensemble est constituée seulement de plantation d'acacia.

Cependant, il convient de noter que les estimations actuelles de la superficie occupée par les acacias sont bien en deçà de la superficie théorique estimée à 35 000 hectares. Cette disparité pourrait s'expliquer par un impact significatif des incendies sur les plantations ou par un manque de renouvellement des plantations après leur première exploitation.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des interprétations des résultats du projet PGAPF

Id	AP	Surface parcelle (ha)			Taux de perte (%)			Surface brûlée (ha)	
		Ai	2019	2021	Ai- 2019	2019-2021	Ai-2021	2019	2021
1	B2018	43,78	39,33	43,78	-10%	11%	0%	0,00	0,00
2	B2018	26,68	21,68	26,68	-19%	23%	0%	0,00	0,02
3	B2018	25,27	0,00	25,27	-100%	0%	0%	0,00	0,00
4	A2018	21,68	4,29	10,54	-80%	146%	-51%	0,00	0,02
5	B2018	21,55	3,21	11,41	-85%	256%	-47%	0,55	1,50
6	B2018	18,32	6,27	17,47	-66%	178%	-5%	0,00	0,76
7	B2018	13,64	2,66	7,53	-81%	183%	-45%	0,00	0,27
8	A2017	13,15	6,11	9,43	-54%	54%	-28%	0,00	0,18
9	A2017	10,76	3,97	10,75	-63%	171%	0%	0,00	3,55
10	A2017	10,28	10,05	10,28	-2%	2%	0%	0,00	0,00
11	B2018	9,58	7,38	9,58	-23%	30%	0%	0,00	0,09
12	A2018	9,55	8,63	9,55	-10%	11%	0%	0,00	0,00
13	B2018	9,53	0,22	0,00	-98%	-100%	-100%	0,25	0,22
14	A2017	9,26	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	0,02	3,71
15	B2018	9,00	4,38	9,00	-51%	105%	0%	0,00	0,98
16	A2017	8,60	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	4,02	2,52
17	A2017	8,06	0,02	0,00	-100%	-100%	-100%	1,54	1,61
18	B2018	7,82	5,70	6,82	-27%	20%	-13%	0,00	0,00
19	B2018	7,01	2,46	7,01	-65%	185%	0%	0,00	0,00
20	A2017	6,91	3,70	5,82	-46%	57%	-16%	0,00	0,00
21	B2018	6,20	2,52	6,18	-59%	145%	0%	0,00	0,52
22	A2017	4,95	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	0,00	2,93
23	A2017	4,83	0,00	0,09	-100%	0%	-98%	0,03	1,99
24	B2018	4,63	2,29	4,56	-50%	99%	-2%	0,00	0,08
25	A2017	4,46	0,09	4,46	-98%	4900%	0%	0,00	2,47
26	A2017	4,20	1,34	4,20	-68%	213%	0%	0,00	0,00
27	A2018	4,17	3,62	4,17	-13%	15%	0%	0,00	0,02
28	A2017	4,07	0,00	4,06	-100%	0%	0%	0,02	2,21
29	B2018	3,72	3,69	3,72	-1%	1%	0%	0,00	0,00
30	B2018	3,53	0,71	0,00	-80%	-100%	-100%	0,00	0,27
31	A2017	2,96	0,00	2,96	-100%	0%	0%	0,00	1,78
32	A2017	2,83	2,66	2,72	-6%	2%	-4%	0,00	0,00
33	A2017	2,77	2,60	2,67	-6%	2%	-4%	0,00	0,00
34	A2017	2,46	1,05	2,46	-57%	135%	0%	0,00	0,50
35	B2018	1,44	1,41	1,44	-2%	2%	0%	0,00	0,00

	Surface initiale détectée en 2021 mais pas en 2019
	Parcelle brûlée entre 2019 et 2021
	Parcelle intacte

4.2. Suivi des plantations et impact des feux

La surveillance des plantations d'acacia revêt une importance cruciale en raison de leur rôle essentiel dans l'atténuation des changements climatiques par le stockage du carbone, la réduction de la pression sur les forêts naturelles et la satisfaction des besoins des populations rurales (Reyniers, 2019). Néanmoins, la durabilité et la diffusion du système agroforestier à base d'acacia sont discutées. Selon Proce et *al.*, (2017), malgré les efforts de plusieurs années pour accompagner les agriculteurs dans l'adoption des itinéraires techniques recommandés, une forte disparité des plantations persiste, mettant en évidence un manque de maîtrise de ces itinéraires techniques, ce qui impacte nécessairement la productivité du système. Les résultats de cette étude ont mis en évidence une perte considérable des plantations d'acacia (57% pour le projet Makala et 17% pour le projet PGAPF) et un renouvellement total des surfaces exploitées très faible (3% pour le projet

Makala). L'entretien des plantations est souvent négligé par les agriculteurs, en particulier dans les régions où les ressources en bois sont abondantes, ou encore lorsque le recours au système agroforestier à base d'acacia n'est envisagé par les paysans que s'ils ont un accès limité aux ressources forestières (Reyniers, 2019). Ces observations associées à la gestion des feux sur les zones de savanes pourraient expliquer la perte des plantations et potentiellement la non-application des itinéraires techniques recommandés visant à assurer le renouvellement des plantations.

Selon le guide technique de Boldrini et *al.*, (2017) les plantations d'acacia se montrent très vulnérables aux incendies, nécessitant des mesures rigoureuses de protection. Cela est confirmé par notre étude qui a révélé un impact significatif des incendies sur les plantations d'acacia (80% en 2016, 49% en 2019, 60% en 2021 pour le projet Makala et 20% en 2019 et 57% en 2021 pour le projet PGAPF), contribuant grandement aux pertes dans la zone d'approvisionnement en bois énergie de Kinshasa. D'autres paramètres, tels que les changements climatiques qui accentuent les risques d'incendie (Konko et *al.*, 2021), pourraient également jouer un rôle dans l'augmentation des incendies dans la région.

L'exploitation des plantations, entre 7 et 8 ans (Bisiaux et *al.*, 2009; Proce et *al.*, 2017), et leur renouvellement peut remettre en question nos conclusions. Les cartes que nous avons générées pour cette étude couvrent la période allant de 2016 à 2021 en raison de la qualité des données disponibles. Bien que ces cartes ne couvrent pas la période de rotation théorique recommandée, elles fournissent néanmoins des informations précieuses sur l'état de santé des plantations dans le bassin d'approvisionnement de Kinshasa. Elles nous offrent également des indications sur le renouvellement de certaines plantations qui ont été exploitées prématurément ou qui ont été affectées par des incendies avant la phase d'exploitation prévue.

Diverses hypothèses ont été élaborées à partir de nos résultats pour le projet Makala, comme résumé dans le (Tableau 8). Cependant, les résultats ne nous permettent pas de déterminer avec précision si les parcelles perdues ont été exploitées ou incendiées, ce qui est le cas des parcelles en rouge. Pour certaines parcelles, plusieurs hypothèses sont envisagées, notamment : la non-exploitation ou des problèmes liés à la télédétection, ou bien qu'elles aient été exploitées et renouvelées, ce qui s'applique aux parcelles en vert. D'autres hypothèses incluent des erreurs de classification, l'occurrence de nouvelles plantations ou la régénération des graines d'acacia présentes dans le sol à la suite d'un incendie, ce qui concerne les parcelles en orange.

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des interprétations des résultats du projet Makala

Id	AP	Surface Parcelle (ha)				Taux de perte (%)				Surface brûlée (ha)		
		Ai	2016	2019	2021	Ai-2016	2016-2019	2019-2021	Ai-2021	2016	2019	2021
1	A2011	3,28	2,41	2,51	2,51	-27%	4%	0%	-23%	0,00	0,00	0,40
2	03 2010	2,10	1,50	0,00	0,00	-29%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,75	0,66
3	03 2011	0,74	0,65	0,00	0,00	-12%	-100%	-100%	-100%	0,03	0,69	0,69
4	03 2011	0,44	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,16	0,44	0,34
5	03 2011	2,78	0,74	0,00	0,00	-73%	-100%	-100%	-100%	0,32	0,00	1,18
6	03 2011	1,67	0,80	0,00	0,00	-52%	-100%	-100%	-100%	0,04	0,20	0,50
7	03 2010	0,60	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,28	0,14	0,20
8	03 2011	1,34	0,66	0,00	0,00	-50%	-100%	-100%	-100%	0,12	0,00	0,49
9	03 2012	3,41	0,04	0,00	0,00	-99%	-100%	-100%	-100%	2,82	0,00	1,74
10	03 2012	3,74	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,19	0,66
11	03 2010	0,35	0,02	0,00	0,00	-94%	-100%	-100%	-100%	0,08	0,01	0,10
12	03 2011	1,20	1,20	0,00	0,00	0%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,04	1,00
13	03 2011	1,05	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,26	0,71
14	01 2011	0,49	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,00	0,43	0,34
15	03 2013	1,07	0,30	0,44	0,44	-72%	46%	0%	-59%	0,36	0,01	0,00
16	03 2013	0,65	0,26	0,12	0,12	-60%	-53%	0%	-81%	0,16	0,00	0,00
17	03 2013	0,39	0,19	0,26	0,26	-52%	38%	0%	-34%	0,05	0,00	0,00
18	03 2013	0,94	0,33	0,67	0,67	-65%	106%	0%	-28%	0,20	0,00	0,00
19	03 2013	0,66	0,01	0,23	0,23	-98%	1761%	0%	-66%	0,31	0,00	0,00
20	03 2013	1,43	0,47	1,11	1,11	-67%	135%	0%	-23%	0,29	0,00	0,00
21	03 2013	0,27	0,00	0,18	0,18	-100%	-100%	0%	-34%	0,00	0,00	0,00
22	03 2012	0,83	0,00	0,01	0,01	-99%	38%	0%	-99%	0,71	0,09	0,12
23	03 2012	0,59	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,53	0,50	0,27
24	02 2013	0,65	0,49	0,04	0,04	-25%	-91%	0%	-93%	0,12	0,01	0,00
25	02 2013	0,33	0,02	0,04	0,04	-93%	65%	0%	-89%	0,07	0,00	0,00
26	03 2013	1,74	0,02	0,00	0,00	-99%	-100%	-100%	-100%	0,60	0,00	0,56
27	03 2013	3,19	3,01	0,00	0,00	-6%	-100%	-100%	-100%	0,07	0,44	1,65
28	03 2013	1,78	1,21	0,00	0,00	-32%	-100%	-100%	-100%	0,48	0,04	0,00
29	B2012	1,69	0,80	0,60	0,60	-52%	-25%	0%	-65%	0,11	0,00	0,08
30	03 2012	0,62	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,40	0,00	0,30
31	03 2012	0,84	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,26	0,07	0,38
32	03 2012	0,72	0,00	0,00	0,00	-100%	-100%	-100%	-100%	0,27	0,00	0,00
33	03 2010	8,81	0,68	8,55	8,55	-92%	1154%	0%	-3%	0,03	0,00	0,00
34	03 2010	7,04	7,00	6,70	6,70	-1%	-4%	0%	-5%	0,04	0,00	0,00
35	03 2010	2,78	0,60	2,78	2,78	-78%	364%	0%	0%	1,07	0,00	0,00

	Parcelle exploitée ou brûlé
	i) soit elles n'ont pas été exploitées (erreur de classification en 2016), ii) soit exploité et renouvelé
	Perte définitive
	Parcelle intacte
	i) Erreur de classification en 2016, ii) nouvelle plantation, iii) régénération des graines d'acacia contenues dans le sol suite au passage du feu

4.3. Limites des autres tests

Les résultats obtenus de nos tests ont rencontré divers obstacles. Le principal de ces obstacles était la présence fréquente de nuages dans la zone étudiée. Selon des références antérieures Denis et Defourny, (2021); Obrecht, (1990), la présence de nuages a un impact négatif sur la qualité des images ainsi que sur la précision des analyses. Dans le cadre de cette étude, cette contrainte a limité notre capacité à obtenir des données nettes et continues sur une période spécifique et a aussi empêché d'obtenir des cartes annuelles en 2017, 2018, 2020, 2022. Cependant, nous avons obtenu une carte avec un taux de discrimination de l'acacia de plus de 90 %

Concernant les produits de télédétection globaux, les données fournies par la plateforme GFC ont divergé de nos observations issues de la photo-interprétation. Ces données ont utilisé des images Landsat et ne sont pas calibré sur notre zone d'étude. Cette divergence soulève des questions quant à la précision de ces produits globaux. Certaines recherches Mitterpergher et *al.*, (2023) ont

démontré l'efficacité de ces données pour des études à grande échelle, mais des limitations peuvent survenir lorsqu'il s'agit d'études à une échelle plus locale. Il est donc crucial de comprendre en détail les méthodes de collecte et d'analyse utilisées par ces auteurs et de prendre en compte les éventuels biais ou limitations.

Le suivi temporel du NDVI pour détecter la déforestation est une méthode couramment utilisée en télédétection (Lecerf et *al.*, 2005). Cependant, dans cette étude, la difficulté d'une faible différenciation du NDVI entre les classes "acacia" et "autres végétations" a compliqué la détection des baisses du NDVI, qui pourraient indiquer une activité d'exploitation. Étant donné la temporalité des images collectées, qui a été grandement affectée par la présence fréquente de nuages conduisant à des périodes sans images disponibles, les changements brusques sont difficiles à discerner.

Les images Sentinel-1 ont été largement utilisées pour étudier les zones tropicales en raison de la couverture nuageuse élevée dans ces régions (Ballere, 2021; Denis et Defourny, 2021). La bande VV, caractérisée par une polarisation verticale, s'est révélée pertinente pour détecter les déforestations (Talab Ou Ali et *al.*, 2017). La même source a révélé l'apport de la bande VH ou même encore le quotient des deux bandes pour le suivi de la végétation. Néanmoins, les résultats de notre test n'ont pas permis d'aboutir à une conclusion satisfaisante pour le suivi temporel. Des études antérieures (Kemavo, 2018) ont montré que le suivi temporel permettait de distinguer les zones déforestées grâce à une chute de la radiométrie. Cependant, ces études ont également mentionné l'instabilité du signal avant et après cette chute de radiométrie. Cette instabilité s'est avérée inopportune pour détecter les renouvellements ou suivre les divers changements d'occupation du sol dans nos parcelles. Cela nécessite des études encore plus approfondies pour comprendre cette instabilité et affiner l'analyse avec le radar.

Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de suivre l'évolution des plantations d'acacia initiées par deux projets majeurs d'afforestation dans le bassin d'approvisionnement en bois-énergie de Kinshasa : le projet Makala et le projet PGAPF. De plus, elle a souligné l'importance des outils de télédétection pour surveiller les écosystèmes à grande échelle, offrant des gains significatifs en termes de temps et de ressources financières. En effet, l'utilisation de l'imagerie satellitaire permet de détecter les plantations d'acacia de manière efficace. Notre étude a démontré la possibilité de cartographier les plantations d'acacia avec l'utilisation de plusieurs capteurs satellitaires (Sentinel-1, Sentinel-2, PlanetScope) gratuites en utilisant l'approche d'apprentissage automatique Random Forest. Les résultats obtenus ont été particulièrement satisfaisants, avec une précision globale atteignant près de 91%, un indice de kappa de 0,87 et une bonne précision de 92 % pour la catégorie "acacia".

En se basant sur les analyses effectuées sur nos échantillons de plantations, nous en sommes arrivés à la conclusion que l'état de santé des plantations d'acacia dans le bassin d'approvisionnement est préoccupant. Ces plantations se montrent vulnérables aux incendies, entraînant une perte significative de plantations et un taux de renouvellement particulièrement faible faute d'encadrement technique pour assurer le renouvellement des plantations. Les interrogations concernant l'efficacité de l'itinéraire technique recommandé pour le système agroforestier dans cette zone ainsi que la qualité de l'entretien des plantations nécessitent davantage d'approfondissement. Il est également important de noter que les plantations du projet Makala semblent davantage affectées par les incendies, entraînant une disparition notable, en comparaison à celles du projet de la Banque mondiale.

Bien que les résultats obtenus dans cette étude soient prometteurs, il est important de noter certaines limitations qui méritent d'être mentionnées.

Une approche intéressante consisterait à développer un modèle de classification supervisée basé sur les pixels, en utilisant des méthodes de traitement en local pour contourner les contraintes liées aux espaces de calcul rencontrés dans cette étude, permettant ainsi de réaliser les analyses à une résolution de 10 mètres. Par ailleurs, il serait pertinent d'explorer également des approches de classification supervisée orientées objet avec des indices de texture, même si ce type d'approche est généralement plus adapté à des images de très haute résolution.

Les résultats obtenus ont suscité des réflexions autour d'une approche de classification basée sur l'apprentissage profond (réseau de neurones convolutifs). Les premiers tests réalisés dans ce sens

sont également prometteurs et sont en cours d'amélioration et feront l'objet de futures communications.

En ce qui concerne le suivi des plantations, il serait intéressant de reproduire les mêmes analyses dans quelques années, couvrant ainsi au moins deux cycles de renouvellement des plantations. Une telle approche permettrait d'obtenir des conclusions plus solides et plus détaillées sur le taux de renouvellement des plantations au fil du temps. Toutefois, ces premiers résultats permettent d'évaluer l'impact des projets de développement sur la production de charbon de bois issue de plantation d'acacia.

Références Bibliographiques

- Adam, E., Mutanga, O., Rugege, D., 2010. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetl. Ecol. Manag.* 18, 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>
- Akodewou, A., Madi, O.P., Marquant, B., Peltier, R., 2022. Suivi de la dynamique de deux parcs à *Faidherbia albida* du Nord-Cameroun, par analyse d'images Google Earth. *BOIS FORETS Trop.* 353, 43–60. <https://doi.org/10.19182/bft2022.353.a36995>
- Ballere, M., 2021. Apport des données Sentinel-1 pour le suivi continu de la forêt tropicale : cas de la Guyane (phdthesis). Université Gustave Eiffel.
- Bannari, a., Huete, a.r., morin, d., Zagolski, f., 1996. Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. *Int. J. Remote Sens.* 17, 1885–1906. <https://doi.org/10.1080/01431169608948745>
- Bégué, A., Myneni, R., 1996. Operational relationships between NOAA-advanced very high resolution radiometer vegetation indices and daily fraction of absorbed photosynthetically active radiation, established for Sahelian vegetation canopies. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 101, 21275–21289. <https://doi.org/10.1029/96JD01621>
- Biloso Moyene, A., 2008. Valorisation des produits forestiers non ligneux des plateaux de Batéké en périphérie de Kinshasa (RD Congo).
- Bisiaux, F., Peltier, R., Muliele, J.-C., 2009. Plantations industrielles et agroforesterie au service des populations des plateaux Batéké, Mampu, en République Démocratique du Congo. *BOIS FORETS Trop.* 301, 21–32. <https://doi.org/10.19182/bft2009.301.a20404>
- Boldrini, S., Bracke, C., Daïnou, K., Vermeulen, C., Fétiveau, J., Ngoy Shutcha, M., Doucet, J.-L., 2017. Guide technique. Plantation agroforestière d'*Acacia auriculiformis* dans le Haut-Katanga.
- Boulogne, M., Pennec, A., Dubiez, E., Gigaud, M., Peroches, A., Lavialle, J., Rerolle, J., Proce, P., Peltier, R., Marien, J.-N., Gond, V., 2013. Evolution du couvert végétal et des stocks de carbone dans le bassin d'approvisionnement de kinshasa [WWW Document]. Quand Ville Mange For. Défis Bois-Énerg. En Afr. Cent. URL <https://agritrop.cirad.fr/569656/> (accessed 4.24.23).
- Cardall, A., Tanner, K., Williams, G., 2021. Google Earth Engine Tools for Long-Term Spatiotemporal Monitoring of Chlorophyll-a Concentrations. *Open Water J.* 7.
- Denis, A., Defourny, P., 2021. Suivi de la déforestation tropicale à l'aide des données SAR en bande C du satellite Sentinel-1A.
- Descals, A., Wich, S., Meijaard, E., Gaveau, D.L.A., Peedell, S., Szantoi, Z., 2021. High-resolution

- global map of smallholder and industrial closed-canopy oil palm plantations. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 1211–1231. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1211-2021>
- Dubiez, E., Freycon, V., Marien, J.-N., Peltier, R., Harmand, J.-M., 2019. Long term impact of *Acacia auriculiformis* woodlots growing in rotation with cassava and maize on the carbon and nutrient contents of savannah sandy soils in the humid tropics (Democratic Republic of Congo). *Agrofor. Syst.* 93, 1167–1178. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0222-x>
- Dubiez, E., Peroches, A., Akalakou Mayimba, C., Gazull, L., 2022. Rapport d'étude de la filière bois-énergie de la ville de Kinshasa.
- Foody, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 80, 185–201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- Gazull, L., Dubiez, E., Akalakou Mayimba, C., Peroches, A., 2020. Rapport d'étude de la consommation en énergies domestiques des ménages de la ville de Kinshasa.
- Gazull, L., Dubiez, E., Peltier, R., 2019. Etat des lieux de l'approvisionnement en bois-énergie de la ville de Bangui (RCA. Quantification des flux et organisation des filières.
- Gerken, M., Kasali, L., 1988. Yield of the *Acacia auriculiformis* stands on the Bateke Plateau, Zaire. *Tropicultura* 6, 171–175.
- Gigaud, M., 2012. Etat des jachères forestières du Plateau Batéké et, possibilité de les restaurer par Régénération Naturelle Assistée (RNA) Projet Makala, République Démocratique du Congo (PhD Thesis). Université d'Orléans.
- Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P., Wardlow, B., 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophys. Res. Lett.* 34. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Ju, J., Kolaczyk, E.D., Gopal, S., 2003. Gaussian mixture discriminant analysis and sub-pixel land cover characterization in remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 84, 550–560. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00172-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00172-4)
- Kachaka, E.Y., Poirier, V., Munson, A.D., Khasa, D.P., 2023. *Acacia auriculiformis* agroforestry fallows of different ages improve soil physico-chemical properties and carbon stocks on the Batéké plateau, Democratic Republic of Congo. *Geoderma Reg.* 34, e00691. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00691>
- Kemavo, A., 2018. Potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux: étude de cas au Togo, en République Démocratique du Congo, en Guyane française et en République Dominicaine (PhD Thesis). Université Paris-Est.
- Konko, Y., Afelu, B., Kokou, K., 2021. Potentialité des données satellitaires Sentinel-2 pour la

- cartographie de l'impact des feux de végétation en Afrique tropicale : application au Togo. *Bois For. Trop.* 347, 59–73. <https://doi.org/10.19182/bft2021.347.a36349>
- Kwarteng, A., Dobson, M., Kellndorfer, J., Williams, R., 2008. SAR-based land cover classification of Kuwait. *Int. J. Remote Sens. - INT J REMOTE SENS* 29, 6739–6778. <https://doi.org/10.1080/01431160802209097>
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. An Application of Hierarchical Kappa-type Statistics in the Assessment of Majority Agreement among Multiple Observers. *Biometrics* 33, 363–374. <https://doi.org/10.2307/2529786>
- Lecerf, R., Dubreuil, V., Hubert-Moy, L., 2005. Suivi de l'occupation hivernale des sols par teledetection basse resolution en paysage fragmente : comparaison de series temporelles de ndvi noaa/avhrr, spot/vegetation et eos/modis.
- Leturcq, P., 2010. Bois-énergie : une fausse “bonne solution” pour atténuer l'effet de serre. *For. Entrep.* 46–50.
- Madon, G., 2017. Le bois, énergie de première nécessité en Afrique. *Afr. Contemp.* 261262, 201–222.
- Marien, J.N., 2008. Forêts périurbaines et bois énergie : quels enjeux pour l'Afrique centrale 44?
- Marien, J.-N., Bertrand, A., Du Toit, B., Gautier, D., Gazull, L., Idowu, M., Kassambara, A., Mallet, B., Montagne, P., Nkoua, M., 2008. Rapport régional. Foresterie urbaine et périurbaine en Afrique. Quelles perspectives pour le bois énergie?
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G., 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest. *Sensors* 7, 2636–2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>
- Mitterpergher, D., Vergez, A., Puydarrieux, P., 2023. Commerce international et déforestation : méthode et calcul d'une empreinte déforestation des nations. *Rev. Déconomie Dév.* 33, 5–53.
- Nagendra, H., 2001. Using remote sensing to assess biodiversity. *Int. J. Remote Sens.* 22, 2377–2400. <https://doi.org/10.1080/01431160117096>
- Njutapvouï, N., Onguene, R., Rudant, J.P., 2021. Evaluation du potentiel des series d'images multi-temporelles optique et radar des satellites SENTINEL 1 & 2 pour le suivi d'une zone côtière en contexte tropical: cas de l'estuaire du Cameroun pour la période 2015-2020. *Rev. Fr. Photogrammétrie Télédétection* 223, 88–103. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2021.586>
- Obrecht, D., 1990. Météorologie solaire et images satellitaires : cartographie du rayonnement solaire, détermination de l'albédo des sols et évaluation de l'enneigement (phdthesis).

Université de Nice Sophia-Antipolis.

- O'Neill, R.V., Hunsaker, C.T., Timmins, S.P., Jackson, B.L., Jones, K.B., Riitters, K.H., Wickham, J.D., 1996. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale. *Landscape Ecol.* 11, 169–180. <https://doi.org/10.1007/BF02447515>
- Pettorelli, N., 2013. *The Normalized Difference Vegetation Index*. OUP Oxford.
- Proces, P., Dubiez, E., Bisiaux, F., Péroches, A., Fayolle, A., 2018. Production d'Acacia auriculiformis dans le système agroforestier de Mampu, plateau Batéké, République démocratique du Congo. *BOIS FORETS Trop.* 334, 23. <https://doi.org/10.19182/bft2017.334.a31489>
- Proces, P., Dubiez, E., Bisiaux, F., Peroches, A., Fayolle, A., 2017. Production d'Acacia auriculiformis dans le système agroforestier de Mampu, plateau Batéké, République démocratique du Congo. *Bois For. Trop.* <https://doi.org/10.19182/bft2017.334.a31489>
- Reiche, J., Mullissa, A., Slagter, B., Gou, Y., Tsendbazar, N.-E., Odongo-Braun, C., Vollrath, A., Weisse, M.J., Stolle, F., Pickens, A., Donchyts, G., Clinton, N., Gorelick, N., Herold, M., 2021. Forest disturbance alerts for the Congo Basin using Sentinel-1. *Environ. Res. Lett.* 16, 024005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd0a8>
- Remedio, E.M., 2002. Bois-énergie et modèles de subsistance: une étude de cas relative aux Philippines 53.
- Reyniers, C., 2019. Agroforesterie et déforestation en République démocratique du Congo. Miracle ou mirage environnemental ? *Mondes En Dév.* 187, 113–132. <https://doi.org/10.3917/med.187.0113>
- Roy, D.P., Boschetti, L., Trigg, S.N., 2006. Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 3, 112–116. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.858485>
- Sherjah, P.Y., Sajikumar, N., Nowshaja, P.T., 2023. Quality monitoring of inland water bodies using Google Earth Engine. *J. Hydroinformatics* 25, 432–450. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.137>
- Smith, J.H., Stehman, S.V., Wickham, J.D., Yang, L., 2003. Effects of landscape characteristics on land-cover class accuracy. *Remote Sens. Environ.* 84, 342–349. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00126-8)
- Talab Ou Ali, H., Niculescu, S., Sellin, V., Bougault, C., 2017. Contribution de la nouvelle série d'images Sentinel-1 pour le suivi de la végétation côtière dans le Pays de Brest, in: *Spatial Analysis and GEomatics 2017*. INSA de rouen, Rouen, France.
- Zha, Y., Gao, J., Ni, S., 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping

urban areas from TM imagery. *Int. J. Remote Sens.* 24, 583–594.
<https://doi.org/10.1080/01431160304987>

Liste des figures

Figure 1 : Schéma illustrant l'évolution théorique du système agroforestier à acacia dans le temps sur le plateau Batéké en RDC (adapté de (Dubiez et al., 2019))	3
Figure 2 : : Délimitation de la zone d'étude pour le suivi de l'évolution des plantations agroforestières d'acacia sur le plateau Batéké en RDC	5
Figure 3 : Illustration de la phase de photo-interprétation et les différentes classes	7
Figure 4 : Synthèse de la méthodologie mise en œuvre pour étudier l'évolution des plantations d'acacia dans le temps sur le plateau Batéké en RDC (Koffi, 2023)	8
Figure 5 : Matrice de confusion résultant de la combinaison des images provenant des capteurs S1, S2 et PlanetScope.....	14
Figure 6 : Répartition des occupations de sol en 2016	15
Figure 7 : Répartition des occupations de sol en 2019	16
Figure 8 : Répartition des occupations de sol en 2021	16
Figure 9 : superficies des différentes occupations de sol.	17
Figure 10 : Carte de d'occupation de sol en 2016 (Koffi, 2023).	18
Figure 11 : Carte d'occupation de sol en 2019 (Koffi, 2023).....	19
Figure 12 : Carte d'occupation de sol en 2021 (Koffi, 2023).....	20

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatifs des images et leur résolution spatiale et temporelle	6
Tableau 2 : Caractéristique des données d'apprentissage et de validation.....	7
Tableau 3 : Récapitulatif des indices radiométriques	9
Tableau 4 : Synthèse des résultats obtenus dans les différents tests de classification	13
Tableau 5 : Récapitulatif des données du projet Makala.....	22
Tableau 6 : Récapitulatif des données du projet PGAPF	24
Tableau 7 : Tableau récapitulatif des interprétations des résultats du projet PGAPF	27
Tableau 8 : Tableau récapitulatif des interprétations des résultats du projet Makala	29

Liste des planches

Planche 1 : Quelques illustrations du système agroforestier à acacia	4
---	---

Liste des abbreviations

GEE: Google Earth Engine

GEP : Google Earth Pro

PGAPF : Projet de Gestion Améliorée des Paysages Forestiers

SR : Surface réflectance

S2 : Sentinel-2

S1: Sentinel-1

L7: Landsat7

VV: Vertical-Vertical

VH: Vertical-Horizontal

NICFI: Norwegian International Climate and Forests Initiative

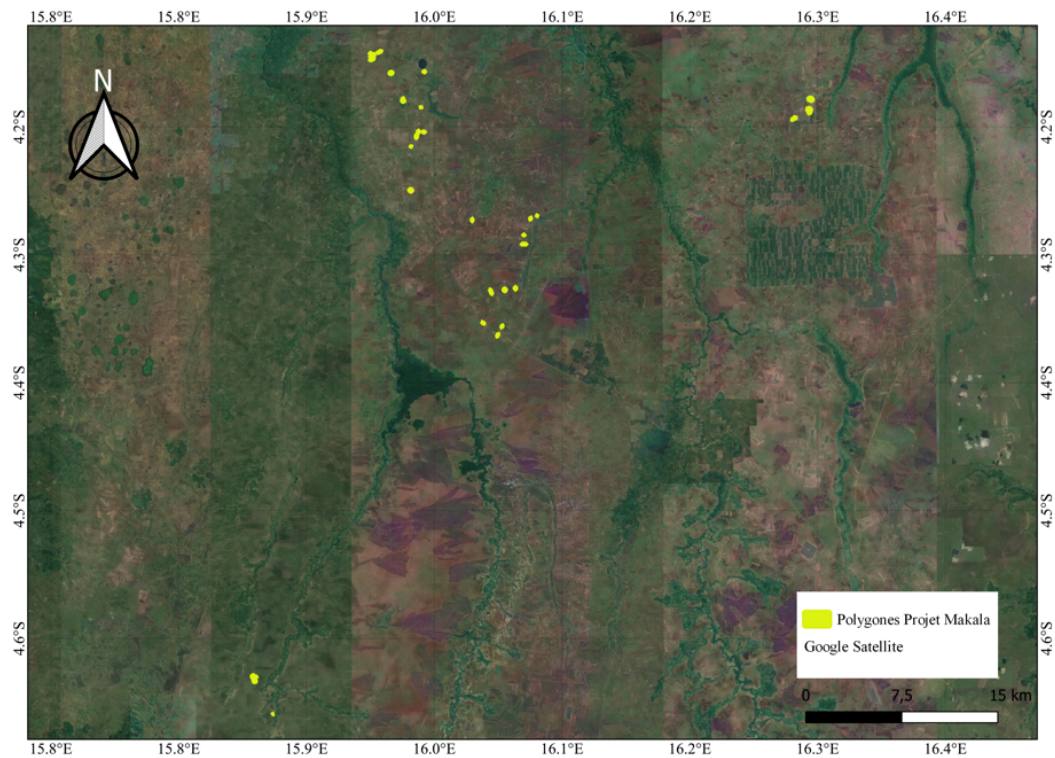
AP : Année de plantation

Ai : Aire Initiale

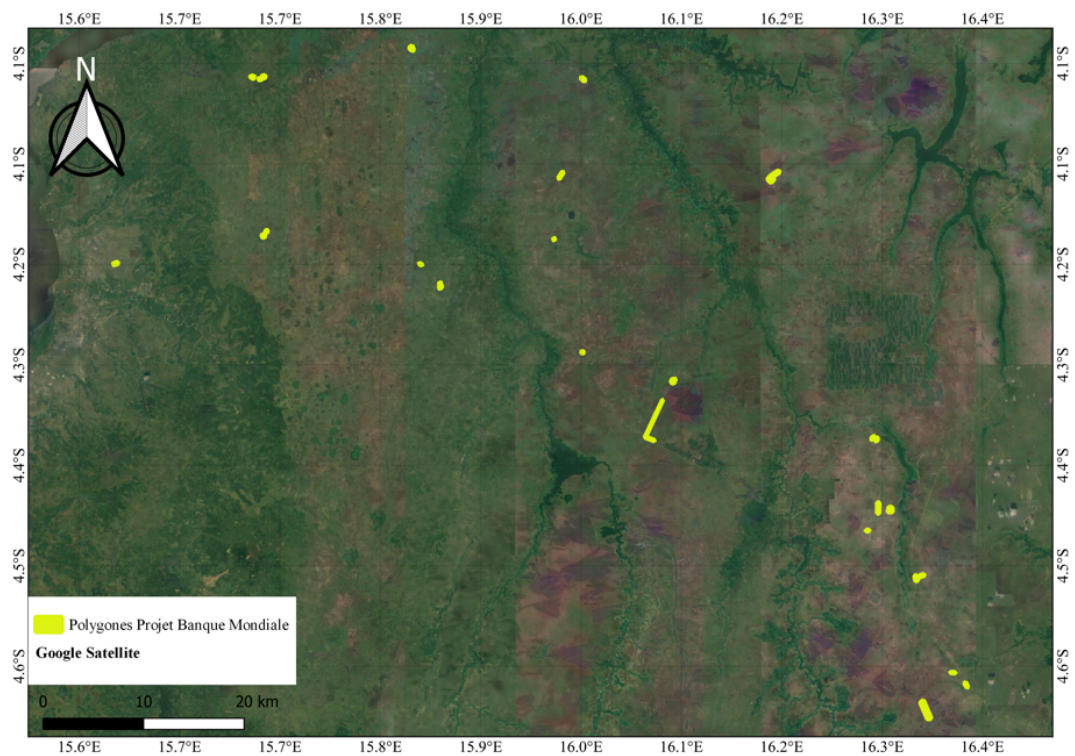
Id : Identifiant

Annexes :

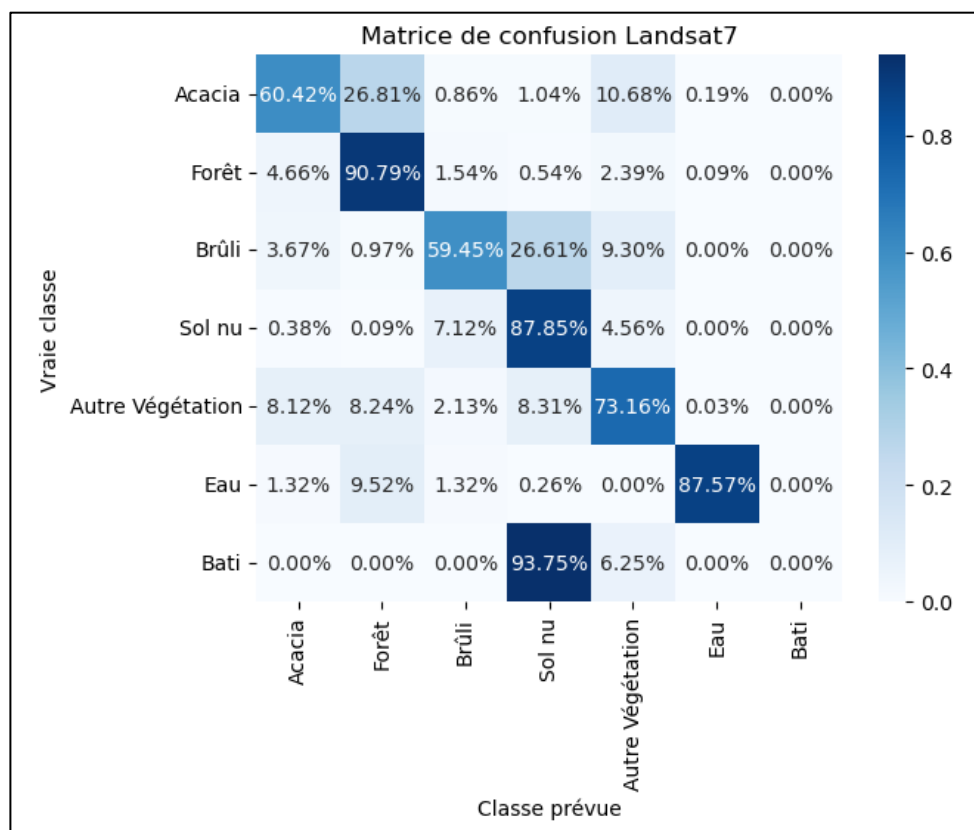
Annexe 1 : Carte des parcelles échantillonnées pour le projet Makala



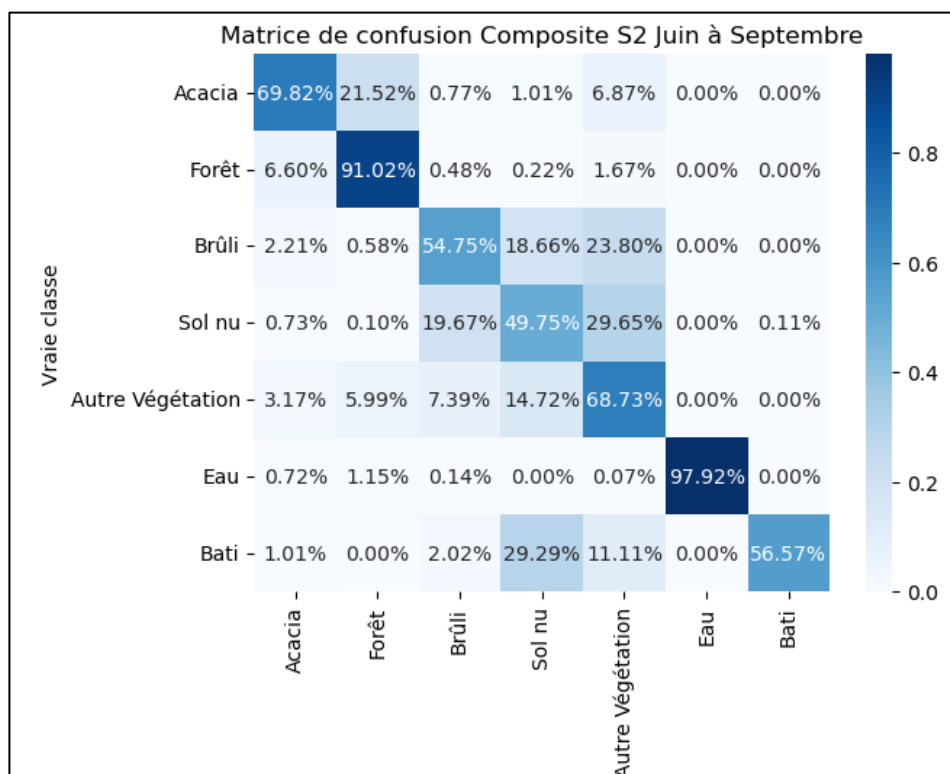
Annexe 2 : Carte des parcelles échantillonnées pour le projet de la banque mondiale



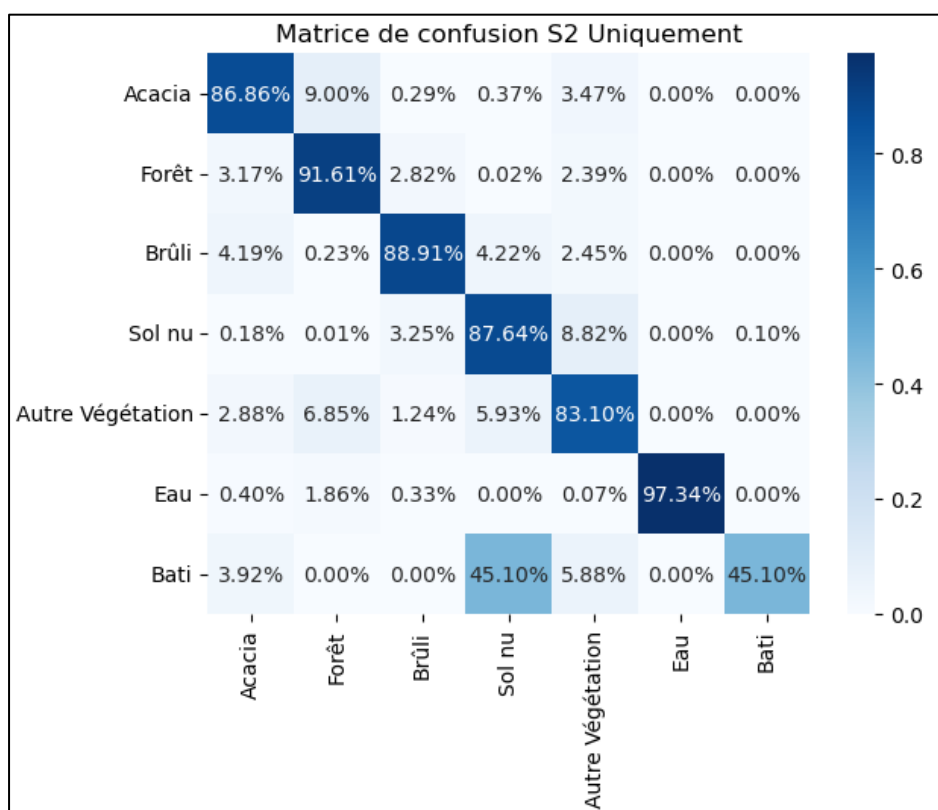
Annexe 3 : Matrice de confusion avec un composite Landsat7ETM+ sur la période sèche



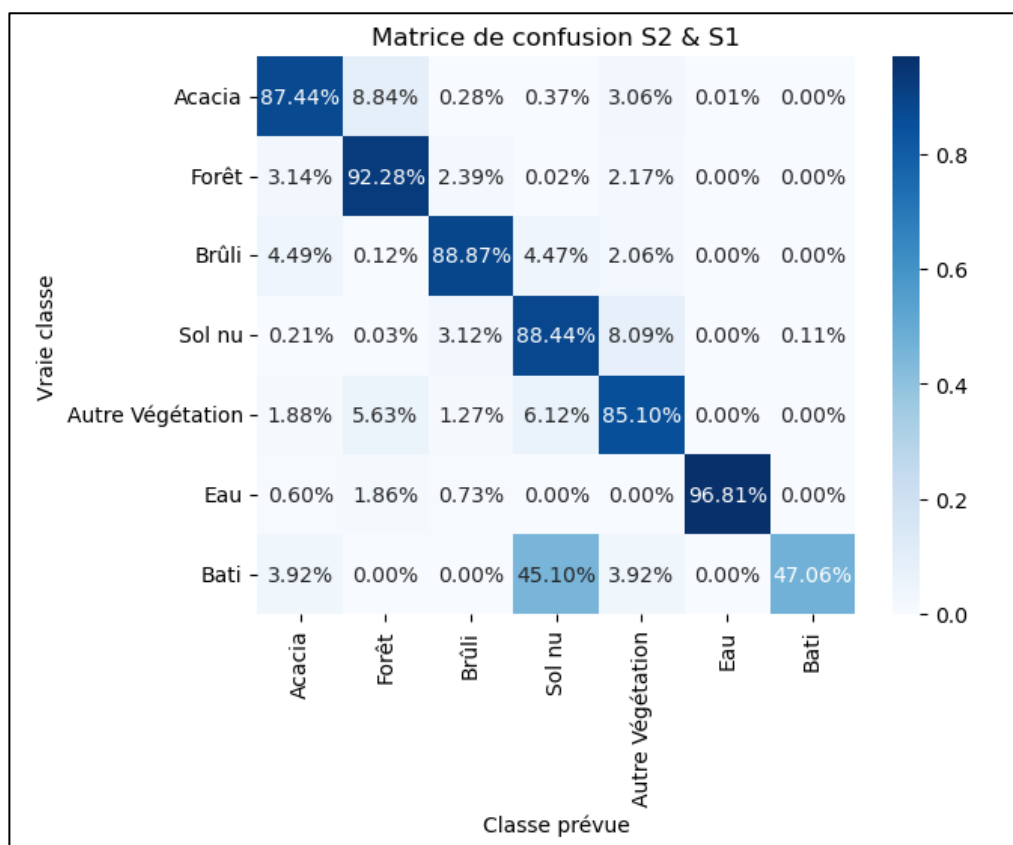
Annexe 4 : Matrice de confusion avec un composite sentinel-2 sur la période sèche



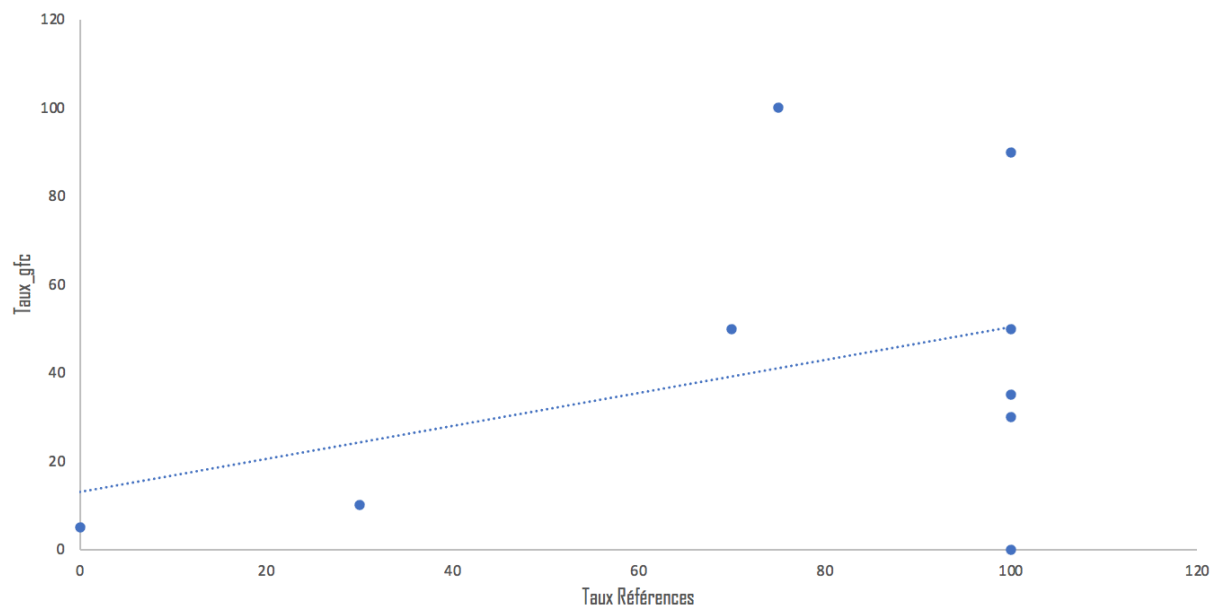
Annexe 5 : Matrice de confusion avec des composites mensuelles sentinel-2 sur la période sèche



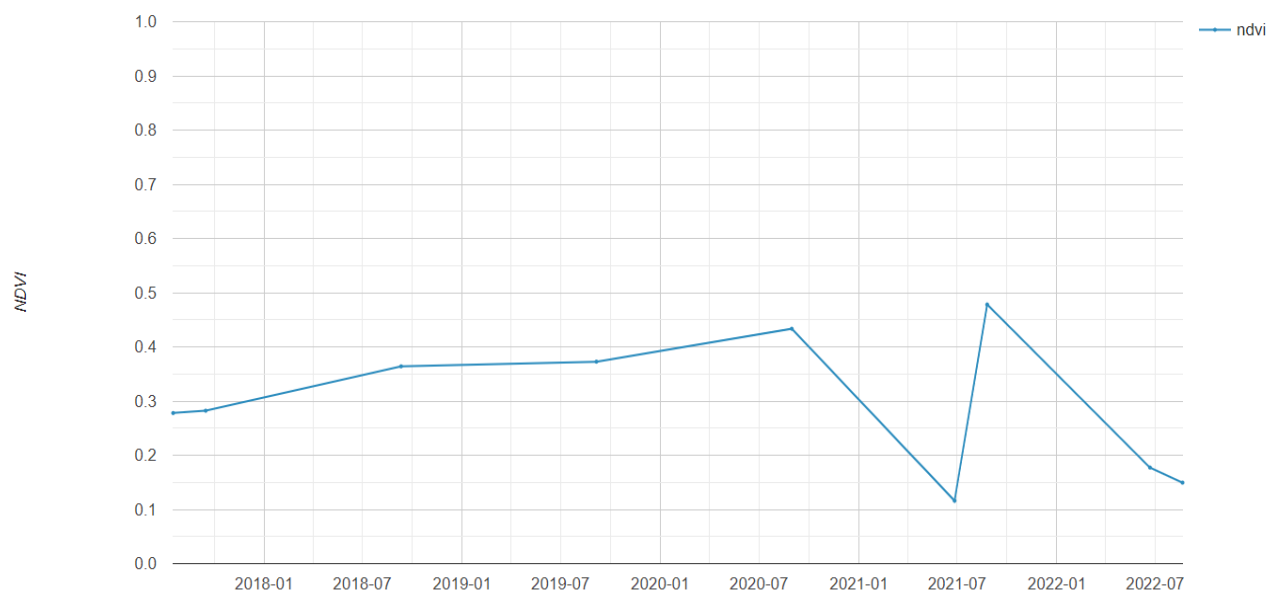
Annexe 6 : Matrice de confusion avec des composites mensuelles sentinel-1 et sentinel-2 sur la période sèche.



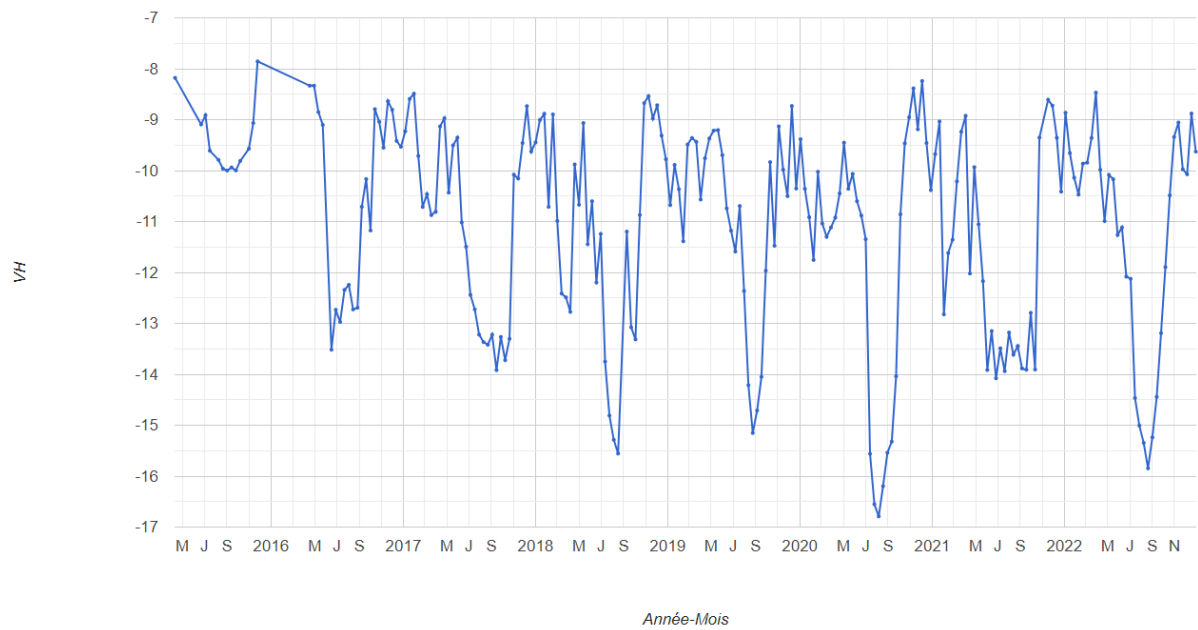
Annexe 7 : Corrélation entre perte de surface obtenues par GFC et par photo-interprétation.



Annexe 8 : Suivi temporel du NDVI d'une parcelle d'acacia avec sentinel-2



Annexe 9 : Suivi temporel de la bande VH d'une parcelle d'acacia avec sentinel-1



Annexe 10 : Suivi temporel combiné du quotient VV/VH du sentinel-1 et NDVI du sentinel-2

