



## Projet iDROC :

### Intégration de l'imagerie drone dans la certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers

Contrat C151

Rapport d'activités final

Janvier 2019 – Juillet 2022

Bracke Charles (Nature+), Bauwens Sébastien (TER Consult), Rivière Laurent (Sunbirds), Dupuis Chloé (Gembloux Agro-Bio Tech), Bailly Vincent (Nature+), Lejeune Philippe (Gembloux Agro-Bio Tech),

Bénéficiaire : Nature +

Partenaires : Sunbirds, Gembloux Agro-Bio Tech, TER-Consult, IFO/Interholco, Pallisco



Associés : CEA, CIRAD



## Table des matières

Rappel du contexte de l'intervention .....	9
Les objectifs du projet iDROC.....	9
Période d'activités et difficultés rencontrées .....	10
Synthèse des ressources mobilisées .....	11
Calendrier effectif .....	11
<b>1. Volet 1 (activités 6.1.1 à 6.1.7) - Etablissement d'un protocole "modèle" d'acquisition d'images drone transposable dans différentes entreprises.....</b>	<b>14</b>
1.1. Les démarches et l'acheminement du drone dans les entreprises au Congo et au Cameroun.....	14
1.2. L'identification des sites pilotes d'étude au Congo et au Cameroun .....	19
1.3. La configuration et l'adaptation des drones aux besoins de l'étude.....	22
1.4. La définition de plans de vol sur base des informations cartographiques des entreprises forestières et les premiers vols d'essais.....	25
1.5. Formation drone.....	28
1.6. Vols d'acquisition d'images sur d'importantes surfaces .....	30
1.7. Résultats attendus / acquis .....	34
1.8. Leçons apprises sur le Volet 1 : Etablissement d'un protocole "modèle" d'acquisition d'images drone transposable dans différentes entreprises.....	35
<b>2. Volet 2 (activités 6.1.8) - Développement d'un outil informatique de prétraitement des données drones .....</b>	<b>38</b>
2.1. Outils de prétraitement des données drones.....	38
2.2. Protocole spécifique de mise en correspondance des orthomosaïques et Modèles Numériques de Surface des vols avant et après exploitation .....	39
2.3. Résultats attendus / acquis .....	40
<b>3. Volet 3 (activités 6.1.9 à 6.1.11) - Développement d'outils d'aide à la planification avec de l'imagerie drone .....</b>	<b>45</b>
3.1. Inventaire : localisation d'essences commerciales tropicales (projet iDROP) .....	45
3.2. Inventaire : estimation du diamètre des essences identifiées par drone .....	51
3.2.1. Développement de modèles de prédiction du diamètre du tronc .....	51
3.2.2. Usage des modèles de prédiction du diamètre du tronc.....	53
3.3. Stratification forestière .....	54
3.3.1. Modèle Numérique de Terrain et classes géomorphologiques .....	56
3.3.2. La densité des grands arbres .....	59
3.3.3. Les principaux types d'occupation du sol .....	62

<b>3.3.4. Stratification de la forêt à partir des différentes couches cartographiques produites.....</b>	<b>65</b>
<b>3.4. Planification des routes .....</b>	<b>67</b>
<b>4. Volet 4 - Développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée (activité 6.1.12) .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1. Introduction .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2. Traitement des données et résultats obtenus .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3. Conclusions et perspectives de suivi à partir d'images drone des perturbations de la canopée causées par les opérations d'exploitation forestière .....</b>	<b>78</b>
<b>4.4. Génération d'informations pour l'écocertification .....</b>	<b>78</b>
<b>5. Volet 5 (activité 6.1.13) - Communication sur l'apport de la technologie drone en gestion forestière tropicale.....</b>	<b>84</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>85</b>

## Acronymes

AAC	Assiette Annuelle de Coupe
ASBL	Association Sans But Lucratif
ATIBT	Association Technique Internationale des Bois Tropicaux
BI	Brillance
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CIVE	Color index of vegetation extraction
DME	Diamètre Minimum d'Exploitation
EFIR	Exploitation forestière à impact réduit
ENSAF	Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et de Foresterie
ExGR	Excess of green moins Excess of Red
FEDER	Fonds européen de développement régional
FSC	Forest Stewardship Council
GCP	Ground control point ou point de contrôle géographique
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GPS	Global Positioning System
GxABT	Gembloux Agro-Bio Tech
HVC	Haute Valeur de Conservation
IA	Intelligence Artificielle
IATA	International Air Transport Association

iDROC (Projet)	Intégration de l'imagerie drone dans la certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers
iDROP (Projet)	Imagerie Intelligente par Drone pour la gestion des écosystèmes forestiers tropicaux
IFL	Intact Forest Landscape
IFO	Industrie Forestière de Ouessou
IHC	Interholco
MGRVI	Modified Green Red Vegetation Index
MNC	Modèle Numérique de Canopée
MNH	Modèle Numérique de Hauteur
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
ONG	Organisation Non Gouvernementale
OTB	Orfeo ToolBox
P3FAC (Projet)	Partenariat Public-Privé pour gérer durablement les Forêts d'Afrique centrale
PCI	Principes, Critères, Indicateurs
PPECF	Programme de Promotion certifiée des Forêts
PPK	Post Processed Kinematic ou cinématique post-traitée
PROGEPP	Partenariat de Gestion des Ecosystèmes Périphériques du Parc national d'Odzala-Kokoua
RF	Random Forest
RGB	Red, Green, Blue
SIG	Système d'Information Géographique
UFA	Unité Forestière d'Aménagement
UMN	Université Marien Ngouabi
VTOL	Vertical takeoff and landing
Wh	Watheure

## Liste de tableaux

Tableau 0.1 :	Bilan de l'utilisation des ressources humaines et matérielle utilisées sur la subvention octroyées par le PPECF.
Tableau 0.2 :	Calendrier des activités menées pendant la période d'activités du projet iDROCertification.
Tableau 1.1 :	Contenus des trois cartons pour faire transiter les 2 drones Sunbirds de type Tigerwing sur le site d'IFO/IHC.
Tableau 1.2 :	Document nécessaires à l'opération de drones au Congo.
Tableau 1.3 :	Nom des employés ayant participé à l'initiation au traitement des données drones.
Tableau 1.4 :	Bilan des résultats acquis sur le Volet 1 du projet iDROC.
Tableau 2.1 :	Résultats attendus et acquis dans le volet 2 du projet iDROC.
Tableau 3.1 :	Essences reconnues et à étudier en priorité par DeepForest (2022).

- Tableau 3.2 : Valeurs des paramètres des modèles 1 et 2 pour chaque espèce (voir équations 1 et 2) et leur précision en termes d'erreur quadratique moyenne (RMSE, en cm). Le nombre d'arbres par essence est repris dans la colonne n.
- Tableau 3.3 : Comparaison des caractéristiques de la proposition de tracé de route faite à partir des données drone par rapport au tracé réel de la route.
- Tableau 4.1 : Matrice de confusion permettant de comparer les résultats issus de la cartographie des classes de végétation à des données de référence (photo-interprétation des images drone).
- Tableau 4.2 : Importance des différentes classes d'occupation du sol au sein de la zone d'étude avant exploitation.
- Tableau 4.3 : Description des perturbations observées dans la strate arborée suite à l'exploitation réalisée entre les 2 vols en fonction de la taille des perturbations : nombre de perturbations, surface perturbée exprimée en ha, en % de la surface totale, de la surface arborée et de la surface perturbée.

## Liste des figures

- Figure 0.1 : Déroulement technique de iDROC Certification. iDROC est un projet financé par la Région Occitane et GxABT est la faculté Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) qui mène des recherches drone dont certaines à Pallisco au Cameroun.
- Figure 1.1 : Cartons avec les 2 drones Sunbirds de type Tigerwing arrivés à Brazzaville au Congo.
- Figure 1.2 : Valise de transport du matériel (équipement et maintenance).
- Figure 1.3 : Carton utilisé pour le transport du drone.
- Figure 1.4 : Montage du drone VTOL sur le site d'IFO/IHC.
- Figure 1.5 : L'aile fixe (type avion) Talon avec sa rampe de lancement sur le site de décollage étroit (route forestière).
- Figure 1.6 : A gauche, Deltaquad en décollage à la base-vie. A droite, Nimbus de Foxtech sur le site de décollage (route forestières). Tous les deux, type avion à décollage vertical (VTOL).
- Figure 1.7 : Localisation du dispositif de 200 ha de suivi de croissance (IFO/IHC).
- Figure 1.8 : Dispositif de 3.000 ha situé dans l'assiette annuelle de coupe 2019 et survolé par drone. Les vols drones de la première mission ont été réalisés avant l'exploitation des arbres et un second survol a été réalisé après l'exploitation et l'évacuation des grumes (IFO/IHC).
- Figure 1.9 : Carte des concessions forestières de Pallisco avec la localisation des AAC initialement identifiées pour réaliser les vols (Source du fond de carte : Hansen et al., 2015).
- Figure 1.10 : Site d'étude, chez Pallisco au Cameroun, survolé par drone. Le site est l'AAC 2019 de l'UFA 10 030-31 dans laquelle 4 blocs de vols ont été réalisés lors de la première mission sur le projet iDROC.
- Figure 1.11 : Poches d'exploitation des AAC 2020 et 2021 de l'UFA 10 041-42-44 avec, en hachuré, les blocs de vols survolés lors de la seconde mission sur le projet iDROC (Pallisco).
- Figure 1.12 : A) drone à voilures tournantes (multicoptère), B) Tigerwing, un drone à voilure fixe.
- Figure 1.13 : Drone VTOL (Vertical Takeoff and Landing) développé par Sunbirds.
- Figure 1.14 : Cibles pour les points de contrôle géographique (GCP).
- Figure 1.15 : Fonctionnement de la technologie PPK.
- Figure 1.16 : Les 9 Plans de vol utilisés pour cartographier les 3.000 ha de l'assiette annuelle de coupe 2019 chez IFO/IHC. Réalisé avec Belvedere (Sunbirds).

- Figure 1.17 : Paramétrage des Surveys de l'assiette de coupe IHC 2019. Réalisé avec Belvedere (Sunbirds).
- Figure 1.18 : Première mission drone avec Sunbirds, le CEA, le CIRAD, IFO/IHC et Nature+.
- Figure 1.19 : Lancement du drone lors d'une mission en forêt (IFO/IHC).
- Figure 1.20 : Exemple du plan de vol généré pour l'acquisition d'images drone dans le sud de l'AAC 2019 de Makalya-Pallisco-Cameroun. Réalisé avec Mission Planner (opensource).
- Figure 1.21 : Paramètres utilisés dans les plans de vol chez Pallisco – Cameroun.
- Figure 1.22 : Attestation pratique de vol, Gaël Bouka, chercheur à l'Université de Marien Ngouabi.
- Figure 1.23 : Initiation de membres du personnel de Pallisco au drone multicoptère.
- Figure 1.24 : Les photos aériennes géo-localisées permettent de mesurer la largeur des routes, des pistes de débardage ainsi que les trouées. Les surfaces exploitées peuvent être localisées et mesurées avec précision.
- Figure 1.25 : Le suivi de l'exploitation est directement visualisable sur les images obtenues par drone.
- Figure 1.26 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit (EFIR) survolés par drone – le suivi de l'exploitation forestière certifiées FSC est directement visible (1/2).
- Figure 1.27 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit (EFIR) survolés par drone – le suivi de l'exploitation forestière certifiées FSC est directement visible (2/2).
- Figure 1.28 : Routes secondaires d'exploitation forestière certifiées FSC au sein de l'AAC 2019 de Makalaya de la Pallisco au Cameroun.
- Figure 2.1 : Illustration du mode opératoire de pré-traitement des données drones.
- Figure 2.2 : Illustration de Metashape Pro, permettant de générer les Orthophotos et les modèles d'élévation. Les photos sont alignées et assemblées pour générer une orthomosaïque de l'ensemble de la zone survolée.
- Figure 2.3 : Cadre conceptuel de mise en correspondance des données avant et après exploitation selon 3 options différentes.
- Figure 2.4 : AAC 2019 et zones survolées sur le site d'IFO/IHC.
- Figure 2.5 : Exemple des 3.000 ha survolés avant exploitation sur le site d'IFO/IHC, disponibles sur la plateforme web de visualisation.
- Figure 2.6 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC survolés par drone – l'impact d'exploitation est directement visible (1/2).
- Figure 2.7 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC survolés par drone – l'impact d'exploitation est directement visible (2/2).
- Figure 2.8 : Exemple du modèle numérique de surface des 3.000 ha réalisé sur le site d'IFO/IHC au Congo, disponibles sur la plateforme web de visualisation – modèle d'élévation de surface.
- Figure 2.9 : Les photos géolocalisées drones permettent de facilement évaluer la largeur des routes dans une exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC.
- Figure 2.10 : Exemple de mesures de suivi de l'exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC réalisées sur base d'une orthophoto drone.
- Figure 2.11 : Exemple d'orthophoto obtenue sur le site de Pallisco au Cameroun et disponible sur la plateforme web de visualisation.
- Figure 3.1 : Lors de la phase d'apprentissage, un lot d'exemples de différentes essences est transmis à l'IA, qui apprend à les différencier.
- Figure 3.2 : Dans la phase d'identification, un lot d'essences à identifier est transmis à l'IA, qui doit pouvoir les reconnaître et les classer automatiquement.

- Figure 3.3 : AAC 2019 et zones cartographiées.
- Figure 3.4 : Exemple de d'inventaire automatique réalisé par drone.
- Figure 3.5 : Les quatre étapes de la solution DeepForest.
- Figures 3.6 (en haut) et 3.7 (en bas) : Gestion des données d'inventaires par drone et reconnaissance / localisation des essences tropicales commerciales avec la solution DeepForest.
- Figures 3.8 : L'offre de la solution DeepForest.
- Figure 3.9 : Principales étapes pour développer les modèles d'estimation du diamètre à partir des données drone. 1) délimitation du houppier sur l'image drone, 2) extraction des variables prédictives sur les données drones (ex : surface et hauteur) et, 3) ajustement d'un modèle d'estimation du diamètre du tronc.
- Figure 3.10 : Tendances des estimations de diamètre du tronc à partir du 1er modèle comprenant la surface du houppier et la hauteur totale de l'arbre comme variables. Les points sont les valeurs mesurées et les droites sont les tendances linéaires des estimations faites à partir du modèle 1.
- Figure 3.11 : Comparaison des estimations de diamètre faites avec les modèles par rapport aux diamètres relevés par l'inventaire d'exploitation. La ligne bleue est la tendance entre les estimations et les relevés de l'inventaire. Si cette tendance dévie de la ligne 1 : 1 (c'est-à-dire qu'une valeur en abscisse est exactement égale à une valeur en ordonnée) (différence avec la ligne bleue), cela signifie qu'il y a un biais qui se crée.
- Figure 3.12 : Illustration d'un exemple d'usage d'un modèle de prédiction du diamètre du tronc. Il y a 97.5 % de chance que les arbres dont le diamètre prédit est supérieur à 110 cm aient un diamètre réel du tronc supérieur à 80 cm (diamètre minimum d'exploitation courant en Afrique Centrale).
- Figure 3.13 : Localisation de la zone pilote retenue pour illustrer les types de produits cartographiques générés à partir de données drone iDROC dans le contexte de la planification forestière. Cette zone se situe au sud de l'assiette annuelle de coupe 2019 de l'UFA 10-31 au sud-est du Cameroun.
- Figure 3.14 : Chaîne de traitements pour générer un Modèle Numérique de Terrain à partir d'un Modèle Numérique de Surface.
- Figure 3.15 : Classes géomorphologiques obtenues à partir de donnée drone sur une zone pilote en forêt dense humide (Pallisco, Cameroun). A gauche l'orthophotomosaïque de la zone pilote, à droite les classes géomorphologiques.
- Figure 3.16 : L'estimation de la hauteur du couvert forestier peut se faire grâce au Modèle Numérique de Hauteur. Il est produit en soustrayant le MNT du MNS.
- Figure 3.17 : Chaîne de traitement comprenant les principales étapes pour obtenir une carte de densité des grands arbres.
- Figure 3.18 : A gauche, Modèle Numérique de Hauteur (MNH) généré à partir du Modèles Numérique de Surface (MNS) et du Modèles Numérique de Terrain (MNT). A droite, carte de densité des grands arbres selon trois classes. Les courbes de niveau sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain généré avec les données drones.
- Figure 3.19 : A gauche, l'orthophotomosaïque drone de la zone pilote. A droite, la carte d'occupation du sol généré par l'algorithme Random Forest d'OTB. Les courbes de niveau sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain généré avec les données drones.
- Figure 3.20 : A gauche, la stratification forestière issue des données drone iDROC. A droite, la stratification forestière produite et utilisée par la société d'exploitation forestière. Les courbes de niveau sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain généré avec les données drones du projet iDROC.
- Figure 3.21 : Superposition des couches cartographiques produites à partir des données drone pour proposer un tracé de route. A titre de comparaison, le tracé de route réel déjà réalisé est également présenté.

- Figure 4.1 : Illustration de cartographie des sols nus : ortho image (haut), indice MGRVI (centre), résultat du seuillage du MGRVI pour délimiter les zones de sol nu (bas).
- Figure 4.2 : Représentation du MNT produit par interpolation et des courbes de niveau.
- Figure 4.3 : Modèle Numérique de Hauteur (MNH) également appelé Modèle Numérique de Canopée (MNC).
- Figure 4.4 : Distribution de fréquence des valeurs prises par le MNH.
- Figure 4.5 : Illustration du résultat de la classification des types de végétation pour le vol 1.
- Figure 4.6 : Délimitation des zones perturbées dans la canopée : (a) orthoimage du vol 2, (b) différence de MNH (MNC=MNH dans légende) entre les 2 dates dans la strate arborée, (c) Perturbations opérées dans la strate arborée. Le sol nu encore apparent sur l'image c est le sol nu de la strate « marantacées ».
- Figure 4.7 : Exemple de l'emprise des houppiers sur le profile longitudinal d'une voirie secondaire généré à partir du Modèle Numérique de Surface. Le rapport entre la longueur d'houpier superposant la route et la longueur de la route serait un bon indicateur quantitatif attestant de pratiques d'Exploitation Forestière à Impact Réduit (EFIR).
- Figure 4.8 : Mesures de l'impact de la construction des routes sur la canopée, mesure des trouées.
- Figure 4.9 : Exemple de mesures réalisées grâce à l'outil drone.
- Figure 4.10 : Orthophotos géolocalisées des ponts à culée canadienne.
- Figure 4.11 : Orthophoto d'un ponceau.
- Figure 4.12 : Les orthophotos géolocalisées drone permettent de facilement évaluer la largeur des routes ou le nombre d'exutoires par km de route.
- Figure 4.13 : Les orthophotos géolocalisées drone permettent l'identification et la localisation de campements illégaux (braconnage, sciage sauvage etc.).
- Figure 4.14 : Les orthophotos géolocalisées drone permettent le suivi d'habitats importants pour la faune (baï, saline etc.).
- Figure 4.15 : Potentiel de l'imagerie drone comme outil de communication / information / sensibilisation : exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC.
- Figure 4.16 : Les orthophotos en appui au développement intégré de la base-vie: scierie, parc à grumes, habitations, préventions (inondations etc.).
- Figure 4.17 : Autres exemples d'usage de l'imagerie drone pour la certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers : suivi des limites des concessions et de l'extension des emprises agricoles illégales (à gauche, exemple en République Démocratique du Congo) suivi de la faune (à droite, exemple au Burkina Faso) (exemples issus de projets réalisés par GxABT).
- Figure 4.18 : Autre exemple d'usage de l'imagerie drone pour la certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers : suivi des variations phénologiques dans les forêts d'Afrique centrale (exemples issus de : Utilisation des Phénocams pour le suivi des variations phénologiques dans les forêts d'Afrique centrale : un an à la limite forêt-savane dans le Parc National de Lopé, Gabon).

## Rappel du contexte de l'intervention

### Les objectifs du projet iDROC

Afin d'évaluer le réel potentiel de l'imagerie drone pour répondre à certaines exigences légales et de certification du bassin du Congo, une étude pilote, qui regroupe des acteurs opérationnels et de terrain, était nécessaire.

En réponse à cette nécessité, le Projet iDROC (Intégration de l'imagerie drone dans la certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers) visait à développer une solution de télédétection drone qui permet :

- une aide à la planification des opérations d'exploitation :
  - Le survol de grandes surfaces forestières prochainement exploitées par un drone permettra de déceler des éléments contraignants pour la planification du réseau routier tels que des escarpements rocheux, des fortes pentes, des salines, marrais et de larges rivières. De même, ces éléments pourront être exploités dans le cadre de l'identification des zones de forêt à Haute Valeur de Conservation (HVC). La détermination et la géolocalisation de certaines essences commerciales phares serviront à enrichir les opérations d'inventaire déjà réalisées dans les entreprises forestières.
- un suivi des perturbations du couvert forestier (suivi post-exploitation et surveillance) :
  - Une meilleure connaissance des perturbations du couvert forestier suite aux opérations d'exploitation permet d'évaluer la qualité des interventions réalisées et, par conséquent, de les améliorer par la suite. L'outil de détection des perturbations du couvert forestier pourra également servir à surveiller l'absence de perturbations du couvert en dehors des zones d'exploitation ou comme outil de suivi des « zones essentielles » (core areas) des IFL. Les produits cartographiques standardisés qui seront générés pourront être utilisés dans le cadre d'audit d'écocertification.

Le Projet envisageait également une communication ciblée (EFIR, IFL, etc.) sur l'apport de la technologie drone au sein des entreprises forestières en mettant en valeur les informations drone utilisables dans le cadre d'écocertification et la manière d'intégrer cette technologie dans les entreprises forestières (coûts, réglementations nationales, connaissances techniques, ...).

La mise en œuvre du projet iDROC se déroulait au travers des cinq volets suivants :

1. Etablissement d'un protocole "modèle" d'acquisition d'images drone transposable dans différentes entreprises forestières (V1) ;
2. Développement d'un outil informatique de prétraitement des données drones (V2) ;
3. Développement d'outils d'aide à la planification avec de l'imagerie drone (V3) ;
4. Développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée (V4) ;
5. Communication sur l'apport de technologie drone en gestion forestière tropicale (V5).

Les travaux ont été réalisés sur deux sites pilotes. Le premier site se situe dans la concession forestière d’IFO/Interholco au nord de la République du Congo et le second site se trouve au sein de la concession forestière de Pallisco au sud du Cameroun.

La figure ci-dessous présente les principales étapes techniques contenues dans ce projet iDROC.

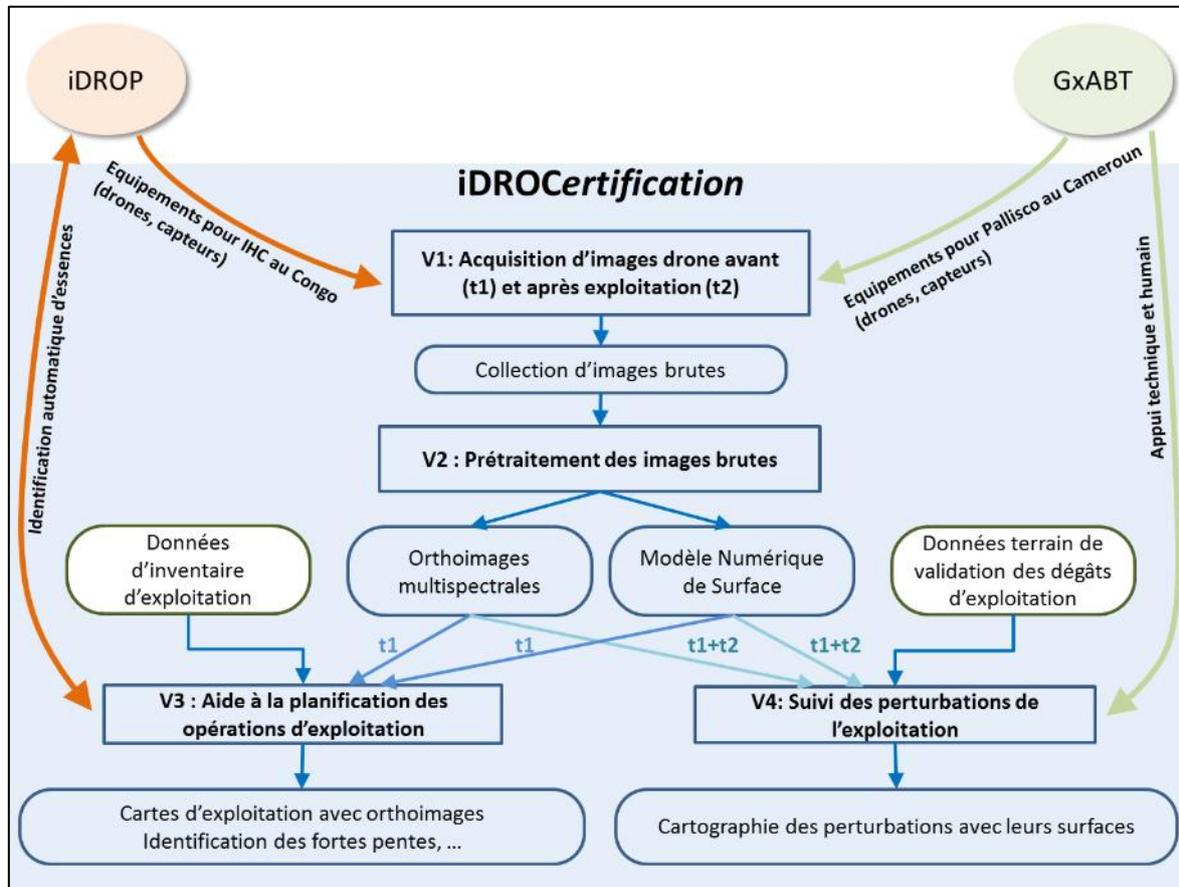


Figure 0.1 : Déroulement technique de iDROCertification. iDROP est un projet financé par la Région Occitane et GxABT est la faculté Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) qui mène des recherches drone dont certaines à Pallisco au Cameroun.

## Période d’activités et difficultés rencontrées

Le projet iDROC a fait l’objet du contrat C151 avec le PPECF signé le 17/01/2019 avec l’ASBL Nature+. Les partenaires de mise en œuvre sont la société Sunbirds, les organismes de recherche Gembloux Agro-Bio Tech, Commissariat à l’énergie atomique (CEA) Tech et CIRAD (voir annexes 1, 2 et 3). Les entreprises forestières partenaires et bénéficiaires sont les entreprises forestières IFO/Interholco au Congo et Pallisco au Cameroun.

La période de mise en œuvre du Projet était de 40 mois amenant à la clôture du Projet pour le 16/05/2022.

Toutefois des difficultés conséquentes ont été rencontrées pendant cette période de mise en œuvre. La pandémie mondiale COVID 19 a retardé toute la phase des missions de collecte de données drone, qui ont dû être postposées à de nombreuses reprises. La pandémie COVID 19, en empêchant les voyages internationaux, a malheureusement pesé de manière majeure dans la décision de liquidation de SunBirds pendant la période de clôture du projet iDROC. Egalement, le projet iDROC a dû faire face à une période de maladie de personnel technique clé pour la coordination et la réalisation des chaînes de traitement et de production de produits cartographiques attendus. Tous ces événements ont eu des impacts sur le calendrier du projet iDROC mais également sur des ressources qui ont dû être mobilisées pour pallier à ces difficultés. En termes d'efficacité et d'efficience, l'attention a été portée sur la bonne mise en œuvre de manière à s'assurer de la bonne réussite des volets expérimentaux techniques et opérationnels : les volets 1, 2, 3 et 4. Le volet 5 a été mis en œuvre dans les limites des ressources disponibles et restantes du contrat de subvention PPECF.

Vue ces contraintes, au-delà de cette période de 40 mois, des ressources complémentaires ont été mobilisées par les partenaires pour capitaliser les résultats et expériences acquises dans ce rapport d'activités.

Le présent rapport constitue le rapport d'activités final du Projet iDROC couvrant les activités menées par les partenaires pendant la période allant de janvier 2019 à juillet 2022. Chaque volet correspond à un chapitre du rapport :

- Chapitre 1 : Etablissement d'un protocole "modèle" d'acquisition d'images drone transposable dans différentes entreprises forestières (V1) ;
- Chapitre 2 : Développement d'un outil informatique de prétraitement des données drones (V2) ;
- Chapitre 3 : Développement d'outils d'aide à la planification avec de l'imagerie drone (V3) ;
- Chapitre 4 : Développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée (V4) ;
- Chapitre 5 : Communication sur l'apport de technologie drone en gestion forestière tropicale (V5).

Les sous-sections suivantes présentent une synthèse des ressources mobilisées et le calendrier effectif du projet iDROC.

## Synthèse des ressources mobilisées

Le tableau 0.1 ci-après synthétise les ressources mobilisées au travers de la subvention octroyée par PPECF pour réaliser les activités pendant toute la période d'activités.

## Calendrier effectif

Les activités réalisées lors des 40 mois du projet sont repris dans le tableau 0.2 ci-dessous.

**Tableau 0.1 : Bilan de l'utilisation des ressources humaines et matérielle utilisées sur la subvention octroyées par le PPECF.**

Structure / Personnel	Poste / Tâches	Nb de jours affectés	
<b>Sunbirds - Drone-imagerie</b>			
Laurent Rivière (CEO SunBirds)	Les démarches pour l'acheminement du drone dans l'entreprise, l'identification des sites pilotes d'étude, l'adaptation et la configuration des drones aux besoins de l'étude, la définition de plans de vol sur base des informations cartographiques de l'entreprise forestière, les premiers vols d'essais, les vols d'acquisition d'images sur d'importantes surfaces, le développement d'un outil informatique de prétraitement des données drones	40	
Olivier Chenoz (Technicien Support Drone)		17	
Florian Viguier (Ingénieur Logiciel)		2	
Julien Olé (pilote)		23	
<b>Sunbirds - Suivi scientifique et technique</b>			
Laurent Rivière (CEO SunBirds)	Développement d'outils d'aide à la planification avec de l'imagerie drone, constitution d'une base de données cartographique, production de supports cartographiques dérivés de l'imagerie drone, développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée, communication sur l'apport de technologie drone en gestion forestière tropicale	22,5	
Florian Viguier (Ingénieur Logiciel)		16	
CIRAD - Technicien botaniste	Pour mémoire - Pris en charge par IDROP		
CIRAD - Conseils scientifique	Pour mémoire - Pris en charge par IDROP		
CEA - Conseils scientifique	Pour mémoire - Pris en charge par IDROP		
CEA - drone-imagerie	Pour mémoire - Pris en charge par IDROP		
<b>Nature+ - Drone-imagerie</b>			
Sébastien Bauwens (TER Consult)	Coordination technique du projet, démarches achat et acheminements drones, appui logistique, acquisition imagerie drone (co-équipier), prétraitement de données drone (V2), valorisation de l'imagerie drone dans la planification des opérations d'exploitation (V3), reporting auprès de PPECF	77	
Samuel Quevauvillers (Gembloux Agro-Bio Tech)	Réglages drones, pilote drone confirmé - acquisition imagerie drone, démarches achat de drones, prétraitement de données drone (V2)	32	
Chloé Dupuis (Gembloux Agro-Bio Tech)	Collecte de données terrain de validation, acquisition imagerie drone (co-équipier), valorisation de l'imagerie drone dans le suivi des perturbations forestières (V4)	11	
Philippe Lejeune (Gembloux Agro-Bio Tech)	Valorisation de l'imagerie drone dans le suivi des perturbations forestières (V4), supervision scientifique et technique	20	
<b>Nature+ - Coordination</b>			
Charles Bracke	Etablissement et suivi des contrats de collaboration et de subvention, suivi des activités du Consortium Nature+ / SunBirds / TER-Consult / GxABT, contributions techniques dans le domaine de la certification forestière, vulgarisation des résultats, appui logistique et reporting auprès du PPECF	42	
Marie-Alice Noizet	Suivi administratif et financier	10	
<b>Missions organisées sur les sites pilotes</b>			
Site Pilote	Personnel mobilisé	Matériel mobilisé	Période (dates)
<b>IFO-Interholco - Congo</b>			
Mission 1 : Acquisitions images drones avant exploitation (pour volets 3 et 4)	Hubert Dubois (CEAtech), Radhouene Azzabi (CEAtech), Charles Doumenge (CIRAD), Juliana Prosseri (CIRAD), Loïc Dutrieux (CIRAD), Laurent Rivière (SB), Olivier Chenoz (SB), Sébastien Bauwens (N+ - TER)	2 ailes fixes (avions) et 1 multicopter	11/02/2019 - 27/02/2019
Mission 2 : Acquisition images drones après exploitation (V4) et avant exploitation (V3)	Sunbirds (Julien Olé et Laurent Rivière), CIRAD (Charles Doumenge, Juliana Prosseri, Loïc Dutrieux), Université Marien Ngouabi (Gaël Bouka)	2 ailes fixes (avions) et 1 VTOL	29/08/2019-04/10/2019
Mission 3 : Formation	Juliana Prosseri, CIRAD ; Charles Doumenge, CIRAD ; Gaël Bouka, UMN	1 aile fixe (avion) Tigerwing, logiciel Belvédère	2 au 24 février 2022
<b>Pallisco - Cameroun</b>			
Mission 1 : Acquisitions images drones avant exploitation (pour volets 3 et 4) + petite formation	Samuel Quevauvillers (GxABT), Chloé Dupuis (GxABT), Sébastien Bauwens (N+ - TER), Cyril Cabrit (GxABT)	1 aile fixe (avion) et 1 multicopter	11/07/2019 - 20/07/2019
Mission abrégée/annulée	Cyril Cabrit (GxABT)	multicopter	Février - mars 2021
Mission 2 : Acquisitions images drones avant exploitation (pour volets 3 et 4)	Samuel Quevauvillers (GxABT), Chloé Dupuis (GxABT)	2 VTOL	12/08/2021 - 28/08/2021

Tableau 0.2 : Calendrier des activités menées pendant la période d'activités du projet iDROCertification.

Actions	Site	2019				2020				2021				2022	
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2
<b>Volet 1 : Protocole d'expérimentation sur site</b>															
V.1.1	Acheminement des drones et capteurs multispectraux	Congo	Avion, multi		Avion multi										
		Cameroun	Avion						VTOL						
V.1.2	Identification des sites pilotes d'étude	Congo	Site1		Sites 1-4										
		Cameroun			Sites 1-2							Sites 3-4			
V.1.3	Adaptation et configuration du système drone-capteur aux conditions locales	Congo													
		Cameroun										VTOL			
V.1.4	Ajustement des paramètres de plan de vol	Congo													
		Cameroun													
V.1.5	Vols d'essais et analyses	Congo													
		Cameroun													
V.1.6	Formation	Congo													
		Cameroun													
V.1.7	Vols de production (vols avant et après exploitation d'une AAC+1 vol correctif)+ relevés gps	Congo	Site1		Sites 1-4										
		Cameroun			Sites 1-2							Sites 3-4			
<b>Volet 2 : Prétraitement des données drones</b>															
V.2.1	Ajustement logiciel	Congo													
		Cameroun													
V.2.2	Production d'orthophotos multispectrales et de MNS	Congo													
		Cameroun													
<b>Volet 3 : Aide à la planification des opérations d'exploitation</b>															
V.3.1	Création d'une base de données géographique	Congo													
		Cameroun													
V.3.2	Production de supports cartographiques dérivés de l'imagerie drone	Congo													
		Cameroun													
<b>Volet 4 : Suivi des perturbations forestières</b>															
V.4.1	Relevés terrain pour validation des données drone	Cameroun													
V.4.2	Développement d'une chaîne de traitement	Congo													
		Cameroun													
V.4.3	Génération d'informations pour l'écocertification	Congo													
		Cameroun													
<b>Volet 5 : Communication sur drone-gestion forestière</b>															
V.5	Communication sur l'apport de la technologie drone en gestion forestière tropicale														

## 1. Volet 1 (activités 6.1.1 à 6.1.7) - Etablissement d'un protocole "modèle" d'acquisition d'images drone transposable dans différentes entreprises

Ce premier volet a été mené conjointement par Nature+, Sunbirds, TER-Consult avec l'appui de Gembloux Agro-Bio Tech, CEA Tech, CIRAD.

Cinq missions d'acquisition d'images et de formation ont été menées pendant la période de mise en œuvre du projet iDROC :

- Trois missions chez IFO/IHC au Congo ;
- Deux missions chez Pallisco au Cameroun.

Les deux premières missions, de chaque site, visaient à collecter les données drones avant exploitation. Une formation d'initiation aux drones envers des membres de la cellule d'aménagement a également été réalisée chez Pallisco lors de cette première mission. La deuxième mission chez IFO/IHC a permis de collecter les données drones après exploitation sur le site d'étude et d'acquérir des images sur d'autres sites encore non exploités (3 blocs de vol supplémentaires) pour enrichir le jeu de données de détection automatique des essences (voir volet 3). Chez Pallisco, les contraintes logistiques et matérielles étaient telles que le site survolé lors de la première mission n'a pas pu être survolé après l'exploitation. Un autre site post-exploitation, proche de la base-vie a par contre été survolé. La troisième mission chez IFO/IHC était dédiée à la formation de membres du personnel d'IFO/IHC et du projet PROGEPP Ngombé (Partenariat de Gestion des Ecosystèmes Périphériques du Parc national d'Odzala-Kokoua).

### 1.1. Les démarches et l'acheminement du drone dans les entreprises au Congo et au Cameroun

#### **Démarches et acheminement des drones sur le site d'IFO/IHC au Congo**

Afin de faire transiter les 2 drones Sunbirds de type Tigerwing sur le site d'IFO/IHC, il a été choisi de transporter l'ensemble du matériel dans trois cartons. Ces cartons ont voyagé par avion, comme bagage en soute, en même temps que l'équipe. Afin de garantir le succès de la mission, ces derniers contenaient non seulement les drones, mais aussi un kit complet de maintenance ainsi que des pièces de rechanges.

**Tableau 1.1 : Contenus des trois cartons pour faire transiter les 2 drones Sunbirds de type Tigerwing sur le site d'IFO/IHC.**

Carton 1	Carton 2	Carton 3
Fuselage	Fuselage	Batteries 4S
Ailes	Ailes	Radio Spektrum
Stab	Dérives	Chargeur Sony + 3 batteries
Hélices	Hélices	RFD
Sony RX100	Sony RX100	Clé d'ailes
Batterie 4S	Batterie 4S	Tube de queue carbone
	Support mousse RedEdge	Antenne
		Trépied

		Scotch armé
		Scotch téflon
		Scotch blanc
		Servos
		Câbles Seagull
		Avionic (mRo, Drotek, gaine)
		ESC
		Fer à souder + étain
		Câbles USB
		Carte SD 64Go
		Chargeur LiPo
		Stab CONGO2



**Figure 1.1 : Cartons avec les 2 drones Sunbirds de type Tigerwing arrivés à Brazzaville au Congo.**

Afin de transporter les batteries conformément à la réglementation des compagnies aériennes, l'ensemble d'entre elles a été réparti en bagages à main dans des sacs ignifuges. S'agissant de batteries LiPo de 10 000mAh, il était autorisé d'en transporter maximum deux par personne.

L'acheminement de ces batteries n'a posé aucun problème durant l'ensemble du trajet.

Durement le vol intérieur Brazzaville-Ouessou, des problèmes de bagages en soute ont été rencontrés. L'avion étant déjà surchargé, l'équipage a décidé de n'embarquer aucun bagage sans prévenir les passagers, avec une arrivée à l'aéroport de Ouessou sans le matériel. Le personnel d'IFO/IHC a dû se charger de l'acheminement de l'ensemble des cartons en véhicule.

En conclusion, l'acheminement des cartons en bagages en soute est une solution simple et fonctionnelle ; elle est peu coûteuse et permet d'avoir le matériel disponible dès l'arrivée sur le site. Afin de pallier aux problèmes liés aux vols internes Brazzaville-Ouessou, une marge de temps devra être prévue par sécurité afin d'éviter d'éventuelles pertes et un retard de planning. Les batteries, quant à elles, devront systématiquement transiter en bagages à main.

Le même protocole a été utilisé pour la deuxième mission, avec cette fois deux cartons contenant à la fois le drone VTOL ainsi que les pièces détachées. Les drones VTOL ont la particularité de pouvoir décoller et atterrir verticalement tout en bénéficiant d'une durée de vol avantageuse pour le survol de grandes surfaces. Ce type de drone est particulièrement utile en forêt, car l'espace disponible pour les phases de décollage et d'atterrissage est extrêmement réduit à cause de la canopée. Le décollage/atterrissage vertical permet alors de décoller sans

difficulté en évitant les arbres environnants, et cela en toute sécurité. Du matériel de maintenance et de l'équipement électronique ont été placés dans une valise. L'acheminement s'est cette fois passé sans encombre, étant donné que les vols internes Brazzaville-Ouesso étaient annulés. Le trajet a été effectué par voiture avec l'ensemble du matériel.



Figure 1.2 : Valise de transport du matériel (équipement et maintenance).



Figure 1.3 : Carton utilisé pour le transport du drone.



Figure 1.4 : Montage du drone VTOL sur le site d'IFO/IHC.

A la fin de la seconde mission, le drone VTOL a été ramené en Europe ainsi que tout l'équipement de maintenance (outillage, spare parts etc). Ce drone VTOL a été ramené afin de pouvoir bénéficier des récentes améliorations logicielles de Sunbirds pour les prochains développements.

Les équipements restés sur place correspondent au matériel nécessaire pour opérer les deux Tigerwings restés sur site, à savoir :

- 5 Chargeurs LiPo ;
- 7 batteries 4S 10 000mAh ;
- 1 Radio Spektrum ;
- 1 RFD + antennes + cavaliers ;
- 2 Sony RX100II ;
- 1 Mir Micasense ;
- 1 Antenne haut-gain 915Mhz ;
- 1 Trépied ;
- 2 Tigerwings RTF ;
- 2 seagulls safe ;
- 2 seagulls d'origines ;
- 2 seagulls habituels ;
- Supports payloads.

Après la troisième mission, la décision a été prise de rapatrier l'ensemble du matériel au CEA. En effet, les drones ainsi que les pièces détachées ont été achetés par le CEA dans le cadre du projet iDROC et ne peuvent donc pas rester sur le site d'IFO/IHC.

Le tableau suivant récapitule les documents requis pour opérer les drones au Congo.

**Tableau 1.2 : Document nécessaires à l'opération de drones au Congo.**

Contrat d'assurance responsabilité civile de l'entreprise
Fiche technique du drone
Passeport du télépilote
Certificat de compétence du télépilote
Déclaration de niveau de compétences du télépilote
Autorisation de prise de vue du Ministère de l'Intérieur et du Ministère en charge des Eaux et Forêts
Certificat d'hébergement signé par l'entreprise

### **Démarches et acheminement des drones sur le site de Pallisco au Cameroun**

L'expérience acquise durant le projet iDROC a demandé plusieurs phases d'acheminement de drones sur le site de Pallisco au Cameroun. Le type d'acheminement a également varié en fonction du type de drone :

- par container-bateau pour le drone Talon à voilure fixe (type avion) et les deux VTOL (type avion à décollage vertical), le Nimbus de Foxtech et le Deltaquad de Vertical Technologies (figures 1.5 et 1.6) ; et
- par avion, avec le pilote drone allant en mission pour le multicoptère Dji mavic.

L'acheminement par un container de la Société Pallisco a été privilégié pour les drones de grande envergure afin d'éviter des complications lors du passage de la douane. En effet, le pays était en état d'alerte sécuritaire suite à des événements terroristes ayant eu lieu au nord du pays. Les drones expédiés par bateau sont arrivés au port de Douala et ont été acheminés jusqu'à Mindourou (Pallisco) par voiture.

L'emballage des drones étaient des caisses en carton avec des mousses à l'intérieur pour le Talon et le Nimbus et une caisse renforcée pour le Deltaquad (voir photo de gauche, figure 1.6).

L'acheminement des batteries a également différé en fonction du drone. Les batteries de l'aile fixe (Talon) ont été acheminées par avion avec deux experts drone lors de la première mission. Les règles de l'International Air Transport Association (IATA) concernant le transport de batteries contenant du lithium<sup>1</sup> dans des avions passagers restreignent le nombre de batteries transportables par voyageur à 15 si elles ne dépassent pas la valeur 100 Wh et à deux si elles ont une valeur comprise entre 100 et 160 Wh. Les deux experts ont donc acheminé deux batteries de 120 Wh chacun pour le drone Talon et également un petit drone multicoptère (mavic de Dji) avec 6 batteries. Pour les drones VTOL, les batteries de plus de 270 Wh dépassent donc largement la limite de 160 Wh maximum pour les avions passagers. Ils ont donc été acheminés par bateau en même temps que les drones.



Figure 1.5 : L'aile fixe (type avion) Talon avec sa rampe de lancement sur le site de décollage étroit (route forestière).



Figure 1.6 : A gauche, Deltaquad en décollage à la base-vie. A droite, Nimbus de Foxtech sur le site de décollage (route forestières). Tous les deux, type avion à décollage vertical (VTOL).

<sup>1</sup> <https://www.helicomico.com/2018/05/17/voyager-avion-drone-batteries-regles-2018-iata/>

## 1.2. L'identification des sites pilotes d'étude au Congo et au Cameroun

### Identification des sites pilotes chez IFO/IHC au Congo

Deux sites pilotes ont été identifiés pour la première mission chez IFO/IHC au Congo. Le premier site a été le dispositif de suivi de croissance des arbres. Servant de parcelle de recherche, cette zone de 200 ha était facile d'accès et permettait de réaliser les premiers vols en gardant une certaine réactivité en cas d'imprévu (possibilité de rapidement revenir à la base si nécessaire). Les différents vols réalisés sur cette petite parcelle ont permis de rapidement affiner le protocole d'acquisition des données (préparation et planification des vols, altitude optimale, vitesse, résolution des images, overlap). Une fois l'ensemble des paramètres définis, la seconde zone a été considérée pour de l'acquisition d'images drone à haute échelle.



Figure 1.7 : Localisation du dispositif de 200 ha de suivi de croissance (IFO/IHC).

Le second site est un dispositif de 3.000 ha de l'assiette annuelle de coupe 2019. Il a été défini de manière à reprendre un maximum de types de forêts présents dans l'AAC 2019. Le dispositif contient également un baï qui peut servir de référence pour la calibration spectrale du capteur multispectral. L'emplacement du dispositif prenait également en compte la contrainte d'accessibilité du dispositif pour effectuer les relevés terrain nécessaires dans le cadre du projet iDROC (identification de l'espèce, géolocalisation, description du houppier et mesure du diamètre). Le dispositif a donc été placé de manière à ce que des routes s'y trouvent. La couche cartographique des routes datait cependant de plusieurs semaines, l'ouverture de routes supplémentaires a donc eu lieu dans le dispositif avant les vols drone iDROC. Ces routes ont donc été prises en compte de manière indirecte dans le cadre de la détection des perturbations de l'exploitation forestière.

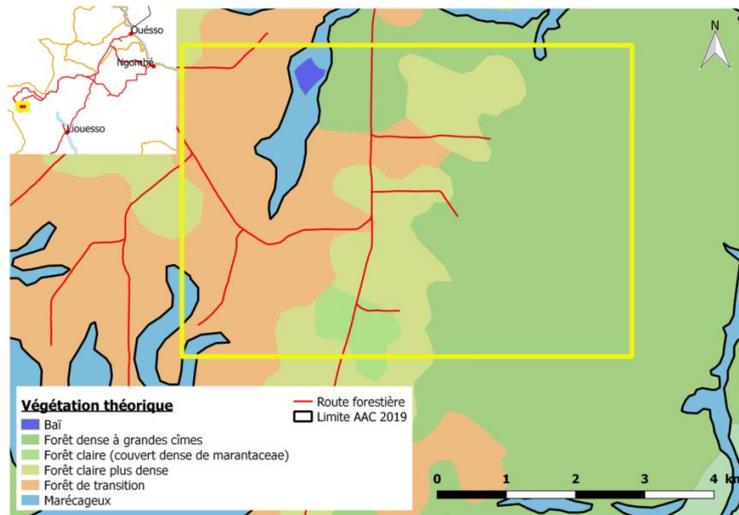


Figure 1.8 : Dispositif de 3.000 ha situé dans l’assiette annuelle de coupe 2019 et survolé par drone. Les vols drones de la première mission ont été réalisés avant l’exploitation des arbres et un second survol a été réalisé après l’exploitation et l’évacuation des grumes (IFO/IHC).

### Identification des sites pilotes chez Pallisco au Cameroun

Le site d’essais était la base-vie de Pallisco, dont le terrain de football a servi comme piste de décollage/atterrissage. Le premier site pilote identifié chez Pallisco était l’AAC 2019 se situant dans l’UFA 10 030-031 où se trouve la base-vie de Makalaya. L’ACC 2019 de Makalaya a été sélectionnée, car elle se trouve dans une forêt dense à canopée fermée avec relief contrasté. Le second site de vol est l’AAC 2021 de l’UFA 10 041-42-43, proche de la base-vie principale de Mindourou (figures 1.9, 1.10, 1.11).

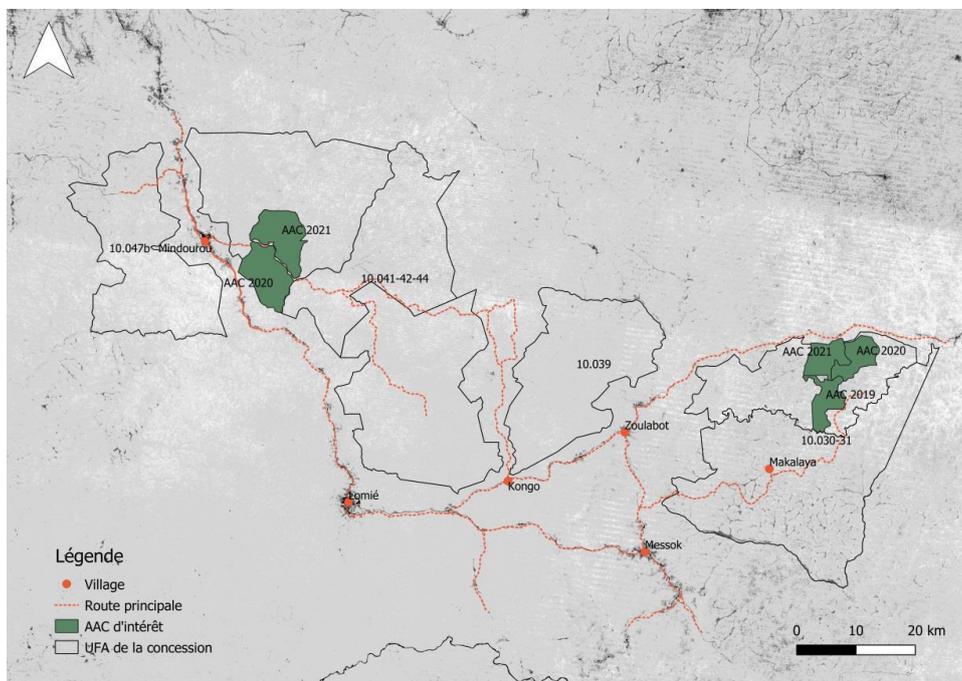


Figure 1.9 : Carte des concessions forestières de Pallisco avec la localisation des AAC initialement identifiées pour réaliser les vols (Source du fond de carte : Hansen et al., 2015).

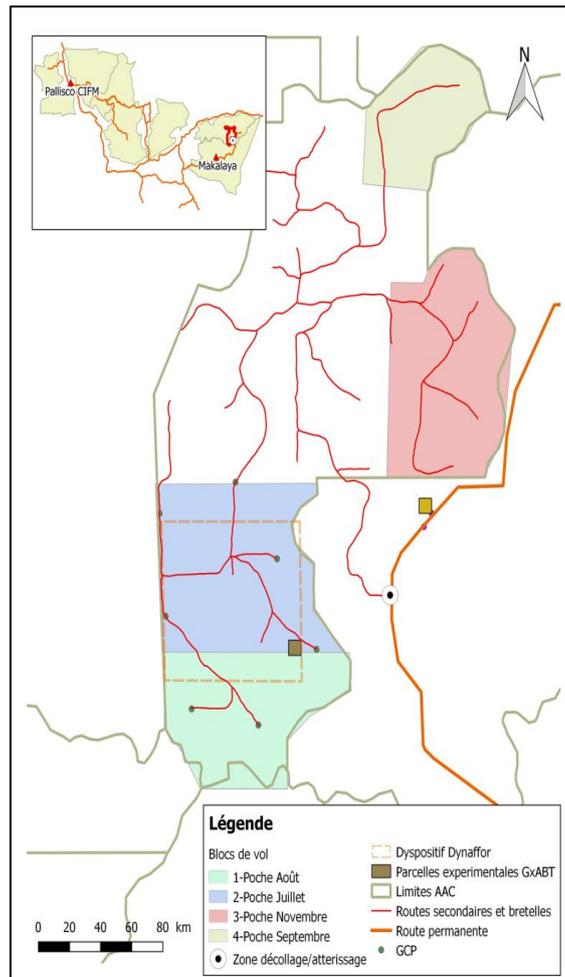


Figure 1.10 : Site d'étude, chez Pallisco au Cameroun, survolé par drone. Le site est l'AAC 2019 de l'UFA 10 030-31 dans laquelle 4 blocs de vols ont été réalisés lors de la première mission sur le projet iDROC.

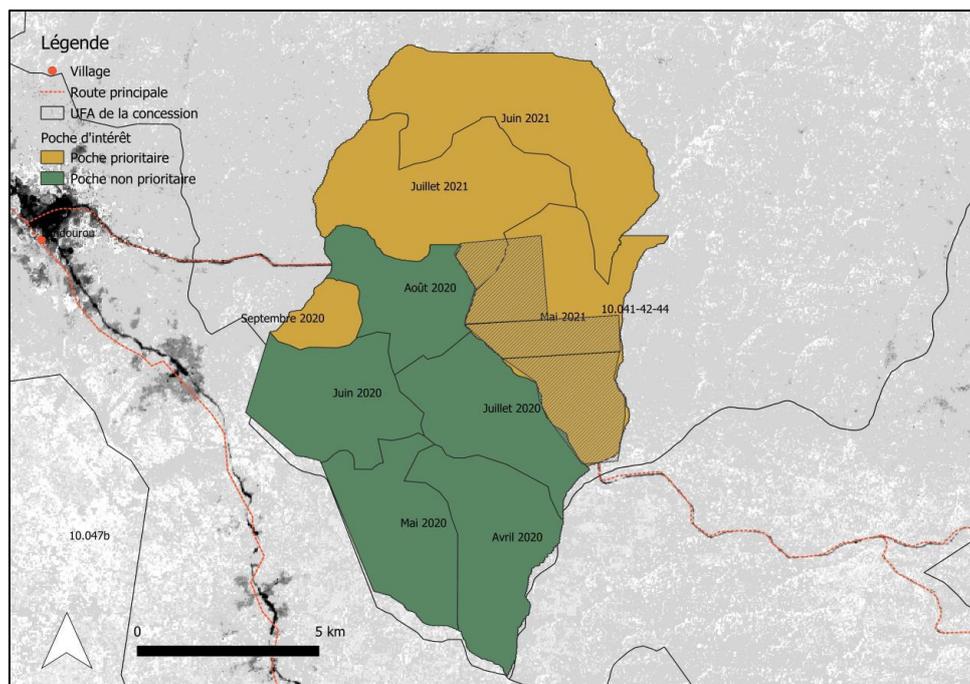


Figure 1.11 : Poches d'exploitation des AAC 2020 et 2021 de l'UFA 10 041-42-44 avec, en hachuré, les blocs de vols survolés lors de la seconde mission sur le projet iDROC (esquisse de carte, Pallisco).

### 1.3. La configuration et l'adaptation des drones aux besoins de l'étude

#### Configuration et adaptation des drones

De nombreux paramètres ont été pris en compte pour proposer une solution drone adaptée au contexte des entreprises forestières en milieu tropical.

En début de projet iDROC, un choix important a porté sur le type de drone à déployer pour les premières missions : voilure fixe ou voilure tournante (figure 1.12). Les drones à voilure tournante (multicoptère) ont l'avantage de décoller verticalement, ce qui permet le décollage du drone dans un espace assez restreints (5-10 m x 5-10 m). Par contre, l'endurance de ce type de drone est de 20 à 30 minutes. L'objectif de cartographier des grandes surfaces forestières au travers du projet iDROC était difficilement atteignable avec ce type de drone qui permet le survol de 20 à 25ha/batterie.

Le drone à ailes fixes a l'avantage de pouvoir couvrir d'importantes superficies en un vol (entre 100 et 700 ha/vol). Par contre, il est nécessaire de pouvoir disposer d'un espace dégagé de plus de 100 à 150 m de long et de 25 à 50 m de large pour décoller et faire atterrir le drone. Certaines routes forestières permettent d'obtenir cet espace. Le choix s'est donc porté sur l'usage de drones à ailes fixes de petites envergures : le Tigerwing chez IFO/IHC au Congo et le Talon chez Pallisco au Cameroun.



Figure 1.12 : A) drone à voilures tournantes (multicoptère), B) Tigerwing, un drone à voilure fixe.

Les premiers vols avec les drones à voilure fixe (Tigerwing et Talon) sur chaque site ont été réalisés par des pilotes de drones expérimentés et chevronnés. Malgré cela, il s'est avéré que les drones à ailes fixes sont compliqués à mettre en œuvre à partir des pistes forestières. En effet, les phases de décollage et d'atterrissage sont les moments les plus délicats et risqués d'une mission drone complète. Or, les conditions de visibilité sur des pistes forestières sont régulièrement limitées et l'espace nécessaire pour ces phases délicates sont difficilement rencontrées. Afin de permettre un usage du drone plus autonome par les entreprises et réduire les risques de crash du drone, le développement et l'acquisition de solution drone de type VTOL (vertical takeoff and landing) ont été initiés durant la mise en œuvre du projet iDROC (figure 1.13).



Figure 1.13 : Drone VTOL (Vertical Takeoff and Landing) développé par Sunbirds.

Le relevé de points géographiques (GCP : Ground control point) au sol est une étape particulièrement chronophage et énergivore. Il faut disposer des cibles sur le sol à plusieurs endroits du site (figure 1.14), les géolocaliser avec un gps, repérer ces cibles sur les images drones avant de générer les produits orthophoto. Afin de ne plus avoir besoin de GCP, la technologie PPK (Post Processed Kinematic ou cinématique post-traitée) a été intégrée aux drones. Ce qui a permis de considérablement faciliter les opérations par la suite.

Le PPK est une technologie de positionnement par satellite qui fonctionne avec deux modules : une base située au sol et un module « rover » situé dans le drone (figure 1.15). Durant le vol du drone, la base et le rover enregistrent leurs données de positionnement. Une fois la mission terminée, ces données sont alors croisées pour obtenir des géolocalisations avec une précision centimétrique alors qu'usuellement la précision horizontale comporte une erreur de +/-5m. La technologie PPK ne nécessite pas de communication entre la base et le rover et n'a pas besoin de cible disposée au sol. Le gain de temps en opération est donc conséquent.

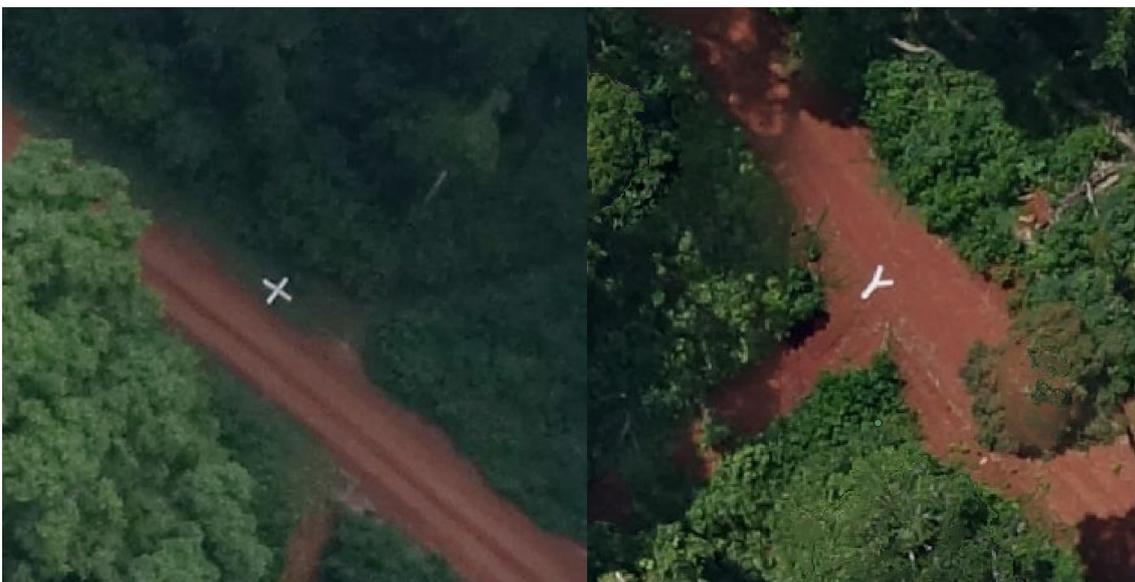


Figure 1.14 : Cibles pour les points de contrôle géographique (GCP).

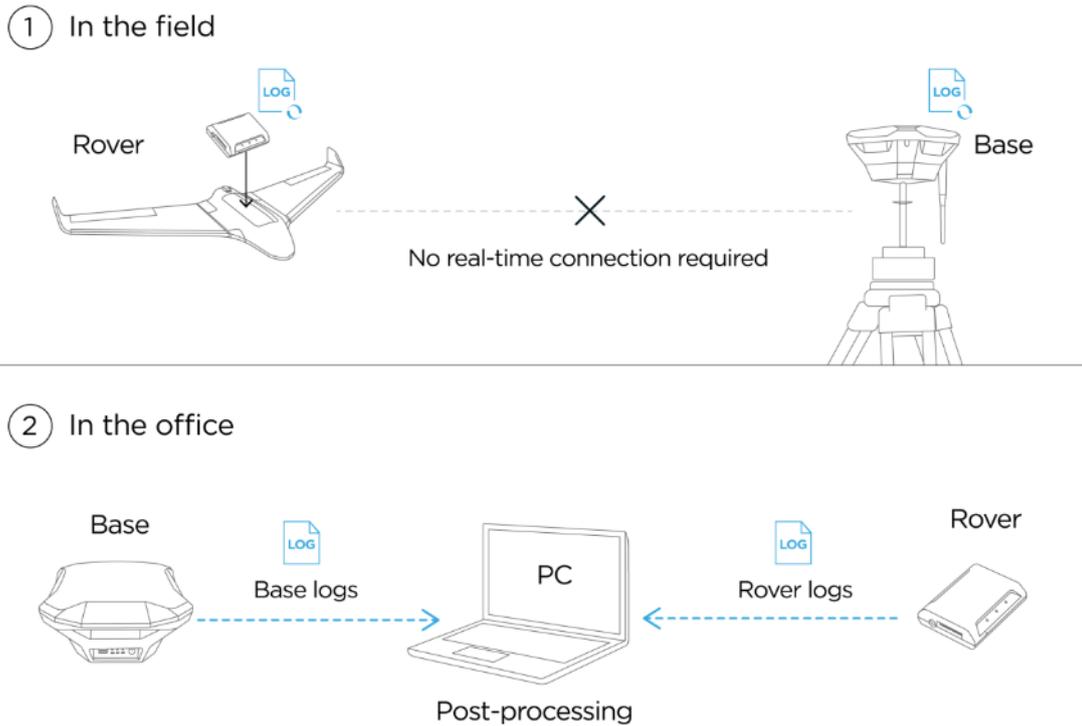


Figure 1.15 : Fonctionnement de la technologie PPK.

### Nécessité de pilote certifié et expérimenté pour les drones de type avion

La mise en œuvre de drones à voilure fixe est particulièrement complexe en environnement forestier en raison des nombreux obstacles présents. Le drone, pour décoller, doit partir en ligne droite et prendre de l'altitude tout en restant sur les pistes et en évitant les arbres. La phase d'atterrissage est tout aussi délicate. Il n'en reste pas moins que les drones de type avion demeurent la meilleure alternative pour pouvoir survoler les milliers d'hectares d'une assiette de coupe. Cela s'explique principalement par leur endurance et leur capacité à pouvoir s'éloigner à plusieurs kilomètres de leur base de lancement. Le retour sur expérience du projet iDROC permet d'affirmer que la meilleure solution pour poursuivre les opérations d'acquisition d'images drone serait de recourir aux services d'un pilote certifié et expérimenté dans ce type de drone. Ce profil pourrait se déplacer pour réaliser des missions ponctuelles ou être sur place à temps plein selon les besoins de l'entreprise.

## 1.4. La définition de plans de vol sur base des informations cartographiques des entreprises forestières et les premiers vols d'essais

### Définition des plans de vol et vols d'essais sur le site d'IFO/IHC au Congo

Le protocole d'acquisition des images RGB retenu pour les besoins du projet iDROC était le suivant : recouvrement des images de 70 % en latéral et de 80 % en longitudinal et une hauteur de vol de 500 m par rapport au lieu de décollage (figures 1.16 et 1.17). La résolution « pixel » des images RGB obtenu est de 12 cm et neuf vols étaient nécessaires pour couvrir le site de 3.000 ha.



Figure 1.16 : Les 9 Plans de vol utilisés pour cartographier les 3.000 ha de l'assiette annuelle de coupe 2019 chez IFO/IHC. Réalisé avec Belvedere (Sunbirds).

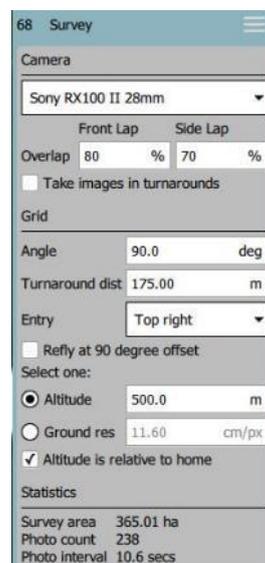


Figure 1.17 : Paramétrage des Surveys de l'assiette de coupe IHC 2019. Réalisé avec Belvedere (Sunbirds).

Les mêmes paramètres et plans de vol ont été gardés pour les deux vols (vols avant et post-exploitation) du site IFO/IHC.



Figure 1.18 : Première mission drone avec Sunbirds, le CEA, le CIRAD, IFO/IHC et Nature+.



Figure 1.19 : Lancement du drone lors d'une mission en forêt (IFO/IHC).

## Définition des plans de vol et vols d'essais sur le site de Pallisco au Cameroun

Le protocole d'acquisition d'images retenu à Pallisco a été le suivant : recouvrement des images de 75 % en latéral et de 80 % en longitudinal et une hauteur de vol de 400 m par rapport au lieu de décollage (lieu qui se trouvait à une altitude équivalente au point le plus haut de la zone d'étude). La résolution « pixel » des images RGB du Talon était de 11 cm et quatre vols ont été nécessaires pour couvrir 2.000 ha de l'AAC (figure 1.20 et 1.21). La résolution des images RGB du Nimbus pour les mêmes paramètres de vol était de 6,25 cm et trois vols ont été nécessaires pour couvrir 1.500 ha.

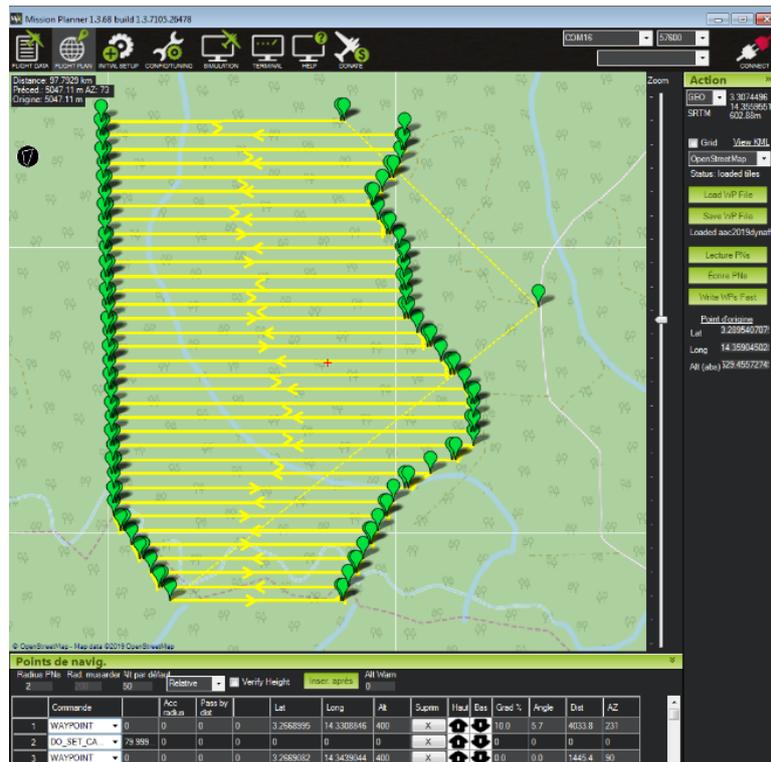


Figure 1.20 : Exemple du plan de vol généré pour l'acquisition d'images drone dans le sud de l'AAC 2019 de Makalya-Pallisco-Cameroun. Réalisé avec Mission Planner (opensource).

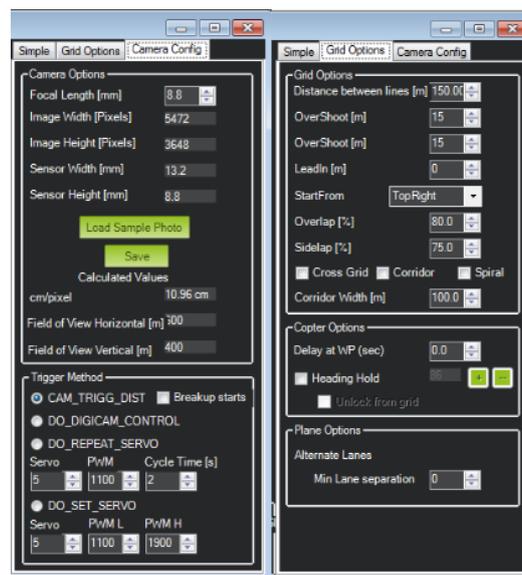


Figure 1.21 : Paramètres utilisés dans les plans de vol chez Pallisco – Cameroun.

## 1.5. Formation drone

Le projet iDROC prévoyait une formation à l'usage de drones sur le site de IFO/IHC, mais une initiation a également été réalisée sur le site de Pallisco.

### Formation sur le site d'IFO/IHC au Congo

Lorsque la troisième mission a été programmée, au premier semestre 2021, il était convenu qu'un membre du personnel de Sunbirds formerait un employé de chez IFO/IHC à la programmation des missions et au pilotage du drone. Toutefois, suite aux reports successifs de cette mission du fait de la pandémie de la Covid-19 et étant donné les difficultés rencontrées par la société Sunbirds, aucun personnel de la société Sunbirds n'était présent au cours de la mission. Pour tenter de pallier ce problème, Gaël Bouka, chercheur à l'Université de Marien Ngouabi et collaborateur du CIRAD sur iDROF, a suivi une formation courte à Toulouse, auprès de Sunbirds, puis il a suivi une formation de plusieurs jours au pilotage de drones (auprès de la société Minutadrone basée à Amiens). Suite à cette dernière formation, il a obtenu son attestation pratique de vol (figure 1.22) ; il lui reste à valider la partie théorique pour obtenir son diplôme officiel de pilote de drone.



Figure 1.22 : Attestation pratique de vol, Gaël Bouka, chercheur à l'Université de Marien Ngouabi.

Malgré ces formations, il s'est rapidement avéré qu'un pilote confirmé aurait dû être présent pour réaliser la formation prévue. En effet, Gaël Bouka a été essentiellement formé sur des drones à décollage vertical, dont le pilotage n'est pas du tout le même que les petits « avions » du type Tigerwing ; ces derniers étant bien plus compliqués à faire voler, surtout en environnement arboré et pour les phases de décollage et d'atterrissage. De plus, les difficultés rencontrées pour la remise en marche du matériel et son bon fonctionnement compliquaient encore la situation. Il a donc décidé de remodeler la formation prévue en une présentation du projet iDROF et des résultats acquis, complétée par une démonstration du logiciel Belvédère

de Sunbirds (logiciel pour la programmation des missions de drones) et une démonstration de vol d'un drone Tigerwing.

Ainsi, une demi-journée d'information-démonstration a été organisée auprès du personnel d'IFO/IHC (le responsable aménagement IFO/IHC et un opérateur de SIG du Service aménagement), un stagiaire de l'ENSAF (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et de Foresterie) accueilli par l'entreprise IFO/IHC, et deux personnes du projet PROGEPP Ngombé (Partenariat de Gestion des Ecosystèmes Périphériques du Parc national d'Odzala-Kokoua). Trois présentations ont été réalisées par l'équipe iDROP sur :

- le cadre général du projet (partenariat, objectifs, méthodes...) et état d'avancement (par Juliana Proseri, CIRAD) ;
- le démonstrateur iDROP et certains résultats du projet (Charles Doumenge, CIRAD) ;
- la structure et le fonctionnement du logiciel Belvédère, ainsi que la préparation d'un plan de vol (Gaël Bouka, UMN).

Cette séance théorique a été suivie par une démonstration de mise en œuvre du Tigerwing sur l'aérodrome d'IFO/IHC, près de la base vie de Ngombé. Elle a consisté à faire les tests de calibrage du drone (en amont du décollage), l'utilisation de la radio-commande et l'analyse du plan de vol. Finalement, un vol sur les forêts environnantes a été réalisé avec succès.

### **Formation sur le site de Pallisco au Cameroun**

Une initiation au pilotage d'un drone multicoptère a été dispensée à des membres du personnel de Pallisco sur les bases-vies mais également sur le terrain (figure 1.23). Une initiation au traitement des données drone pour une valorisation cartographique des images a été réalisée chez Pallisco lors de la première mission. L'entreprise avait, au préalable, identifié des employés pour suivre cette formation de traitement des données (tableau 1.3).

L'appropriation du pilotage du multicoptère s'est faite sans difficulté majeure. Il faut toutefois noter que le pilotage du drone se limitait à un décollage, la prise de photos en altitude et à l'atterrissage. La facilité de pilotage de ce type de drone permet néanmoins d'envisager une appropriation rapide de cette technologie par des membres du personnel. L'apprentissage du traitement des données nécessitait des personnes déjà formées à l'usage de Système d'Information Géographique (SIG). Suite à cette initiation, ce personnel était capable de générer une orthomosaïque et l'afficher sur un SIG. La génération de produits dérivés de ces orthomosaïques tels que présentés dans les volets 3 et 4 du projet iDROC nécessite par contre un personnel très qualifié et une formation de plusieurs semaines/mois.

**Tableau 1.3 : Nom des employés ayant participé à l'initiation au traitement des données drones.**

<b>Nom</b>	<b>Fonction dans l'entreprise</b>
Yannick Nkoulou	Responsable Recherche et reboisement
André Egnégué	Responsable Inventaire et planification
Stephane TCHAKOUDEU	Responsable faune et surveillance des activités illégales



Figure 1.23 : Initiation de membres du personnel de Pallisco au drone multicoptère.

## 1.6. Vols d'acquisition d'images sur d'importantes surfaces

### Acquisition d'images drone chez IFO/IHC au Congo

Une superficie de 3.000 ha a été cartographiée lors de la première mission en février 2019 (avant exploitation) et 10.000 ha ont été cartographiés lors de la seconde mission en septembre 2019 (après exploitation). Dans les 10.000 ha survolés se trouvaient les 3.000 ha déjà cartographiés lors de la première mission. Par conséquent, 3.000 ha disposent des images avant et après exploitation. Ces données ont été traitées de manière à répondre aux activités des volets 3 et 4 du projet iDROC (planification de l'exploitation et suivi des perturbations de la canopée).

Les performances totales atteintes à la fin des campagnes d'acquisition iDROP/iDROC chez IFO/IHC sont les suivantes :

- 18.000 ha cartographiés dont 6.000 ha sur le site iDROC ;
- Plus de 100 vols réalisés dont 16 vols sur le site iDROC ;
- 3.400 km parcourus dont 800 km sur le site iDROC ;
- 70 h de vol cumulés dont 14 h de vol sur le site iDROC (soit environ 250 ha / h).

Les résultats obtenus, tels qu'illustrés ci-dessous, prouvent à quel point l'outil drone peut être intéressant pour l'aide à la planification des opérations d'exploitation et pour le suivi des perturbations d'exploitation.



**Figure 1.24 : Les photos aériennes géo-localisées permettent de mesurer la largeur des routes, des pistes de débardage ainsi que les trouées. Les surfaces exploitées peuvent être localisées et mesurées avec précision.**



**Figure 1.25 : Le suivi de l'exploitation est directement visualisable sur les images obtenues par drone.**



**Figure 1.26 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit (EFIR) survolés par drone – le suivi de l'exploitation forestière certifiées FSC est directement visible (1/2).**



**Figure 1.27 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit (EFIR) survolés par drone – le suivi de l'exploitation forestière certifiées FSC est directement visible (2/2).**

## Acquisition d'images drone chez Pallisco au Cameroun

Lors de la première mission chez Pallisco en juillet 2019 au Cameroun, une superficie de 2.000 ha a été survolée au sein de l'AAC 2019 de Makalaya. Une superficie de 1.500 ha a été survolée lors de la seconde mission. Des vols de courte durée en multicoptère ont également été réalisés sur une dizaine d'hectares avec notamment un capteur multispectral (plusieurs bandes spectrales, dont l'infrarouge). Le pilote expérimenté en vol drone de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech de l'Université de Liège a été sollicité pour réaliser les vols dans le milieu très contraignant qu'est la forêt dense tropicale. Malgré son expérience, la solution drone à voilure fixe s'est avérée peu appropriée (risque élevé de crash sur les arbres bordant les routes utilisées pour les phases de décollage et d'atterrissage), plus particulièrement sur le site de Pallisco qui présente un couvert arboré très fermé et des routes dont les largeurs ne dépassent pas 20-25 m sur une longueur suffisante (100-200 m). Les solutions VTOL récemment mis sur le marché ont dès lors été envisagées et des drones ont été rapidement affrétés pour le site de Pallisco au Cameroun. Le pilote, n'ayant néanmoins pas eu l'occasion de s'entraîner et de tester le matériel au préalable, a éprouvé quelques difficultés à faire fonctionner un premier drone VTOL. Ce drone n'a donc pas pu être utilisé lors de la seconde mission. Après entraînement, un second drone VTOL a été utilisé avec succès et montre l'important potentiel de cette solution. Fort de ces premières expériences d'acquisition d'imagerie drone VTOL, il semble que la solution à moyen terme soit de trouver ou développer des opérateurs drone dans les pays concernés.

Les performances totales atteintes à la fin des campagnes d'acquisition iDROC chez Pallisco sont les suivantes :

- 3.500 ha cartographiés ;
- Plus de 6 vols réalisés ;
- 8 h de vol cumulés (soit environ 450 ha / h).



Figure 1.28 : Routes secondaires d'exploitation forestière certifiées FSC au sein de l'AAC 2019 de Makalaya de la Pallisco au Cameroun.

## 1.7. Résultats attendus / acquis

Le projet iDROC est un projet pilote particulièrement innovant et expérimental, qui regroupe des acteurs spécialisés dans la construction de drones, en valorisation des données drone, en assistance technique en gestion forestière tropicale responsable et des opérateurs forestiers certifiés FSC, afin d'évaluer le réel potentiel de l'imagerie drone pour répondre à certaines exigences légales et de certification du bassin du Congo.

Ce premier volet 1 était crucial, car il conditionnait l'acquisition d'images drone sur de grandes superficies, nécessaires à la poursuite des autres volets, dans un contexte encore très peu exploré de l'exploitation forestière en forêt denses humides tropicales, auprès de concessionnaires forestiers qui ne disposent pas encore de cette technologie.

Malgré les nombreuses contraintes, les résultats attendus dans le premier volet du projet ont globalement été atteints dans les limites des ressources disponibles. Ils sont synthétisés dans le tableau 1.4.

**Tableau 1.4 : Bilan des résultats acquis sur le Volet 1 du projet iDROC.**

Résultats attendus	Site	Résultats acquis lors de la mise en œuvre du projet iDROC
Acquisition des drones	IFO/IHC	2 Tigerwing Sunbirds. 2 drones VTOL Sunbirds.
Acquisition des drones	Pallisco	Les drones utilisés ont été financés par GxABT : - Voilure fixe : 1 Talon ; - Voilure tournante - multicoptère : 1 Dji mavic ; - VTOL (Vertical Takeoff and Landing) : 1 Nimbus de Foxtech et 1 Deltaquad.
Réception des drones dans les entreprises forestières	IFO/IHC	Acheminement des drones par avion avec des passagers. Les drones accompagnaient les experts Sunbirds lors de leur vol international. Les drones ont été acheminés en voiture de Brazzaville à Ngombé (IFO/IHC).
	Pallisco	Acheminement des drones à voilure fixe de Sété (Fr) à Douala (Cam) par un container bateau de la Pallisco. Les drones ont ensuite été acheminés en voiture entre Douala et Mindourou (Pallisco).
Documents d'autorisation de vols	IFO/IHC	Autorisations obtenues du Ministère de l'Intérieur et du Ministère en charge des eaux et forêts, avec toutefois une courte situation de blocage auprès du Ministère en charge des eaux et forêt, le temps de lever l'ambiguïté entre la présente activité de recherche expérimentale et non une activité commerciale.
	Pallisco	Aucune autorisation n'a été nécessaire, dans le contexte d'une activité de recherche expérimentale.
Drones opérationnels	IFO/IHC	Les drones sont arrivés sans dommage à la base vie et ont pu voler dès leur arrivée.
	Pallisco	L'usage du drone à voilure fixe (type avion) dans des conditions de forêt dense à canopée fermée nécessite un pilote chevronné et expérimenté. Le faible nombre de sites potentiels de décollage et le risque important d'accidents rendent peu attractif ce type de drone. L'usage de drones VTOL semble être la solution d'avenir. Cette technologie est néanmoins à ses débuts et les drones sont encore peu fiables. Dans le but de cartographier plusieurs milliers d'hectares, cette dernière solution drone semble être la plus appropriée. Les drones à

		voilure tournante (multicoptères) pour le grand public sont quant à eux utiles pour du repérage vidéo en direct ou pour la prise d'images de zones de petite superficie.
	IFO/IHC - Pallisco	Note importante concernant maîtrise nécessaire pour le pilotage de drones à voilure fixe dans les milieux des forêts humides tropicales : Il y a eu 1 crash de drone au Congo avec un pilote d'aéromodélisme confirmé et 2 crashes au Cameroun (1 à voilure fixe et 1 avec VTOL). Le crash avec VTOL est probablement lié au peu de recul et d'expérience avec l'engin.
Deux membres du personnel des entreprises forestières seront formés à piloter et à prétraiter les données drones	IFO/IHC	Formation d'un télépilote en France chez Sunbirds pour ensuite former le personnel d'IFO/IHC. Réalisation de vols de tests chez IFO/IHC par la personne formée en France. La technicité de la technologie drone a rendu difficile l'appropriation de la solution. Les formations devraient donc être plus longues et l'expérience nécessaire pour opérer les drones à voilure fixe ne doit pas être sous-estimée.
	Pallisco	Deux membres du personnel de Pallisco ont été initiés au traitement des données drone. Ils ont également participé aux essais de vol drone.
Survols de 3.000 ha à 5.000 ha de forêt par site	IFO/IHC	3.495 ha et 10.000 ha ont été cartographiés respectivement lors de la première mission et la seconde mission.
	Pallisco	2.000 ha ont été cartographiés lors de la première mission et 1.500 ha lors de la seconde mission.

## 1.8. Leçons apprises sur le Volet 1 : Etablissement d'un protocole "modèle" d'acquisition d'images drone transposable dans différentes entreprises

En conclusions de la mise en œuvre de ce premier volet 1 du projet pilote iDROC, voici quelques partages d'expériences quant à un protocole "modèle" d'acquisition d'images drone transposable dans différentes entreprises forestières Afrique Centrale.

### **Encadré : Leçons apprises quant à l'acquisition d'images drone dans les massifs forestiers de production des pays du Bassin du Congo : les succès, les difficultés rencontrées et solutions trouvées.**

L'acquisition des types de matériels drones est fonction des usages prévus :

- Drones à ailes fixes pour l'acquisition d'images aériennes de haute résolution sur de grandes superficies (plusieurs milliers d'hectares), car c'est le type de drone ayant la plus grande autonomie de vol. L'usage de ces données permettra :
  - o La cartographie du massif forestier, y compris les types de végétation et son relief, à l'échelle des assiettes annuelles de coupe ;
  - o La détection automatique et la géolocalisation d'essences commerciales, ainsi qu'une estimation du diamètre des essences identifiées par drone ;
  - o La stratification forestière et l'aide à la planification des routes et pistes ;
  - o Le suivi des perturbations de la canopée relatives à l'exploitation forestière ;

- Le repérage de camps permanents de braconniers et d'emprises agricoles dans les limites de la concession ;
- Le cas particulier des Vertical Take Off and Landing (décollage / atterrissage vertical de drone à ailes fixes) permet un usage du drone plus autonome par les entreprises en forêt dense humide tropicale et une réduction des risques de crash du drone.
- Multicoptères pour du repérage vidéo en direct, pour la prise d'images de zones de petite superficie (maximum quelques hectares) ou comme un outil de communication. Ce type d'acquisition permet notamment :
  - Le contrôle et la documentation d'ouvrages d'art, tels que les ponts dans le cadre de l'écocertification par exemple ;
  - L'exploration de proximité permettant d'orienter le chantier sur le terrain (positionnement de buses, digues, ponts etc.) ;
  - Repérage des dégradations anthropiques ou naturelles dans les massifs forestiers de production (sciage illégal près de routes, ou bien repérage des dégâts d'incendies).
- Les modèles, prix et sources d'approvisionnement conseillés issus de l'expérience iDROC :
  - Les modèles conseillés sont les suivants :
    - Nimbus VTOL de FOXTECH, le meilleur rapport qualité/prix ;
    - Baby Shark VTOL de FOXTECH, plus robuste et performant tout en restant dans une gamme de prix raisonnable ;
  - La gamme de prix se situe entre 1.000 € et 10.000€ pour un drone à ailes fixes VTOL ;
  - Le fabricant conseillé suite à notre expérience est FOXTECH<sup>2</sup>. Cette société chinoise s'est avérée réactive et le modèle testé (Nimbus) a réalisé le travail souhaité ;
  - Pour les multicoptères, il est conseillé la gamme Dji mavic, très facile à prendre en main et à un coût très attractif (1000-2000€), avec possibilité du vers le modèle DJI RTK plus onéreux.

L'utilisation de la technologie PPK permet d'améliorer fortement la qualité de la construction de l'orthophoto tout en réduisant un travail contraignant de vérification terrain (GPC). Cette technologie peut être intégrée à tout type de drone (VTOL, aile fixe ou multicoptère).

Des exigences administratives légales doivent être respectées au Congo et au Cameroun pour l'acheminement des drones depuis l'étranger et des autorisations de vols sont nécessaires (voir <https://droneregulations.info/>). Le matériel drone peut être considéré comme un matériel militaire ou d'espionnage et des alternatives peuvent / doivent être trouvées avec les concessionnaires aguerris à l'importation de leur matériel industriel et aux autorisations de recherche scientifique appliquée expérimentale. Les contraintes d'importation et la gestion des batteries en suffisance est également un point d'attention.

---

<sup>2</sup> Site web : foxtechfpv.com

En particulier pour les drones à aile fixe et VTOL, les vols drones doivent se faire par des pilotes professionnels aguerris, pour une maîtrise nécessaire dans les milieux des forêts humides tropicales.

Une appropriation de la technologie drone en interne par les concessionnaires forestiers peut être envisagée pour les multicoptères et leurs usages.

Vu les contraintes d'acheminement et les lourdeurs d'intervention (en logistique et ressources humaines qualifiées) dans les pays du Bassin du Congo depuis l'Europe, en particulier pour résoudre des problèmes techniques, il est recommandé, dans la mesure du possible, de s'appuyer sur des prestataires spécialisés / pilotes professionnels relais sur place dans les pays cibles pour l'acquisition d'images drones dans les forêts denses humides tropicales en Afrique Centrale (une expérience connue au Gabon avec le projet P3FAC).

Le pré-traitement des données drone (génération d'une orthomosaïque et d'un modèle numérique de surface) peut être réalisé par du personnel de la société d'exploitation forestière spécialisé en cartographie.

La conversion des produits drone générés (orthomosaïque et modèle numérique de surface) en données cartographiques directement exploitables par le concessionnaire forestier nécessite des compétences techniques plus poussées (voir les chapitres suivants). Ces compétences ne sont pas nécessairement présentes dans les sociétés d'exploitation, mais le travail peut être réalisé à distance comme cela a été démontré dans le projet iDROC.

## 2. Volet 2 (activités 6.1.8) - Développement d'un outil informatique de prétraitement des données drones

### 2.1. Outils de prétraitement des données drones

Ce second volet a été mené conjointement par Sunbirds, Nature+ et TER-Consult avec l'appui de Gembloux Agro-Bio Tech et CEA Tech.

Le mode opératoire pour l'exploitation des données drones peut se structurer en 3 étapes :

1. **Acquisition des données drones** : Lors de cette étape, le drone a un plan de vol prédéfini et le parcourt automatiquement. Il prend des photos à intervalle régulier et enregistre les coordonnées de ces dernières dans un fichier dédié.
2. **Géoréférencement des images** : Dans la deuxième étape, les images sont toutes géoréférencées grâce aux coordonnées enregistrées précédemment par le drone. Elles sont alors exploitables par l'outil de prétraitement. Cette étape est assurée par le logiciel Belvédère développé par Sunbirds dans le cas de données acquises chez IFO/IHC et un logiciel spécifique développé par GxABT dans le cas des données acquises chez Pallisco. Cette étape permet donc d'intégrer les positions GPS sauvegardées par le drone dans les images correspondantes. Plus d'informations ici : <https://youtu.be/NiHqOzc9wyI>.
3. **Prétraitement des données** : Grâce à l'outil Metashape Pro, les images sont utilisées pour générer des orthophotos géoréférencées permettant de réaliser des mesures en 3 dimensions : longueur, largeur, hauteur de terrain (figure 2.1). Des modèles d'élévation (Modèle Numérique de Surface) peuvent également être générés (figure 2.2). Plus d'informations ici : <https://youtu.be/hpT9GKiDIU0>

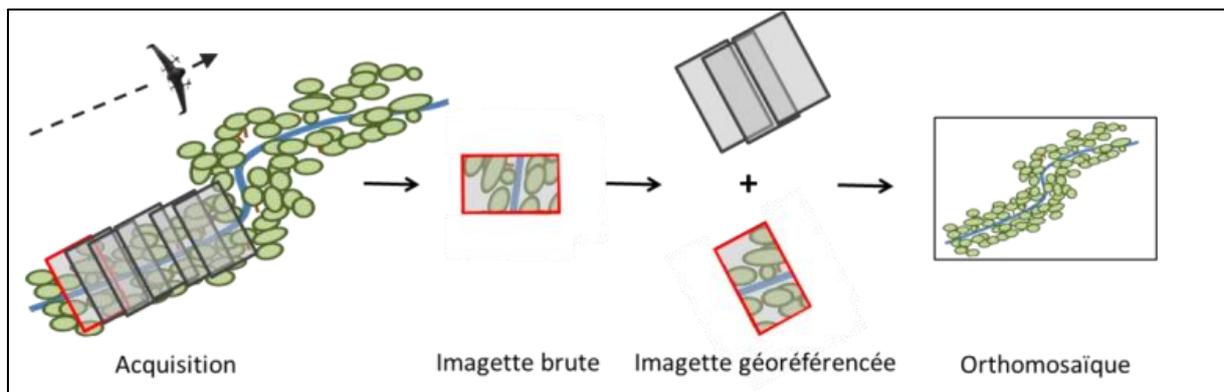
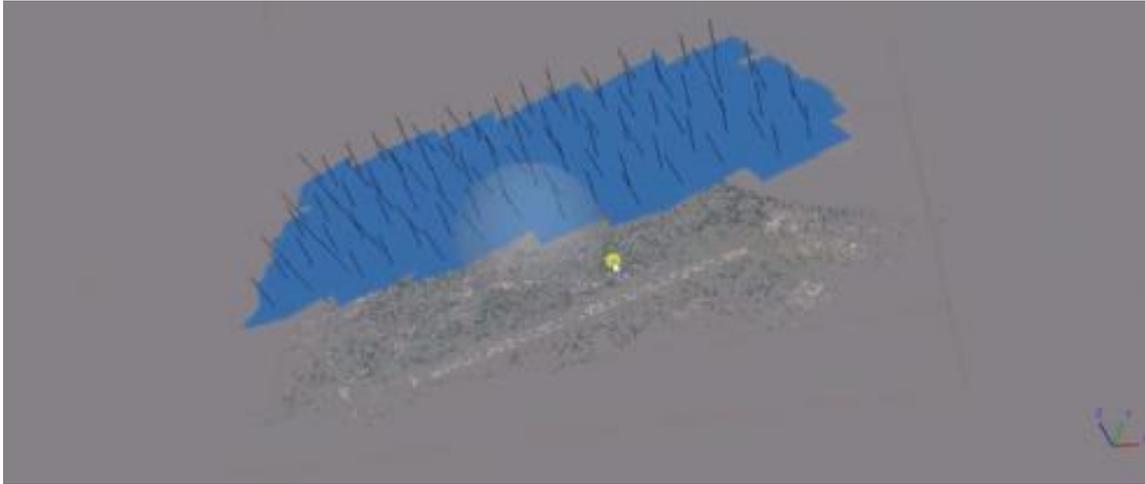


Figure 2.1 : Illustration du mode opératoire de pré-traitement des données drones.



**Figure 2.2 : Illustration de Metashape Pro, permettant de générer les Orthophotos et les modèles d'élévation. Les photos sont alignées et assemblées pour générer une orthomosaique de l'ensemble de la zone survolée.**

Les produits de ces prétraitements ont été centralisés dans une plateforme web de visualisation (webGIS) dont l'adresse web est communiquée par e-mail aux partenaires ainsi que l'identifiant et le mot de passe. L'ensemble des données cartographiques issues des images drones ont été fournies aux bénéficiaires : IFO/IHC et Pallisco.

## **2.2. Protocole spécifique de mise en correspondance des orthomosaiques et Modèles Numériques de Surface des vols avant et après exploitation**

Afin d'assurer la meilleure correspondance géographique (X et Y) et altitudinale (Z) possible entre les vols réalisés avant et après exploitation, un protocole de prétraitement spécifique a été réalisé. Plusieurs options de mise en correspondance des données entre les deux campagnes de vols étaient possibles telles que (figure 2.3) :

1. L'utilisation des données générées séparément en considérant que la géolocalisation des images étaient suffisamment précise pour les deux campagnes de vols (chaque orthomosaique et MNS sont générés indépendamment entre les campagnes de vols) ;
2. L'usage de point de correspondance entre les deux campagnes de vols pour « co-enregistrer » les données des blocs de vols entre eux ;
3. La mise en œuvre de l'alignement des images drones des deux campagnes de vols en même temps.

Les trois options ont été testées et c'est la dernière qui a été retenue. En effet, les données de géoréférencement entre les deux vols n'étaient pas de la même qualité. Nous avons donc favorisé les données de géolocalisation de la première campagne de vol et les images drones du second bloc de vol ont été alignées sur base de correspondances automatiques entre les deux vols et la position GPS du premier vol. La position des images entre les deux campagnes de

vols étaient ainsi cohérentes entre elles. Les orthomosaïques et MNS de chaque bloc de vol sont ensuite générés indépendamment.

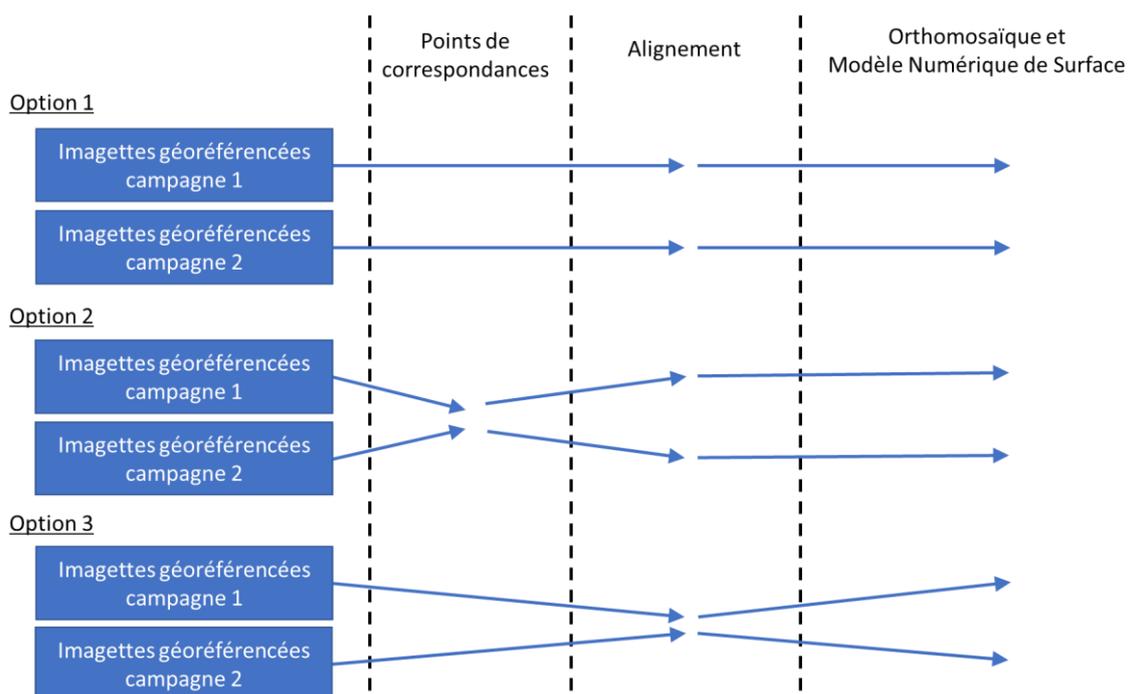


Figure 2.3 : Cadre conceptuel de mise en correspondance des données avant et après exploitation selon 3 options différentes.

## 2.3. Résultats attendus / acquis

L'ensemble des résultats attendus pendant la période de mise en œuvre du projet iDROC a été réalisé (tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Résultats attendus et acquis dans le volet 2 du projet iDROC.

Résultats attendus	Site	Résultats acquis
Orthomosaïques et MNS avant exploitation	IFO/IHC	Les produits ont été générés et consultables sur la plateforme web de visualisation.
	Pallisco	Les produits ont été générés et consultables sur la plateforme web de visualisation.
Orthomosaïques et MNS après exploitation	IFO/IHC	Les produits ont été générés et consultables sur la plateforme web de visualisation.
	Pallisco	Les produits ont été générés et consultables sur la plateforme web de visualisation.
Protocole de traitement	Général	Les vidéos sont en accord avec le protocole de traitement.

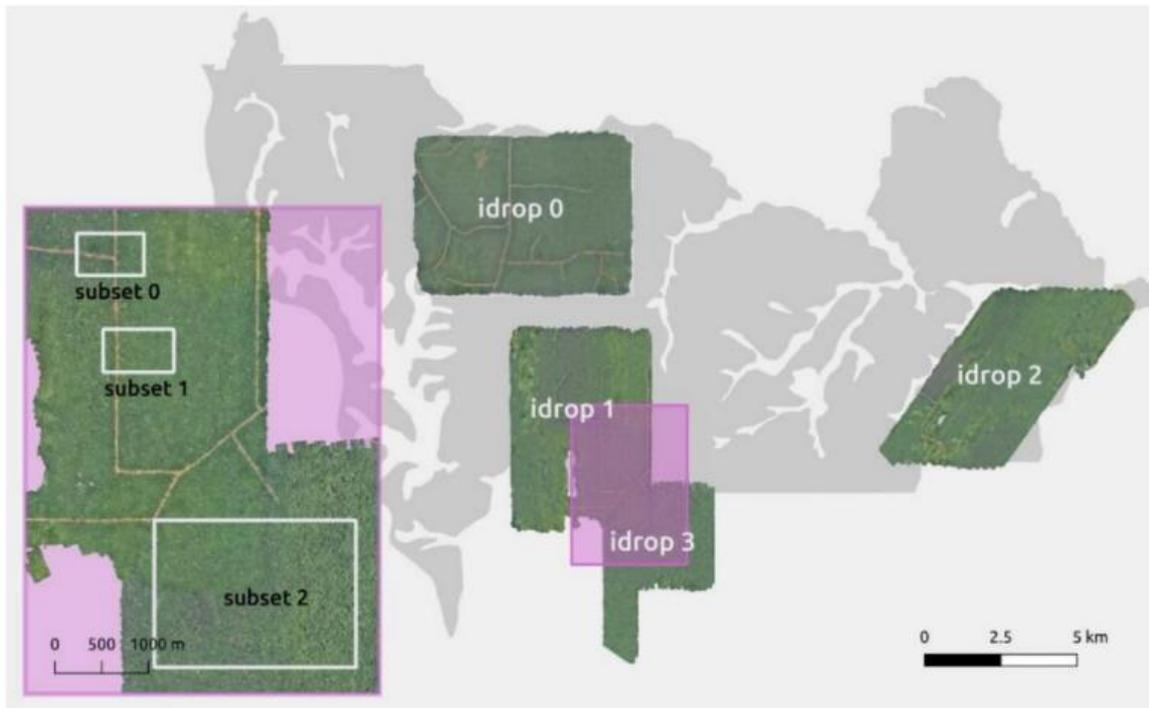


Figure 2.4 : AAC 2019 et zones survolées sur le site d'IFO/IHC.



Figure 2.5 : Exemple des 3.000 ha survolés avant exploitation sur le site d'IFO/IHC, disponibles sur la plateforme web de visualisation.



**Figure 2.6 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC survolés par drone – l'impact d'exploitation est directement visible (1/2).**



**Figure 2.7 : 370 ha d'exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC survolés par drone – l'impact d'exploitation est directement visible (2/2).**

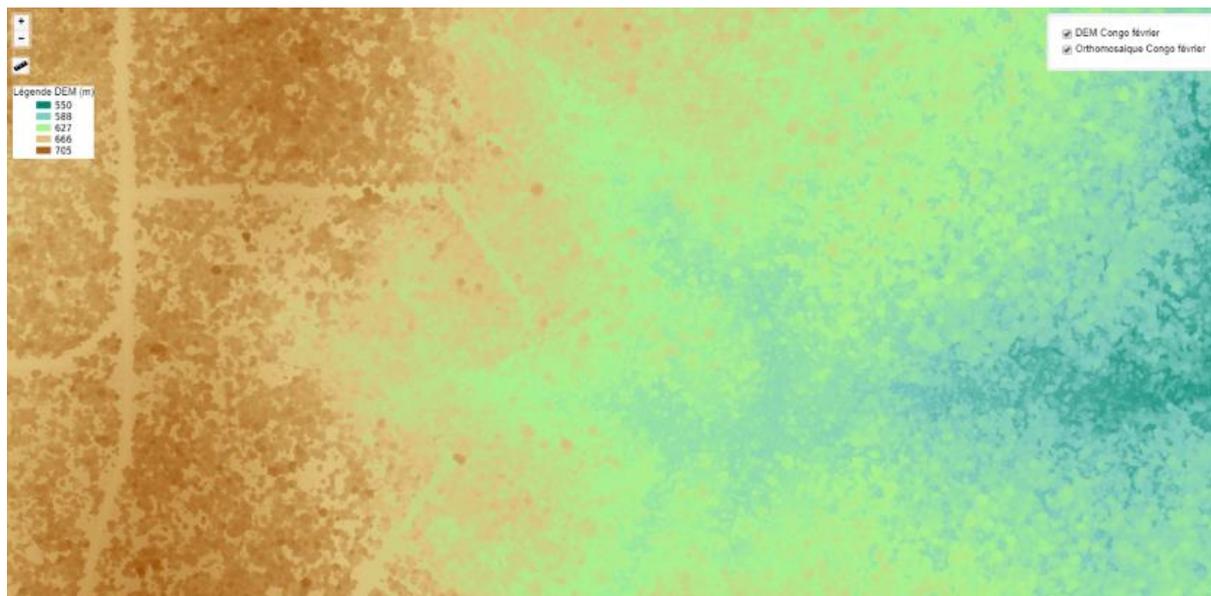


Figure 2.8 : Exemple du modèle numérique de surface des 3.000 ha réalisé sur le site d'IFO/IHC au Congo, disponibles sur la plateforme web de visualisation – modèle d'élévation de surface.

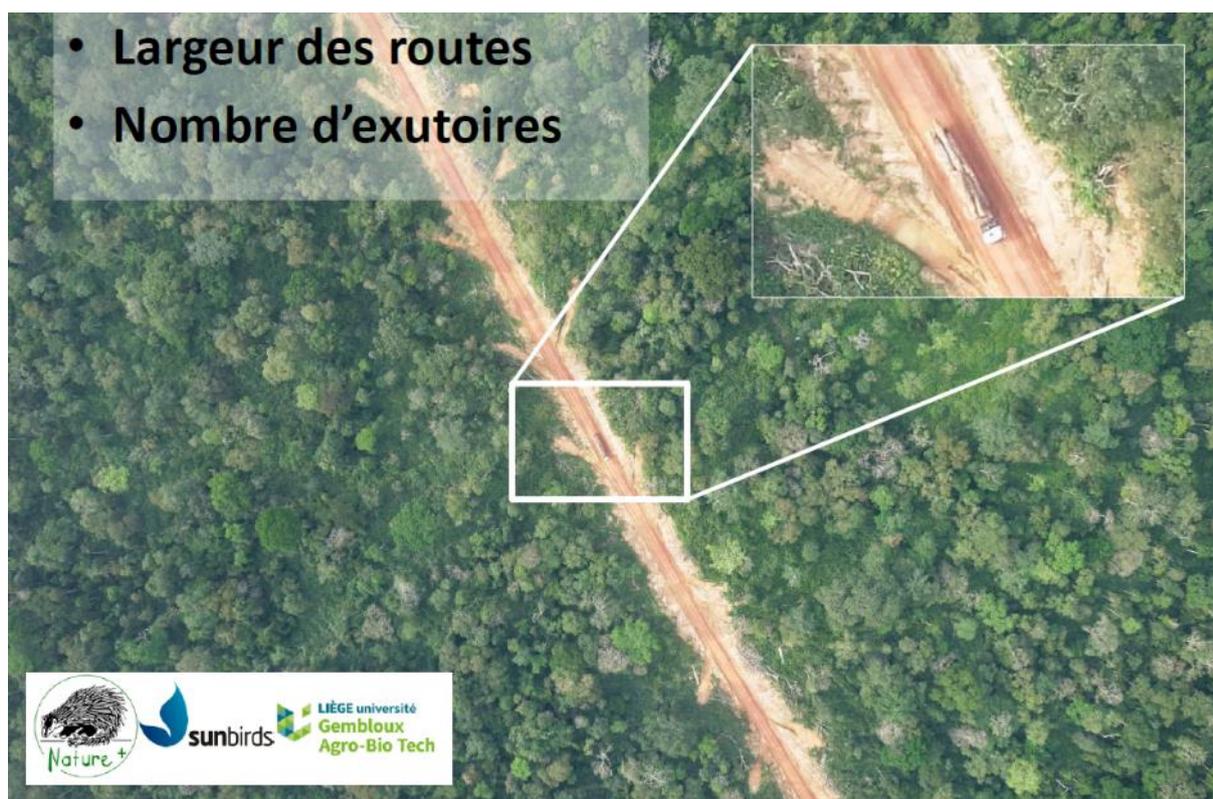


Figure 2.9 : Les photos géolocalisées drones permettent de facilement évaluer la largeur des routes dans une exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC.



Figure 2.10 : Exemple de mesures de suivi de l'exploitation forestière à impact réduit d'une entreprise forestière certifiée FSC réalisées sur base d'une orthophoto drone.

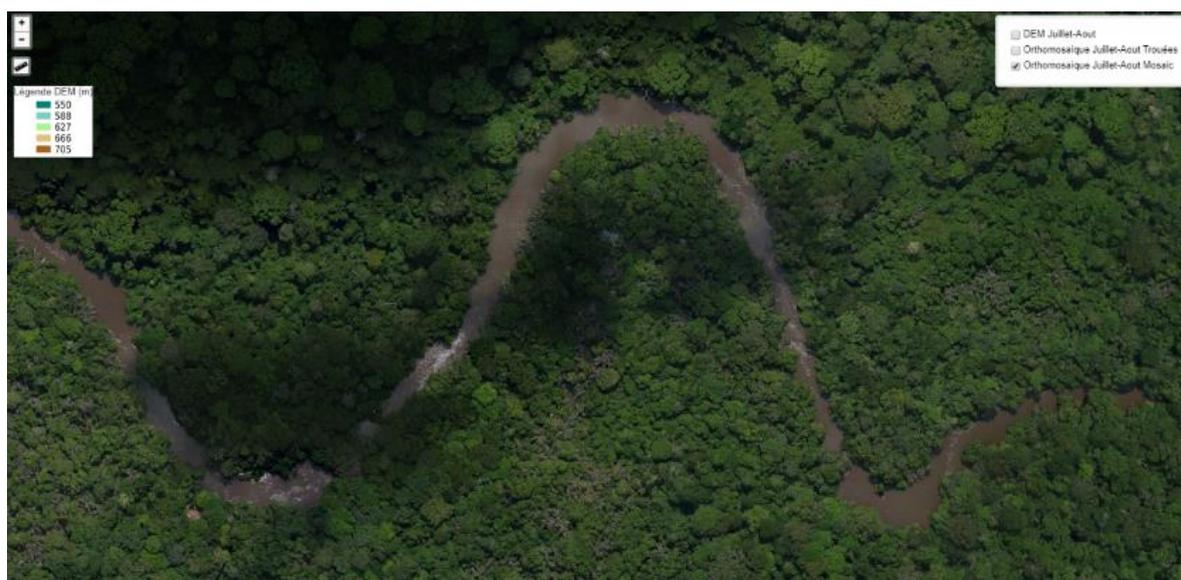


Figure 2.11 : Exemple d'orthophoto obtenue sur le site de Pallisco au Cameroun et disponible sur la plateforme web de visualisation.

### 3. Volet 3 (activités 6.1.9 à 6.1.11) - Développement d'outils d'aide à la planification avec de l'imagerie drone

Ce troisième volet a pour objectif de démontrer le potentiel de l'imagerie drone dans le domaine de la planification des opérations en forêt. Il a été mené conjointement par Nature+ (associée à TER-Consult et Gembloux Agro-Bio Tech) et Sunbirds avec l'appui de CEA Tech, du CIRAD, d'IFO/IHC et Pallisco.

La première action a débuté par la compilation de données cartographiques disponibles au sein des entreprises forestières comme les limites d'AAC, le réseau hydrographique, mais également les informations cartographiques directement liées à l'inventaire d'exploitation (position des arbres exploitables et des éléments contraignants pour l'exploitation). Des données complémentaires ont été récoltées par un expert botanique du CIRAD pour enrichir cette base de données (ex : informations architecturales ou biométrique).

Les données cartographiques ainsi obtenues, plus particulièrement les données d'exploitation, ont été amendées (géoréférencement et digitalisation) pour les essences d'intérêt suivantes : azobé (*Lofira alata*), bossé clair (*Leplaea cedrata*), fraké (*Terminalia superba*), kossipo (*Entandrophragma candollei*) et sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) afin qu'elles soient en parfaite concordance avec les orthophotos des sites au Congo. La parfaite concordance spatiale entre les orthophotos et les données cartographiques de terrain ont permis de développer des algorithmes de détection automatique d'essences et d'autres éléments paysagers contraignants pour une meilleure planification de l'exploitation.

Ces activités ont permis au consortium d'identifier quatre domaines prioritaires pour lesquels la technologie drone peut être intégrée dans la planification des opérations d'exploitation forestière :

- Inventaire : localisation d'essences commerciales tropicales (projet iDROC) ;
- Inventaire : estimation des classes de diamètre des essences identifiées par drone ;
- Stratification forestière ;
- Aide à la planification des routes.

Les résultats expérimentaux obtenus des projets pilotes iDROC et iDROP dans ces quatre domaines sont présentés ci-dessous.

#### 3.1. Inventaire : localisation d'essences commerciales tropicales (projet iDROC)

Le projet pilote iDROC vise à développer une solution drone pour localiser et reconnaître des essences tropicales commerciales afin de faciliter le travail d'inventaire de l'exploitant et de lui donner plus de visibilité sur ses ressources forestières dans les années à venir.

Afin de pouvoir localiser et identifier les essences tropicales, le projet iDROC a choisi de recourir à l'Intelligence Artificielle (IA). L'Intelligence Artificielle est une science permettant à une machine d'apprendre par l'exemple. Cette phase est appelée la phase d'apprentissage (Figure 3.1). Après cette phase, l'IA doit être suffisamment entraînée pour pouvoir être indépendante et reconnaître par elle-même ce qu'on lui a appris (Figure 3.2).

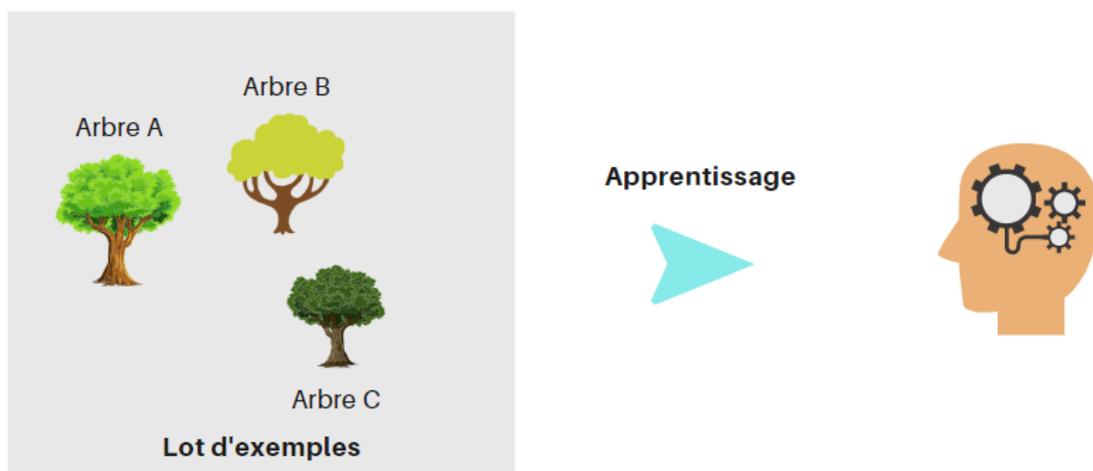


Figure 3.1 : Lors de la phase d'apprentissage, un lot d'exemples de différentes essences est transmis à l'IA, qui apprend à les différencier.

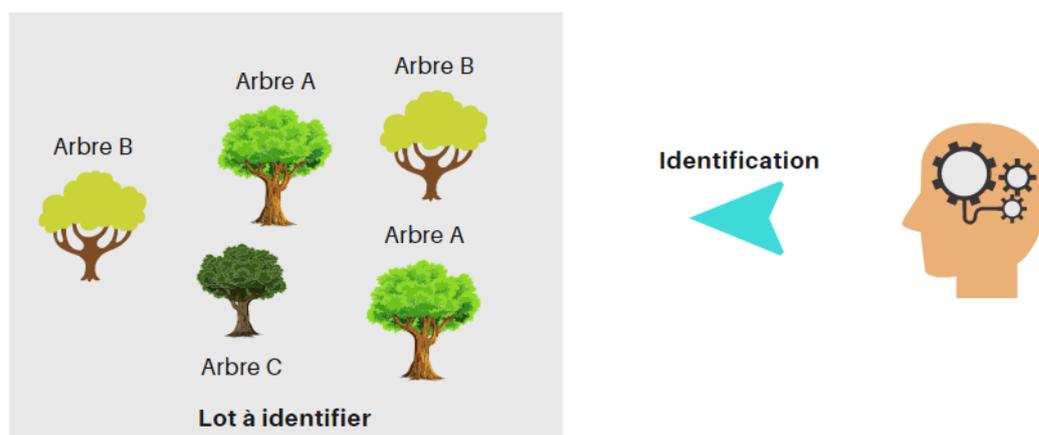


Figure 3.2 : Dans la phase d'identification, un lot d'essences à identifier est transmis à l'IA, qui doit pouvoir les reconnaître et les classer automatiquement.

Dans le cas concret du projet iDROC, l'objectif a donc été de fournir des images drones de l'AAC 2019 à l'IA puis de lui indiquer les différentes essences qui y figuraient. Au total, 9.500 ha de forêt ont été cartographiés par drone pour cette activité. Durant la phase d'apprentissage, l'IA a eu comme exemple d'essences : 136 azobés (*Lofira alata*), 103 bossés clairs (*Leplaea cedrata*), 96 kossipos (*Entandrophragma candollei*), 110 sapellis (*Entandrophragma cylindricum*).

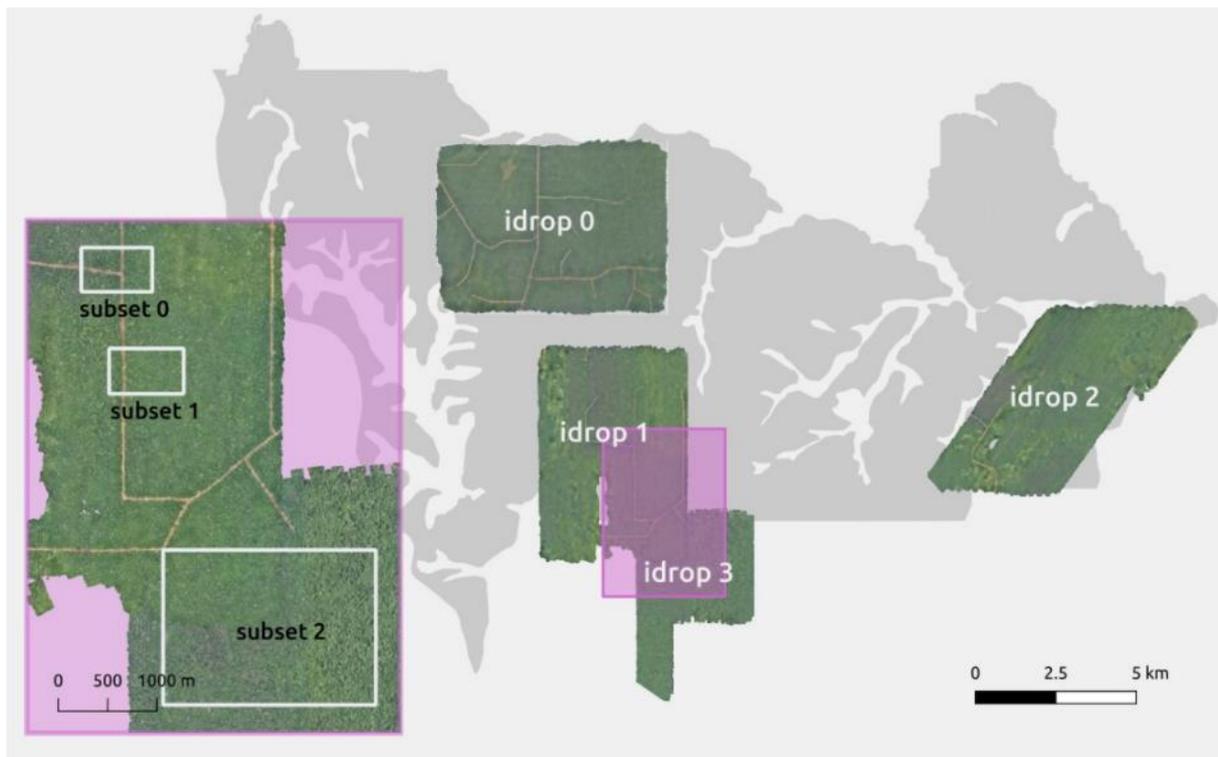


Figure 3.3 : AAC 2019 et zones cartographiées.

Sur l'image ci-dessus, la partie grise représente l'AAC 2019. Les 4 zones vertes représentent les zones cartographiées par drone (idrop 0 à idrop 3). Pour l'apprentissage, les zones idrop 1 et idrop 3 ont été utilisées. La fenêtre mauve représente un zoom sur cette zone. Les rectangles « subset 0 », « subset 1 » et « subset 2 » représentent les zones précises utilisées pour la phase d'apprentissage.

La phase d'identification s'est révélée être un réel succès. **L'IA arrive à correctement reconnaître les 4 types d'essences commerciales : azobé (*Lofira alata*), bossé clair (*Leplaea cedrata*), kossipo (*Entandrophragma candollei*), sapelli (*Entandrophragma cylindricum*).** Sur l'image ci-dessous, le logiciel QGIS utilisé par de nombreux exploitants forestiers. Le fond de carte est l'image drone. En bas à gauche figure la liste des essences reconnues par l'IA (AZO : azobé, BSC : bossé clair, KOS : kossipo, SAP : sapelli). Il est possible de sélectionner les différentes essences pour les visualiser sur la carte. Une fois cochées, des rectangles avec les couleurs correspondantes apparaissent sur la carte. Ces rectangles indiquent l'emplacement des essences. Les nombres à côté des essences représentent le niveau de confiance dans la reconnaissance de l'arbre : 1 étant un niveau de confiance à 100%. Les niveaux varient entre 8 et 100%, l'IA est donc très précise dans son niveau de détection.

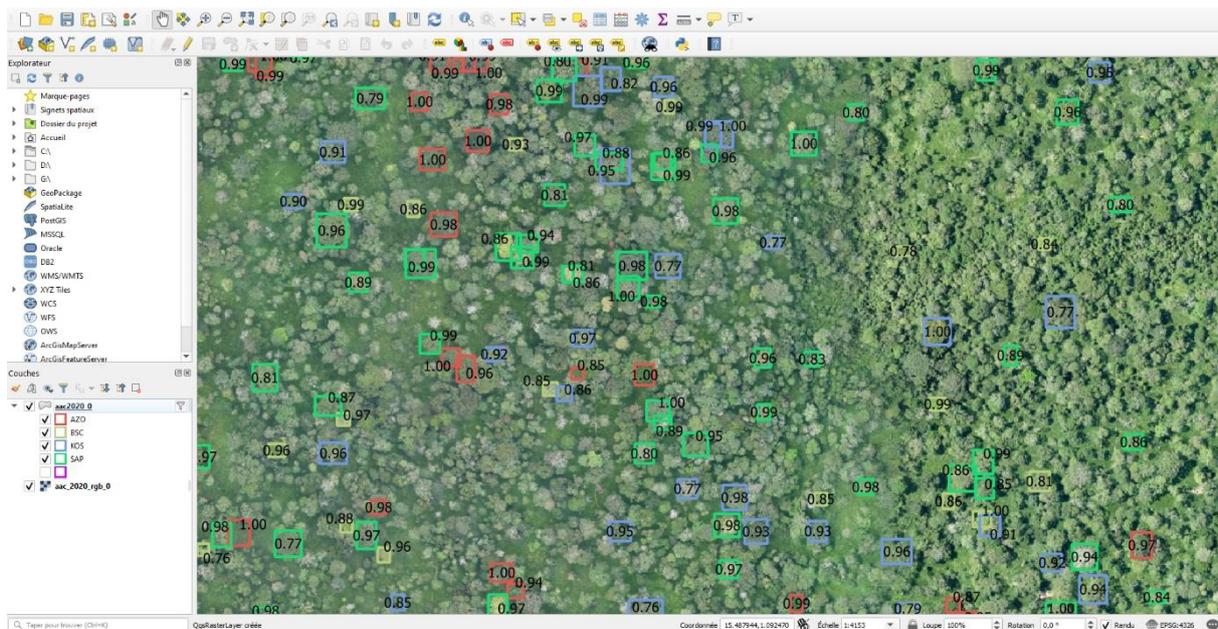


Figure 3.4 : exemple de d’inventaire automatique réalisé par drone.

A l’issue de cette phase concluante d’identification, le Projet iDROP (cofinancement du Projet iDROC à travers les financements FEDER et Région Occitanie), en collaboration avec le programme YSPOT du CEA-Tech, a lancé une étude de design produit ayant pour but de définir une solution informatique visant à faciliter l’inventaire et l’évaluation des ressources des exploitations forestières d’Afrique Centrale. Cette solution a été nommée DeepForest et est présentée dans l’encadré ci-après.

**Encadré : La mise en place d’un service d’inventaire automatisé par drone**

Conçue comme un service intégré, depuis la collecte des images par drone jusqu’au traitement des données, le service DeepForest a pour objectif de proposer une solution permettant de réaliser des inventaires forestiers par voie aérienne de façon entièrement automatique.

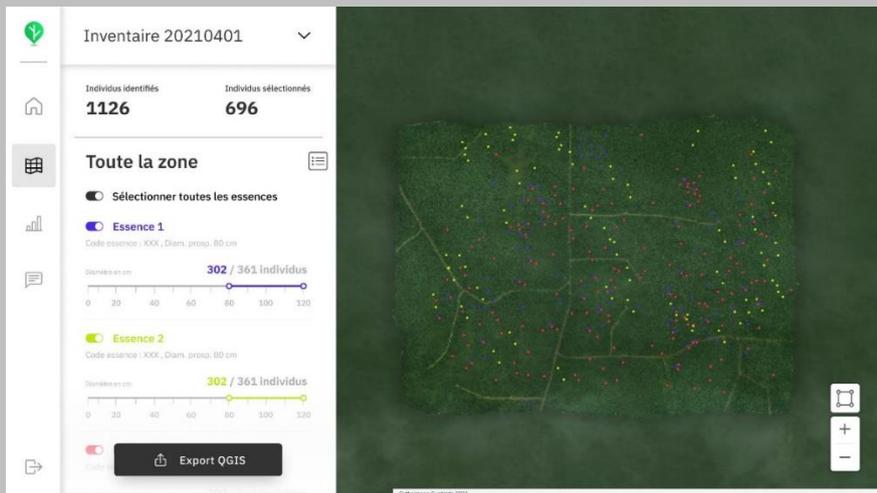


Figure 3.5 : Les quatre étapes de la solution DeepForest.

Composée de 4 étapes (1. Plan de vol, 2. Mission drone, 3. Orthophoto, et 4. Reconnaissance automatique), la solution DeepForest devrait permettre à l’exploitant d’utiliser la technologie drone

sans avoir la maitriser lui-même. Une fois le processus déroulé, les données d'inventaires sont disponibles en ligne via un Dashboard proposant une carte positionnant toutes les essences recherchées.

Le service Deepforest a pour but de faciliter l'inventaire et évaluer les ressources des exploitations forestières d'Afrique Centrale. Il propose aux gestionnaires forestiers une solution automatisée de collecte et d'analyse de données apportée par des drones capables de couvrir des milliers d'hectares. Conçu pour optimiser les opérations forestières, le service DeepForest permet d'obtenir une vision plus précise des ressources forestières et plus d'efficacité dans la gestion de l'aménagement.



Figures 3.6 (en haut) et 3.7 (en bas) : Gestion des données d'inventaires par drone et reconnaissance / localisation des essences tropicales commerciales avec la solution DeepForest.

Deepforest a ainsi pour but :

- De faciliter le travail des bureaux d'études et des exploitants forestiers ;
- Estimer la valeur écologique d'une forêt ;
- Estimer la valeur économique d'une forêt ;
- Monitorer le massif forestier.

Deepforest sera à terme en mesure d'apporter des données d'**inventaire d'aménagement** avant même la prospection terrain et repérer les zones à fort potentiel économique. Ceci en détectant la présence et en localisant les essences les plus commercialisées pour obtenir une visibilité sur le long terme des ressources forestières et prévoir ses stocks sur les années à venir. Il permettra également de localiser

les essences et / ou arbres à haute valeur de conservation à protéger (pour plus d'information : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/201957>)<sup>3</sup>.

Essences reconnues		Essences à étudier	
Noms scientifiques	Nom pilote	Noms scientifiques	Nom pilote
<i>Lofira alata</i>	Azobé	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	Ayous
<i>Lepiaea cedrata</i>	Bossé Clair	<i>Afdzelia bipindensis</i>	Doussié
<i>Entandrophragma candollei</i>	Kossipo	<i>Terminalia superba</i>	Fraké, Limba
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	Sapelli	<i>Milicia excelsa</i>	Iroko
		<i>Gilbertiodendron dewevrei</i>	Limbali
		<i>Baillonella toxisperma</i>	Moabi
		<i>Distemonanthus benthamianus</i>	Movingui
		<i>Austranella congolensis</i>	Mukulungu
		<i>Cylicodiscus gabunensis</i>	Okan
		<i>Aucoumea klaineana</i>	Okoumé
		<i>Pterocarpus soyauxii</i>	Padouk
		<i>Entandrophragma utile</i>	Sipo
		<i>Erythrophleum ivorense</i> , <i>Erythrophleum suaveolens</i>	Tali
		<i>Millettia laurentii</i>	Wengé

Tableau 3.1 : Essences reconnues et à étudier en priorité par DeepForest (2022).

Durant l'**inventaire d'exploitation**, l'objectif de Deepforest est d'apporter des données d'inventaire précises pour simplifier les opérations terrain :

- Obtenir de la visibilité sur les volumes exploitables sur 3 à 5 ans ;
- Planifier les opérations d'exploitation forestière à impact réduit avec précision et exhaustivité ;
- Déterminer avec précision l'implantation d'un camp, des routes et des pistes (voir également section 3.3).

→ L'offre DeepForest



- Technologie nouvelle et unique
- Solution sur-mesure à destination des gestionnaires forestiers
- Livrables rapides, précis et centralisés
- Déploiement à la demande
- Prise de décision facilitée
- Solution écologique et sécuritaire
- Drone dimensionné pour la cartographie de milliers d'hectares
- Solution économique : fort potentiel de ROI

Figures 3.8 : L'offre de la solution DeepForest.

<sup>3</sup> Hautes Valeurs de Conservation (HVC) dans les Unités Forestières d'Aménagement du Cameroun : concepts, choix et pratiques. Daïnou, Kasso et al. 2016 • Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgium

Pour plus d'information, voir également :

- <https://projet-idrop-espace-communication.cea.fr/>
- <https://www.cirad.fr/dans-le-monde/cirad-dans-le-monde/projets/projet-i-drop>
- <https://sunbirds.aero/use-case-precision-forestry>

Arrivé au terme de cette expérience pilote prometteuse, les prochaines phases viseront à développer et maturer l'outil de façon à ce qu'il soit déployé chez l'exploitant forestier, voire dupliquer l'expérience pour une mise à l'échelle auprès d'autres sociétés forestière dans le bassin du Congo. La perspective à terme est que les exploitants forestiers soient en mesure de couvrir leurs assiettes annuelles de coupe par drone et d'utiliser le logiciel iDROP pour identifier automatiquement un lot d'essences.

Ces perspectives nécessitent toutefois des ressources à mobiliser en termes de développement complémentaires, de vulgarisation, de formation et d'accompagnement / coaching pour envisager une solution techniquement et financièrement opérationnelle quant aux 4 étapes de DeepForest.

## **3.2. Inventaire : estimation du diamètre des essences identifiées par drone**

Suite à la localisation automatique des essences commerciales (voir la section 3.1 qui précède), le gestionnaire forestier doit également connaître le volume sur pied des arbres localisés afin d'estimer la valeur économique potentielle de ces arbres. Il est dès lors nécessaire de déduire le diamètre du tronc des arbres précédemment détectés ou du moins la classe de diamètre. Pour ce faire, une analyse et le développement de modèles de prédiction du diamètre du tronc, à partir des données drone, ont été réalisés dans le cadre du projet iDROC.

### **3.2.1. Développement de modèles de prédiction du diamètre du tronc**

La première étape pour développer les modèles de prédiction du diamètre du tronc a consisté à identifier les variables déduites de l'imagerie drone (ex : surface du houppier et hauteur de l'arbre) qui présentent les meilleures relations avec le diamètre du tronc des arbres (figure 3.9). La surface du houppier et la hauteur de l'arbre ont été retenues, car elles sont plus faciles à extraire des données drone que d'autres variables. Parmi ces autres variables, certaines améliorent légèrement la précision des modèles mais nécessitent des traitements supplémentaires pour les extraire (exemple : la surface convexe du houppier).

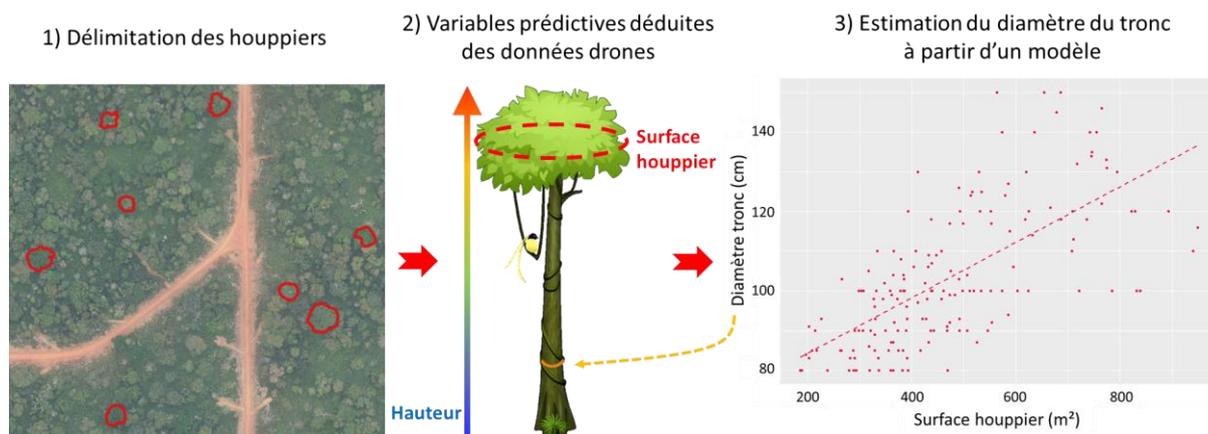


Figure 3.9 : Principales étapes pour développer les modèles d'estimation du diamètre à partir des données drone. 1) délimitation du houppier sur l'image drone, 2) extraction des variables prédictives sur les données drones (ex : surface et hauteur) et, 3) ajustement d'un modèle d'estimation du diamètre du tronc.

Cette analyse a été réalisée à partir d'un jeu de données extrait de l'inventaire d'exploitation de chez IFO/IHC au Congo (863 arbres, 12 essences distinctes). Ces données ont fait l'objet d'une digitalisation des houppiers sur base des images drones (voir première image sur figure 3.9). Deux types de modèle ont été identifiés (équations 1 et 2 ci-dessous) pour permettre d'estimer le diamètre des arbres à partir de variables facilement appréhendables : la surface du houppier et la hauteur de l'arbre. Ces modèles ont été ajustés sur l'ensemble du jeu de données en y ajoutant un facteur essence afin de prendre en compte l'influence de l'espèce sur ces modèles. Les paramètres (coefficients) de ces modèles sont présentés dans le tableau 3.2 et les figures 3.10 et 3.11 permettent de visualiser le comportement de ces modèles par rapport au jeu de données. La précision relative globale (relative root mean square error) des deux modèles sont respectivement de 13% et 14,2%. La précision en cm et par espèce est détaillée dans le tableau 3.2.

**Equation 1 :  $Diam = a1 + b1 \cdot SH + c1 \cdot H^2$**

**Equation 2 :  $Diam = a1 + b2 \cdot SH$**

Avec Diam, le diamètre du tronc en centimètre, SH, la surface du houppier en m<sup>2</sup> et H la hauteur de l'arbre en mètre.

Tableau 3.2 : Valeurs des paramètres des modèles 1 et 2 pour chaque espèce (voir équations 1 et 2) et leur précision en termes d'erreur quadratique moyenne (RMSE, en cm). Le nombre d'arbres par espèce est repris dans la colonne n.

Essence	n	Modèle 1 avec hauteur				Modèle 2 sans hauteur		
		a1	b1	c1	RMSE	a2	b2	RMSE
Azobé	164	0.039	0.015	64.5	12.7	0.047	81.2	13.4
Bilinga	7	0.039	0.015	56.0	13.6	0.047	65.4	11.8
Bossé Clair	30	0.039	0.015	72.5	13.1	0.047	86.4	12.5
Doussié	6	0.039	0.015	57.5	15.1	0.047	70.0	12.5
Fraké	24	0.039	0.015	41.5	9.4	0.047	52.8	10.6
Kossipo	30	0.039	0.015	78.3	16.6	0.047	96.9	18.7
Limballi	18	0.039	0.015	82.2	16.9	0.047	92.0	18.4
Padouk	17	0.039	0.015	62.2	15.7	0.047	79.1	16.6
Sapeli	287	0.039	0.015	84.2	17.4	0.047	104.8	18.9
Sipo	37	0.039	0.015	86.2	20.3	0.047	108.0	20.6
Tali	225	0.039	0.015	64.4	13.0	0.047	73.1	13.0
Wengé	18	0.039	0.015	66.6	12.8	0.047	76.1	15.0

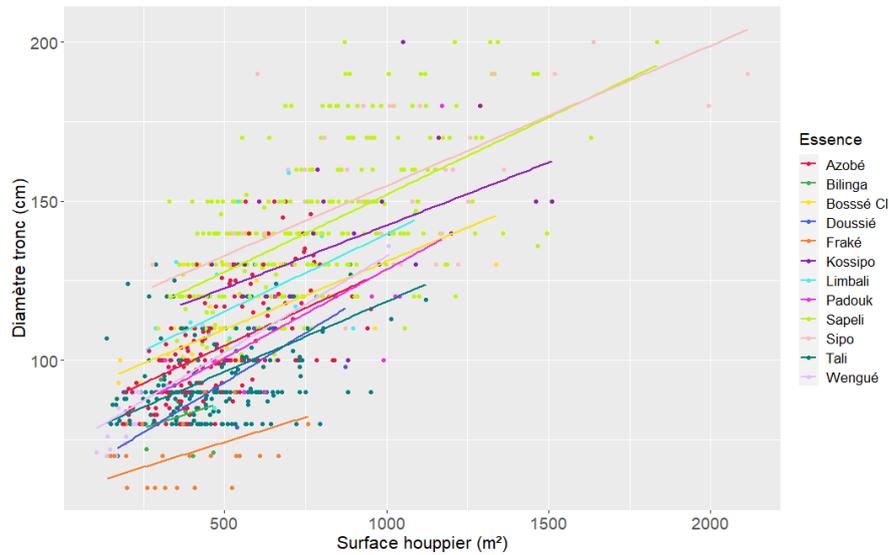


Figure 3.10 : Tendence des estimations de diamètre du tronc à partir du 1er modèle comprenant la surface du houppier et la hauteur totale de l'arbre comme variables. Les points sont les valeurs mesurées et les droites sont les tendances linéaires des estimations faites à partir du modèle 1.

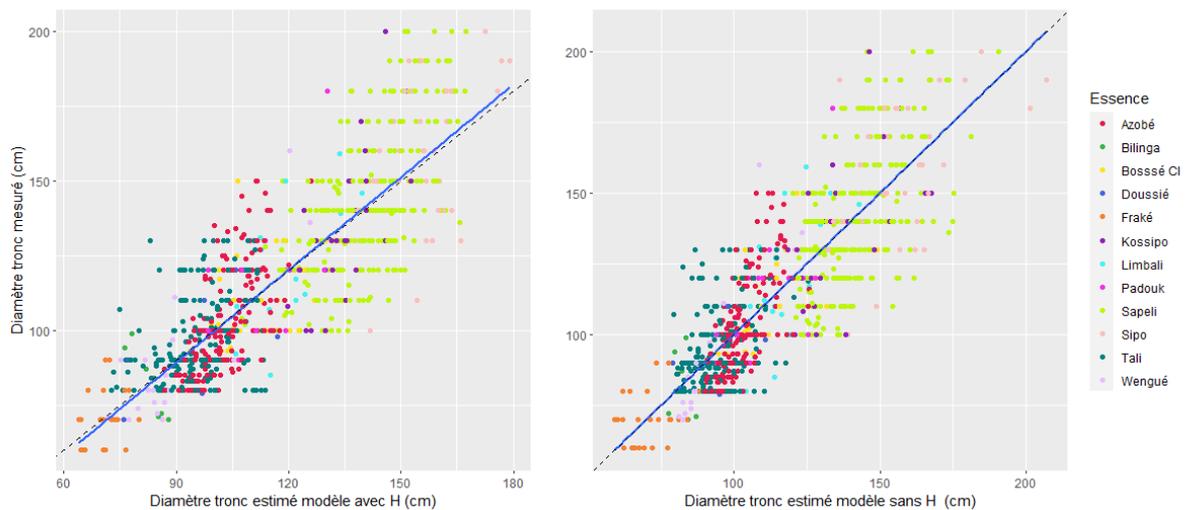


Figure 3.11 : Comparaison des estimations de diamètre faites avec les modèles par rapport aux diamètres relevés par l'inventaire d'exploitation. La ligne bleue est la tendance entre les estimations et les relevés de l'inventaire. Si cette tendance dévie de la ligne 1 : 1 (c'est-à-dire qu'une valeur en abscisse est exactement égale à une valeur en ordonnée) (différence avec la ligne bleue), cela signifie qu'il y a un biais qui se crée.

### 3.2.2. Usage des modèles de prédiction du diamètre du tronc

L'incertitude qui accompagne l'estimation du diamètre du tronc avec les modèles identifiés amène à devoir travailler par classe de diamètre. Cette incertitude amène un intervalle de confiance de prédiction d'un diamètre qui est de 30 cm autour du diamètre prédit. Par conséquent, si par exemple l'objectif est d'énumérer le nombre d'arbres dont le diamètre est supérieur au diamètre minimum d'exploitation (DME) de 80 cm parmi les arbres détectés par DeepForest, il faut compter l'ensemble des arbres dont le diamètre prédit est supérieur à 110 cm (80 + 30 cm). Ces arbres ont 97,5 % de chance d'avoir un diamètre réel du tronc supérieur ou égal à 80 cm. Ce raisonnement peut être appliqué à n'importe quel diamètre seuil souhaité.

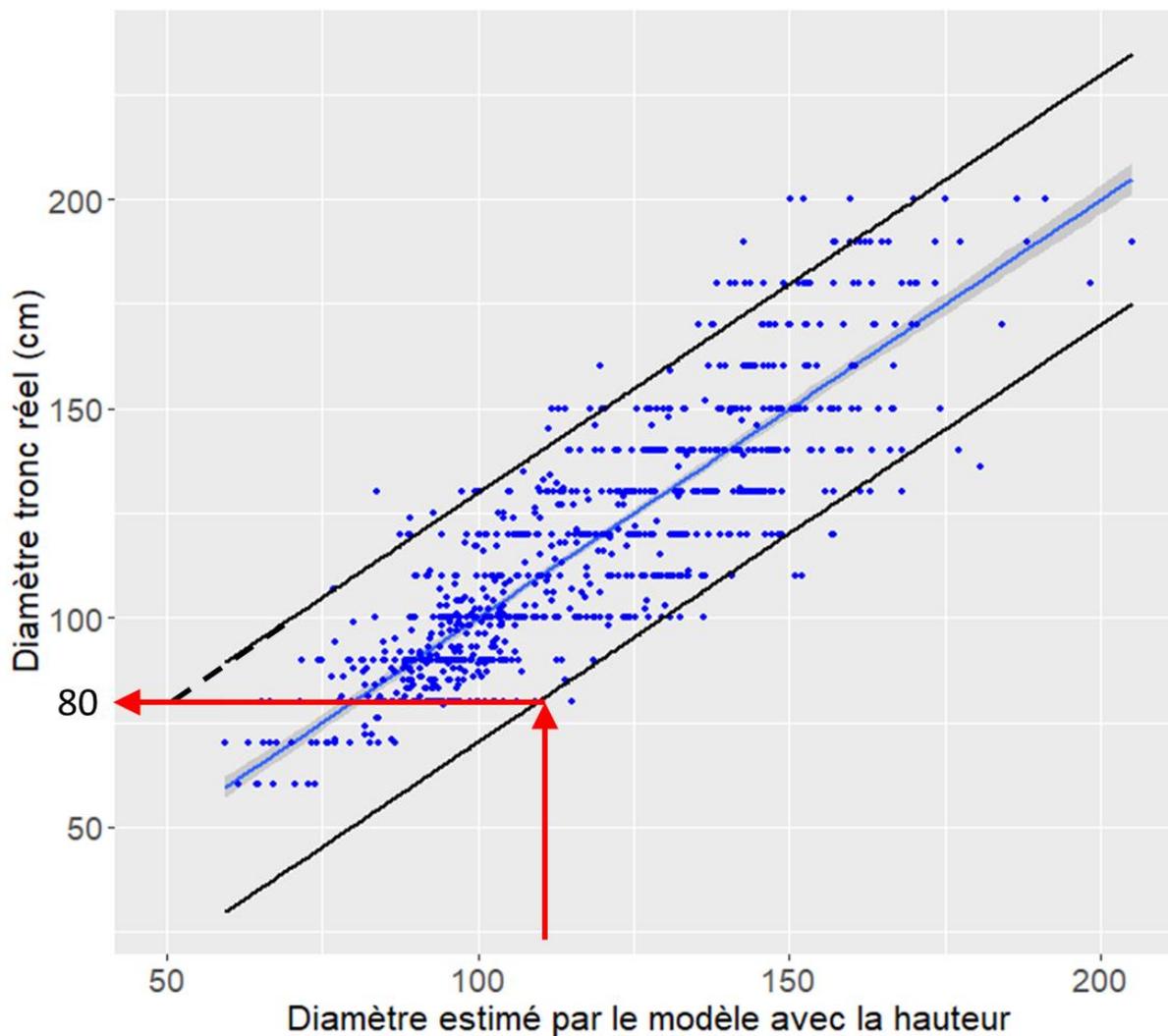


Figure 3.12 : Illustration d'un exemple d'usage d'un modèle de prédiction du diamètre du tronc. Il y a 97.5 % de chance que les arbres dont le diamètre prédit est supérieur à 110 cm aient un diamètre réel du tronc supérieur à 80 cm (diamètre minimum d'exploitation courant en Afrique Centrale).

### 3.3. Stratification forestière

La stratification forestière est l'une des premières étapes de la planification des opérations d'exploitation forestière. Par exemple, lors de la confection du plan d'aménagement qui est nécessaire à la mise en exploitation d'une concession, les sociétés d'exploitation forestières réalisent généralement une stratification de leur concession. Cette stratification forestière distingue des grands ensembles homogènes d'occupation du sol tel que les zones cultivées, l'emprise des villages et certains grands types forestiers tels que : les forêts denses humides, les forêts claires, les savanes, les zones marécageuses, les étendues d'eau, les baïis, etc. Ces stratifications sont basées sur de l'imagerie satellitaire et la photo-interprétation d'images aériennes historiques. Ces données sont cependant moins facilement exploitables à l'échelle d'assiette annuelle de coupe, car leur précision peut être insuffisante ou les strates n'amènent pas d'information utile pour la planification des routes.

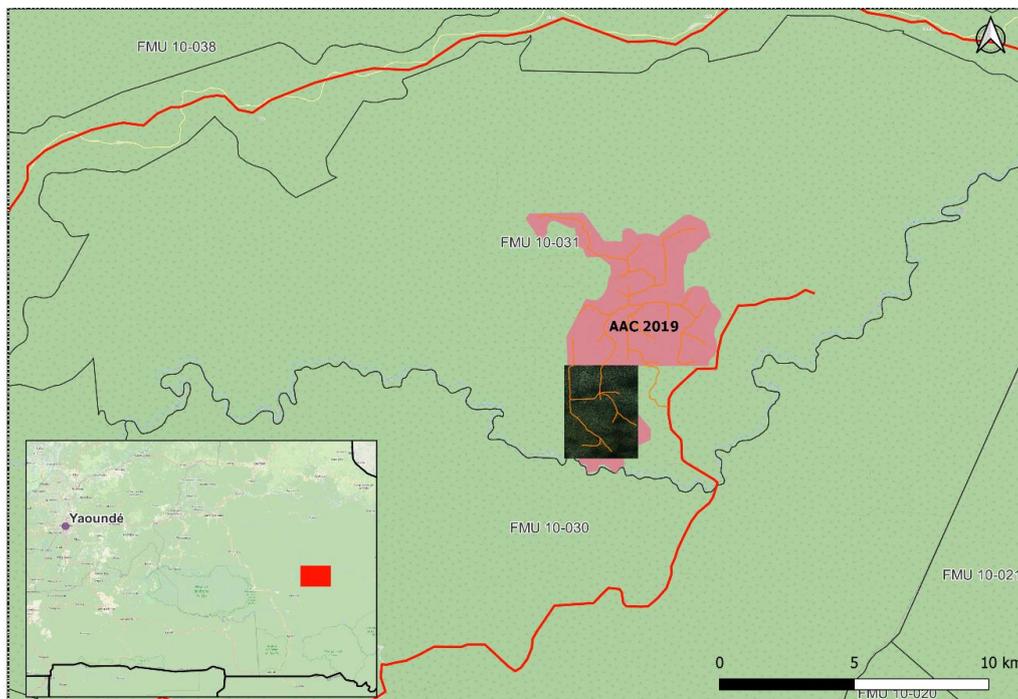
Les données drone (orthomosaïque et Modèle Numérique de Surface) présentent l'avantage d'apporter des informations de haute précision spatiale. A titre d'exemple, différentes couches cartographiques ont été générées à partir de ces données drone afin de créer une stratification forestière fine spatialement.

Les principaux produits cartographiques intermédiaires générés automatiquement sont les suivants :

- Les classes géomorphologiques de la zone d'étude (fond de vallée, versants, sommets, crêtes, etc.) ;
- La densité des grands arbres (arbres dont la hauteur est supérieure à 35 m) au sein du couvert forestier ;
- Les principaux types d'occupation du sol (végétation basse, couvert arboré haut, zone marécageuse à raphias, sol nu, etc.).

La superposition de ces couches permet de définir des strates qui serviront par exemple à la planification des routes ou à la simplification de l'inventaire d'exploitation. En effet, pour cette dernière, il ne serait dès lors plus nécessaire de relever sur le terrain la topographie et certaines zones non exploitables seraient exclues directement de l'inventaire d'exploitation, telles que les forêts marécageuses à raphias ou les forêts en zone humide avec une forte contrainte topographique aux alentours (Figure 3.19).

Dans le cadre du projet iDROC, ces principaux produits cartographiques intermédiaires et finaux ont été réalisés avec succès sur une zone pilote (Figure 3.13). Ils sont présentés dans les sections ci-après en vulgarisant et capitalisant les chaînes de traitement établies de manière à permettre aux entreprises forestières et leurs bureaux d'étude / ONG partenaires de pouvoir reproduire le traitement des images drones sur d'autres massifs forestiers.



**Figure 3.13 : Localisation de la zone pilote retenue pour illustrer les types de produits cartographiques générés à partir de données drone iDROC dans le contexte de la planification forestière. Cette zone se situe au sud de l'assiette annuelle de coupe 2019 de l'UFA 10-31 au sud-est du Cameroun.**

### 3.3.1. Modèle Numérique de Terrain et classes géomorphologiques

L'ensemble des traitements nécessaires pour produire une carte des classes géomorphologiques sont réalisables sur QGIS. Les premières étapes amenant à un Modèle Numérique de Terrain sont présentées en figure 3.14. L'ensemble des traitements sont les suivants :

#### Modèle Numérique de Terrain

1. La création d'une image/raster avec la valeur minimum d'altitude du Modèle Numérique de Surface (MNS) sur des pixels de 10 m de côté. Cette étape est faite avec une fonction de GRASS dans QGIS appelée *r.resamp.stats* en sélectionnant la statistique « Minimum » et la taille des pixels à 10 m.
2. La détection des minima locaux est ensuite appliquée sur cette image des minima. Cet algorithme ne demande pas de paramétrage particulier et rien n'est coché comme proposé par défaut.
3. L'interpolation des altitudes des points minima, par krigeage, est ensuite appliquée pour générer une image des minima d'altitude. Cette image est obtenue avec la commande *krigeage ordinaire* en prenant tous ses paramètres par défaut. Elle est ensuite retenue comme le modèle numérique de terrain (MNT) de la zone, c'est-à-dire l'altitude du sol en tout point de la zone. Il est évident que le sol n'est probablement pas atteint par des pixels du MNS dans certaines zones. L'altitude du sol est donc probablement surestimée à certains endroits. Cette surestimation est dépendante de la couverture arborée ou des marantacées. Le modèle numérique de terrain obtenu reste néanmoins meilleur ou de même qualité que les données satellites RADAR.

#### Classes géomorphologiques

4. La délimitation des classes géomorphologiques est ensuite produite sur base du MNT (Figure 3.15). L'algorithme utilisé est *r.geomorphon* dont les paramètres sont laissés par défaut à part le rayon de recherche extérieur (Outer search radius) qui est paramétré à 30 m au lieu de 3 m par défaut. Cette valeur peut être augmentée autant que nécessaire pour permettre de déceler les sommets, vallées et autre éléments topographiques. La valeur doit être supérieure à la distance entre deux éléments topographiques. L'image est ensuite « tamisée » afin de remplacer les petits éléments ne représentant que quelques pixels par la classe dominante les entourant. Ce tamisage est fait avec la commande *Tamiser* de GDAL dont le champ « seuil » est modifié, par essais-erreur, de manière à produire une image ne présentant pas de classes de petites surfaces.
5. Sélection des classes géomorphologiques bénéficiant d'un apport en eau important, voire saturant, (creux, bas de pente, vallée et dépression) et création d'une couche vectorielle ne comprenant qu'une classe fusionnée de ces classes géomorphologiques.

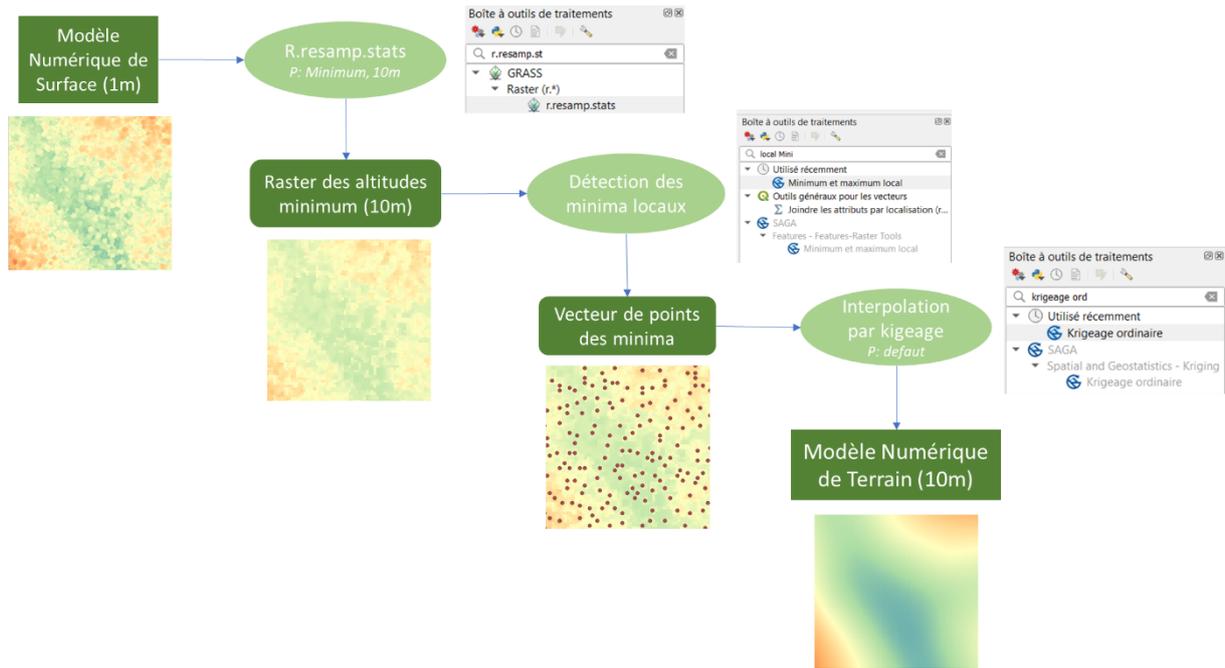


Figure 3.14 : Chaîne de traitements pour générer un Modèle Numérique de Terrain à partir d'un Modèle Numérique de Surface.

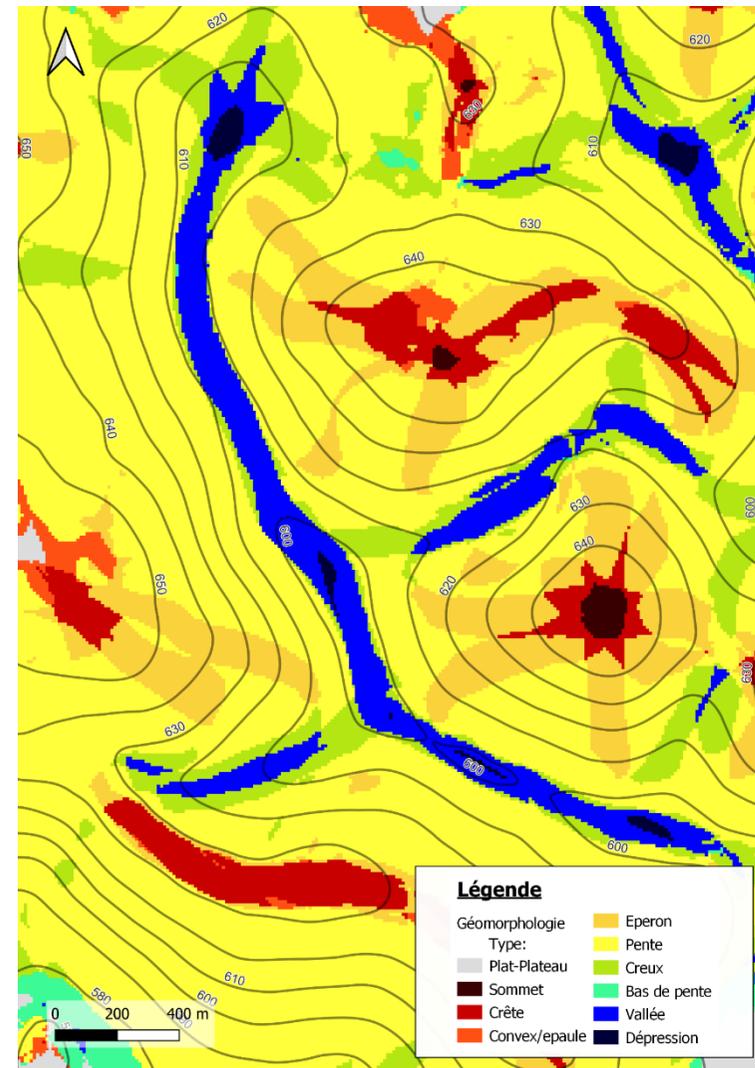
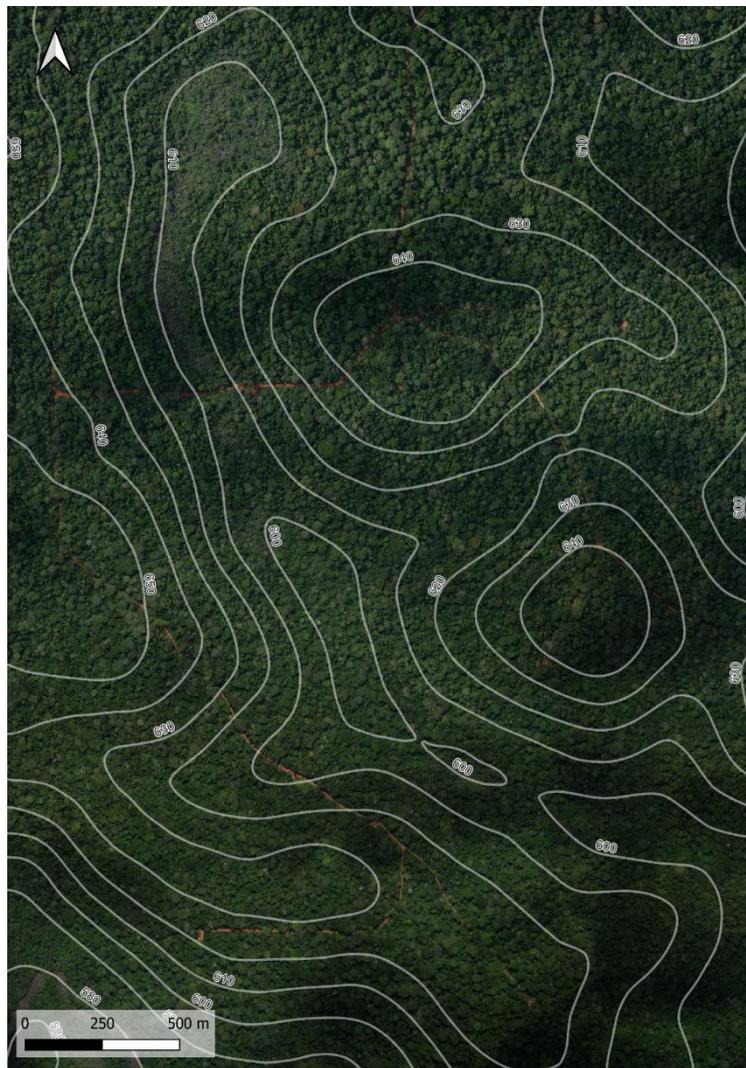


Figure 3.15 : Classes géomorphologiques obtenues à partir de donnée drone sur une zone pilote en forêt dense humide (Pallisco, Cameroun). A gauche l'orthophotomosaïque de la zone pilote, à droite les classes géomorphologiques.

### 3.3.2. La densité des grands arbres

La majorité des traitements nécessaires pour produire une carte de densité des grands arbres sont réalisables sur QGIS. Les premières étapes sont présentées en figure 3.14. L'étape de détection des sommets des arbres est cependant réalisée avec une librairie provenant du logiciel R : *lidR*. L'ensemble des traitements sont les suivants :

1. Un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) est généré en soustrayant le MNT du MNS. L'opération est réalisée avec la commande *Raster calculator* (Figure 3.16).
2. Le sommet des grands arbres est détecté à partir du MNH. La fonction *tree\_locate()* de la librairie *lidR* dans R est utilisé pour détecter ces sommets. Une fenêtre de recherche des sommets de taille variable est définie afin d'optimiser cette détection. La taille de cette fenêtre ( $y$ ) est définie comme étant une fonction linéaire de la hauteur de l'arbre ( $x$ ). Cette fonction linéaire est la suivante :  $y = 0.4 x + 2.5$ . Les grands arbres ont été définis arbitrairement comme les arbres ayant une hauteur supérieure à 35 m. Les sommets de hauteur supérieure à 35 m ont été conservés. La procédure n'a pas été optimisée outre mesure étant donné que la localisation des sommets servira uniquement à identifier les zones riches en grands arbres. L'évaluation des faux positifs et faux négatifs n'était donc pas jugée nécessaire.
3. Une image raster représentant la densité des grands arbres est ensuite générée. Cette image est produite avec la fonction *Carte de chaleur (heatmap)* dont le rayon de recherche est défini à 56 m afin que la valeur de densité du pixel soit celle d'une densité à l'hectare. La commande *r.null* est ensuite appliquée sur cette carte de chaleur en complétant uniquement le second champ avec la valeur zéro afin de remplacer les pixels sans valeurs par zéro.
4. La carte de densité des grands arbres est ensuite subdivisée en trois classes. Les trois classes sont définies sans a priori grâce à la commande *K-means Clustering for rasters* de SAGA en modifiant le nombre de clusters de 10 à 3 et en laissant les autres paramètres par défaut. L'image est ensuite « tamisée » afin de remplacer les petits éléments représentant que quelques pixels par la classe dominante les entourant. Ce tamisage est fait avec la commande *Tamiser* de GDAL dont le champ « seuil » est modifié, par essais-erreur, pour produire une image ne présentant pas de classes de petites surfaces. L'image tamisée reprenant les trois classes est ensuite convertie en vecteur avec la fonction *Polygoniser* de GDAL (Figure 3.18).

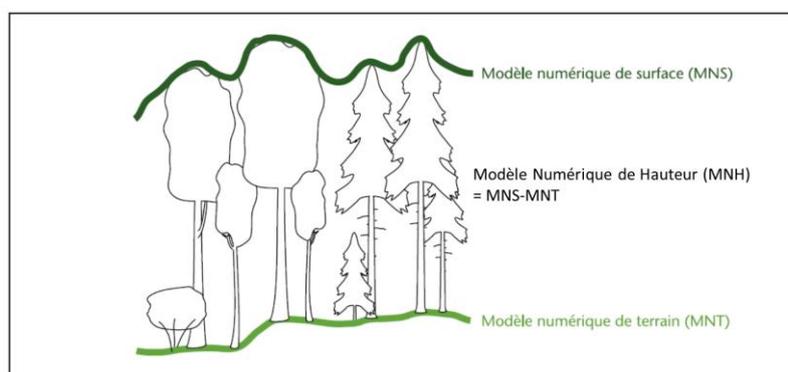


Figure 3.16 : L'estimation de la hauteur du couvert forestier peut se faire grâce au Modèle Numérique de Hauteur. Il est produit en soustrayant le MNT du MNS.

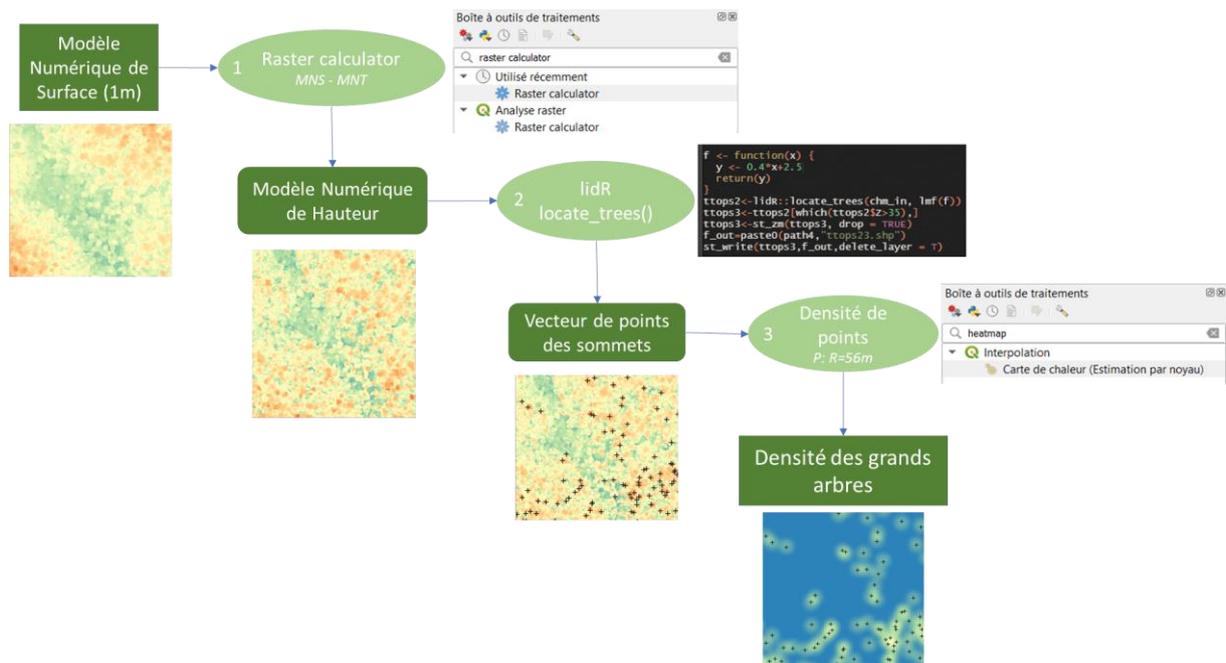


Figure 3.17 : Chaîne de traitement comprenant les principales étapes pour obtenir une carte de densité des grands arbres.

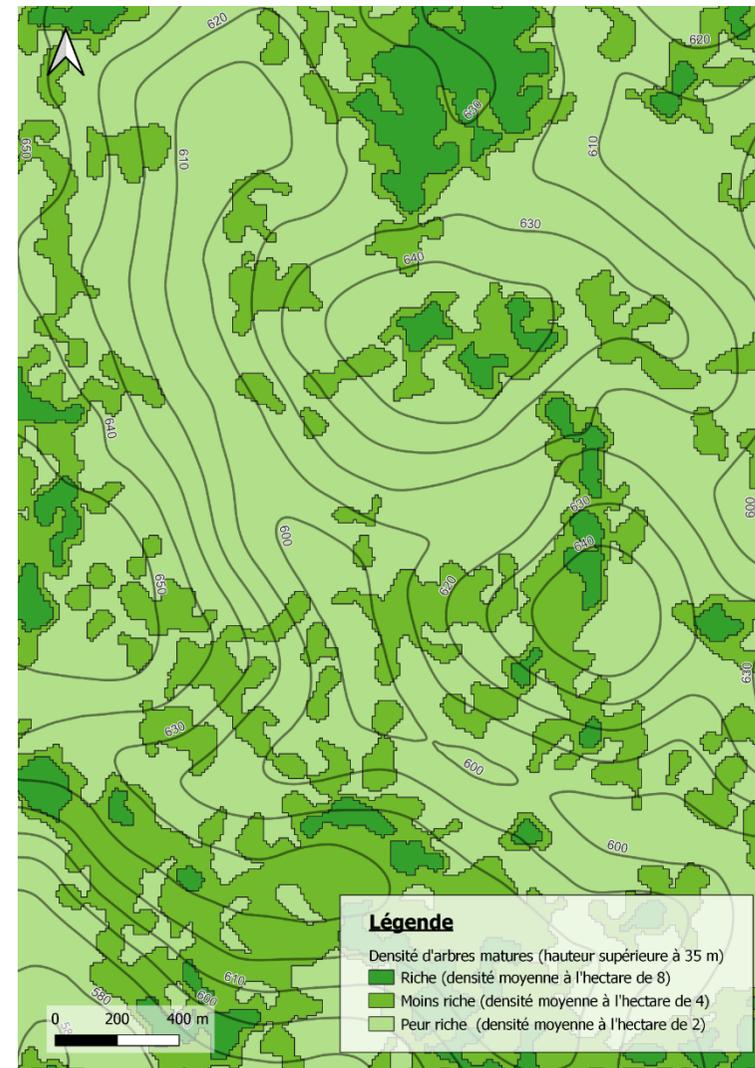
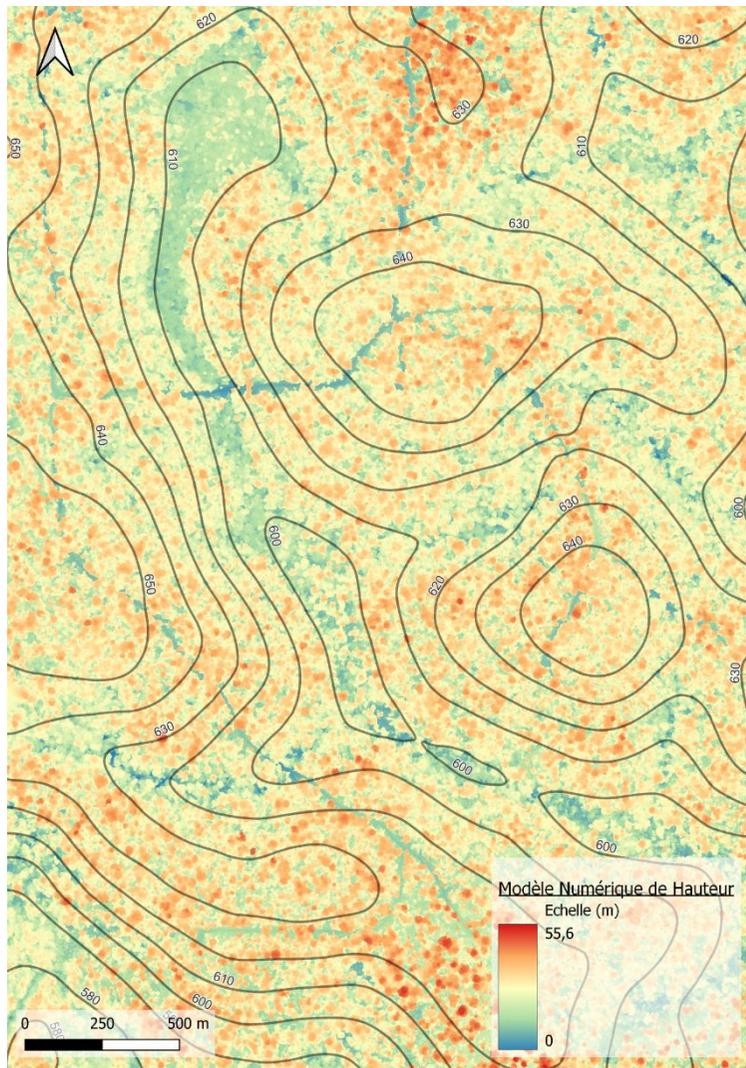


Figure 3.18 : A gauche, Modèle Numérique de Hauteur (MNH) généré à partir du Modèles Numérique de Surface (MNS) et du Modèles Numérique de Terrain (MNT). A droite, carte de densité des grands arbres selon trois classes. Les courbes de niveau sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain généré avec les données drones.

### 3.3.3. Les principaux types d'occupation du sol

Les traitements nécessaires pour cartographier les principaux types d'occupation du sol sont réalisables sur QGIS après l'installation de la librairie d'Orfeo ToolBox (OTB)<sup>4</sup>. Les principales étapes de traitement sont présentées en français sur ce [site](#)<sup>5</sup>. Cependant, quelques étapes supplémentaires à celles présentées sur le site sont nécessaires en amont du traitement pour pouvoir réaliser cette classification dans le contexte d'imagerie drone en milieu forestier tropical. Ces étapes sont décrites ci-dessous ainsi que, brièvement, les étapes de classification reprises sur le site.

1. La première étape consistera à produire des indices de végétation à partir de l'orthomosaïque drone. Les indices spectraux retenus lors de ce travail sont : « Excess of green moins Excess of Red » (ExGR), « Modified Green Red Vegetation Index » (MGRVI), « color index of vegetation extraction » (CIVE) et la brillance (BI). Ces indices sont calculés de la manière suivante :
  - a.  $ExGR = (2V - R - B) - (1.3R - V)$
  - b.  $MGRVI = \frac{V^2 - R^2}{V^2 + R^2}$
  - c.  $CIVE = 0.441R - 0.881V + 0.385B + 18.78745$
  - d.  $BI = \sqrt{\frac{R^2 + V^2 + B^2}{3}}$

Ces indices sont calculés avec la commande *Raster calculator*.

2. Les indices spectraux, ainsi que le MNH (voir étape 1 de la précédente chaîne de traitement, figure 3.14) sont groupés en une seule image avec la commande *Fusion* de GDAL. Chacun des indices spectraux ainsi que le MNH représentent donc une bande dans l'image fusionnée multi-bandes.
3. Une segmentation simple est réalisée sur le MNS (ou MNH) afin d'obtenir des segments qui permettront de générer le jeu d'entraînement du modèle de classification. La segmentation est réalisée avec la commande *Segmentation* d'OTB et en sélectionnant l'algorithme de segmentation « *watershed* ».
4. Des segments, qui présentent une végétation homogène à l'intérieur, sont sélectionnés et classés vers les types de végétation prédéfinis (ex : végétation arborée haute, végétation basse, raphias, route/sol nu, eau, etc.). La classification est réalisée en ajoutant une colonne à la table d'attribut et en y encodant un code numérique par classe.
5. Sélectionner les polygones d'apprentissage (polygones classés lors de l'étape précédente) et suivre les instructions reprises dans le site internet pour extraire les échantillons avec la commande *sampleSelection* d'OTB.

---

<sup>4</sup> Procédure d'installation d'OTB :

<https://www.sigterritoires.fr/index.php/ajouter-orfeo-toolbox-dans-qgis-3-x/>

<sup>5</sup> Tutoriel de classification d'images avec OTB :

<https://briques-de-geomatique.readthedocs.io/fr/latest/classification-supervisee.html#classification-supervisee-d-images-satellites-avec-otb>

6. Les valeurs des pixels associés aux échantillons de chacune des bandes sont extraites à l'aide de la commande *sampleExtraction* d'OTB.
7. L'étape suivante est de « faire apprendre » à un modèle à reconnaître les classes identifiées à partir des bandes spectrales, i.e. de l'image multi-bandes, à classifier. Pour cet apprentissage, la commande *TrainImagesClassifier* d'OTB est utilisée. L'algorithme « *Random Forest (RF)* » est sélectionné pour développer le modèle.
8. La phase d'application du modèle se fait à l'aide de la commande *ImageClassifier* d'OTB. L'ensemble de l'image est ainsi classé dans une des classes prédéfinies (Figure 3.19).
9. L'image classée est ensuite « tamisée » afin de remplacer les petits éléments représentant que quelques pixels par la classe dominante les entourant. Ce tamisage est fait avec la commande *Tamiser* de GDAL dont le champ « seuil » est modifié pour produire une image ne présentant pas des classes de petites surfaces.
10. Les occupations de sol sont ensuite converties en vecteur avec la fonction *Polygoniser* de GDAL. La/Les classe(s) d'occupation du sol qui nous intéresse(nt) pour la stratification est/sont enfin extraite(s) par sélection des polygones concernés (exemple : les forêts marécageuses à raphias dans le cas de notre sone pilote).

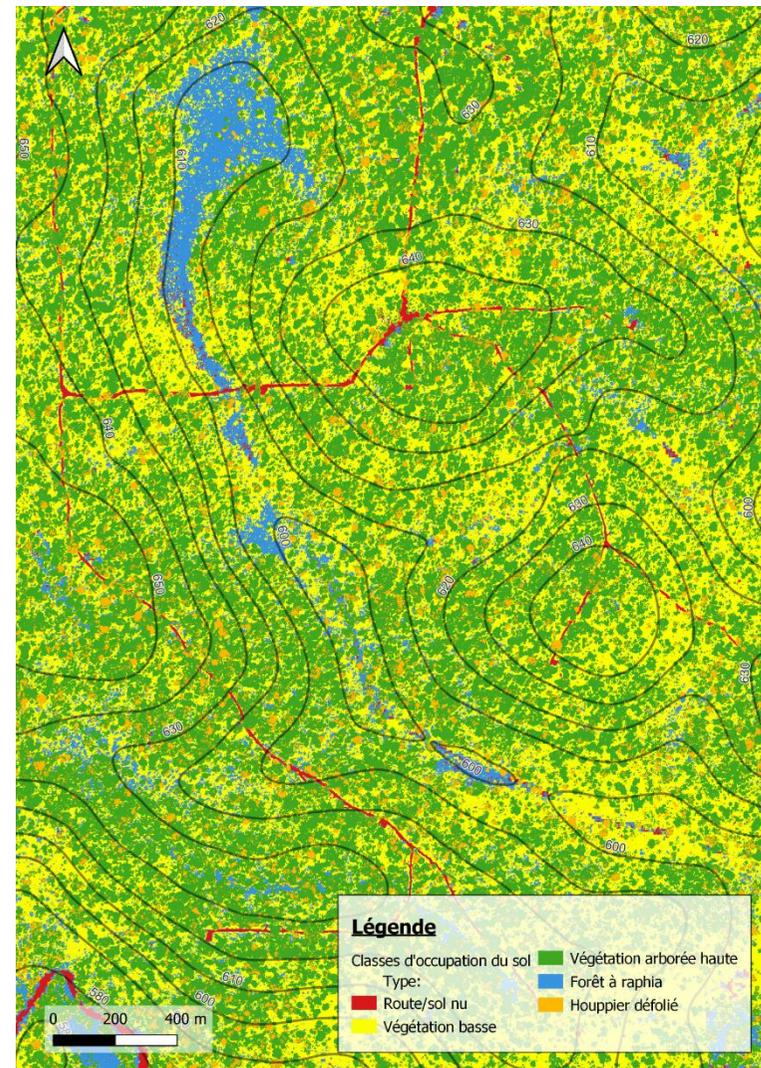
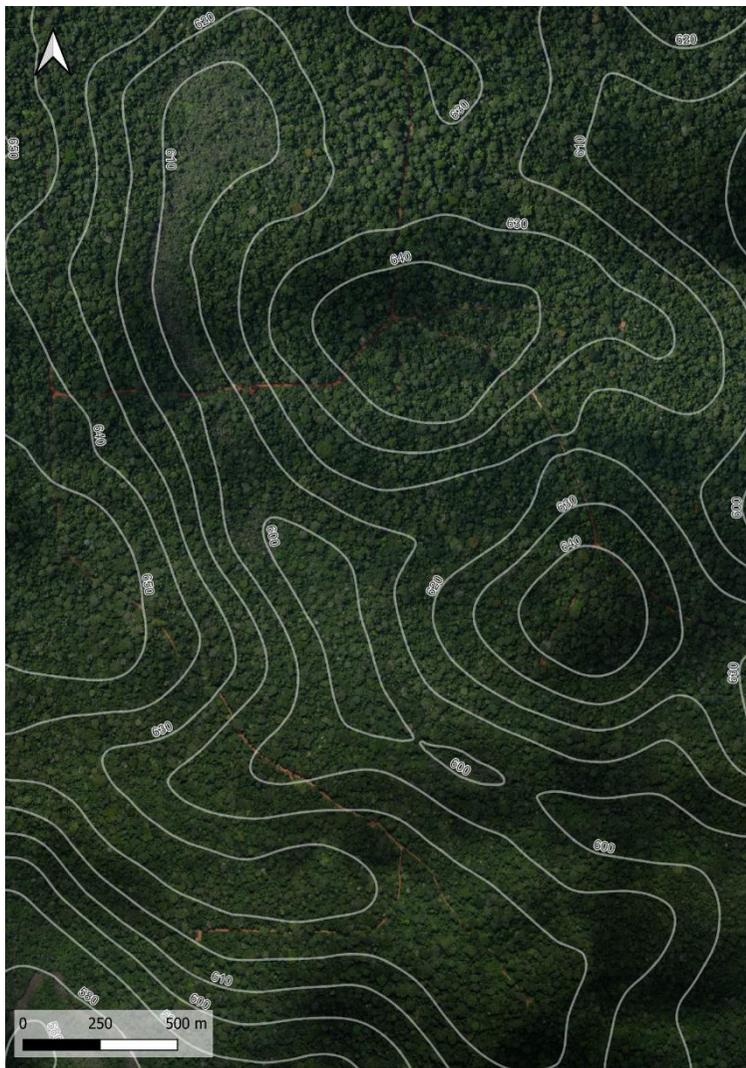


Figure 3.19 : A gauche, l'orthophotomosaïque drone de la zone pilote. A droite, la carte d'occupation du sol généré par l'algorithme Random Forest d'OTB. Les courbes de niveau sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain généré avec les données drones.

### **3.3.4. Stratification de la forêt à partir des différentes couches cartographiques produites**

L'ensemble des trois couches vectorisées, présentées précédemment, sont ensuite fusionnées pour générer la couche cartographique comprenant les strates souhaitées (Figure 3.20, partie de gauche). A titre de comparaison les strates prédéfinies dans le plan d'aménagement de la concession forestière sont présentées. Ces strates ont été créées à partir d'images satellites et d'images aériennes historiques et probablement de la couche topographique radar SRTM (Figure 3.20, partie de droite). Nous pouvons remarquer que les « forêts marécageuses à raphia » n'avaient pas été identifiées et que les forêts « dense-humide semi-caducifoliées accessible dense » correspondent en partie aux forêts denses humides riches et moins riches de la stratification faite avec les données drones. Les limites sont cependant moins précises. Notons que la stratification « drone » a été réalisée à distance, sans connaissance particulière de la zone d'étude de manière à simuler un travail de traitement d'images drones sans relevés terrain.

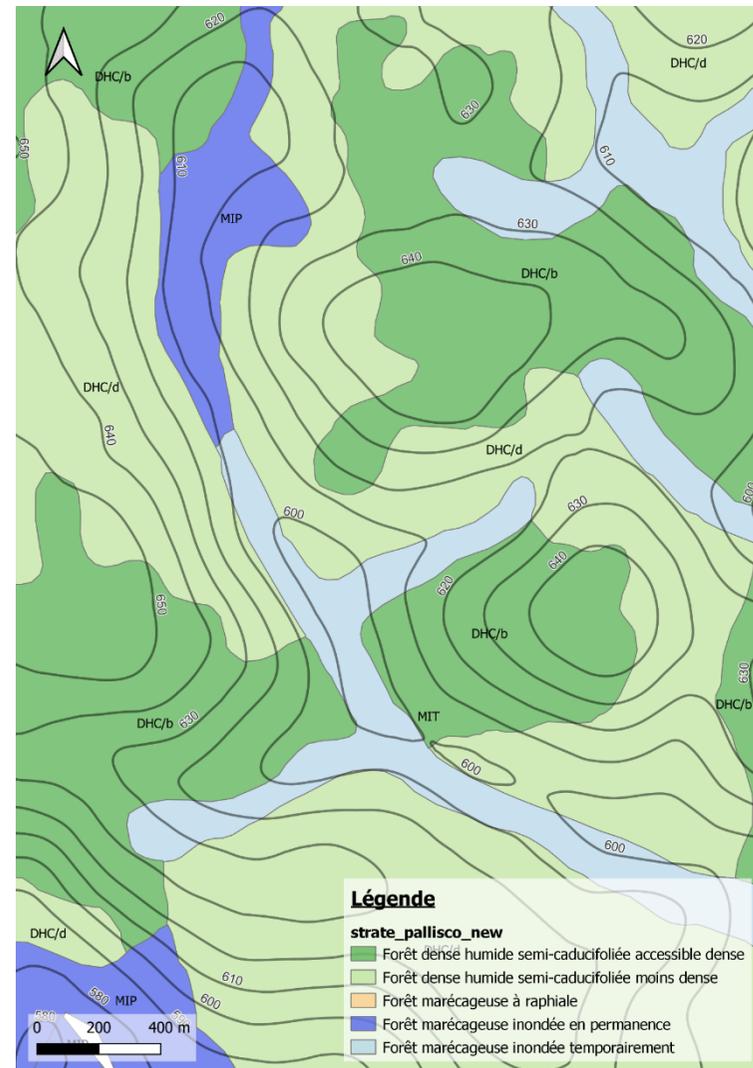
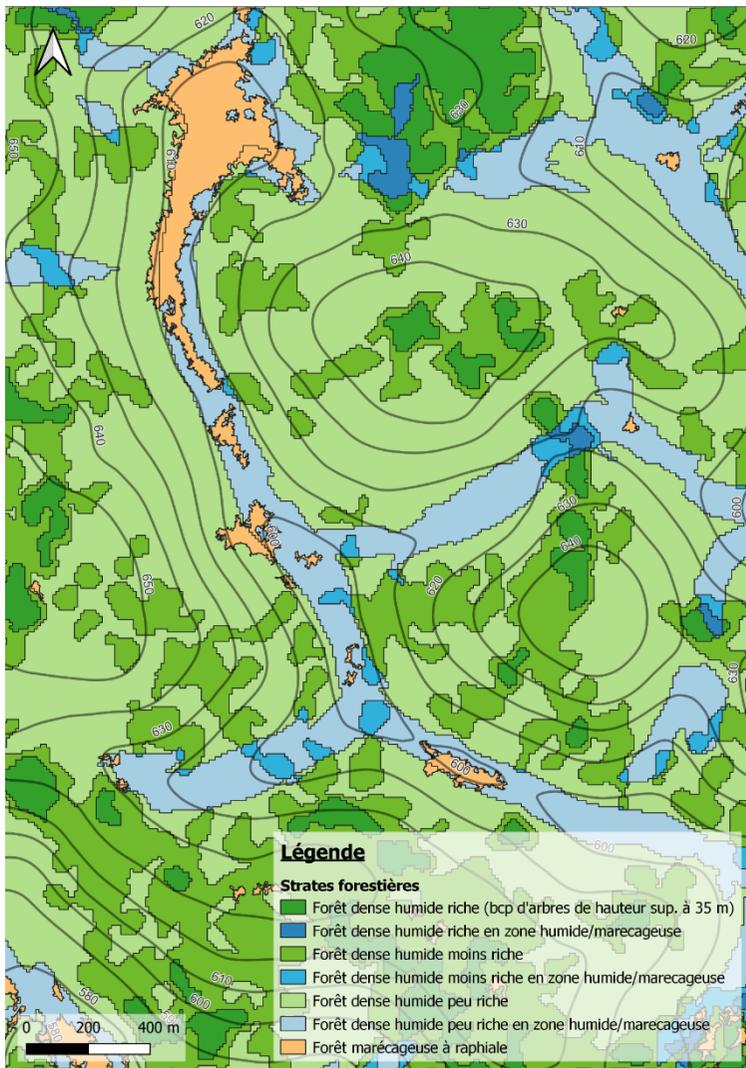


Figure 3.20 : A gauche, la stratification forestière issue des données drone iDROC. A droite, la stratification forestière produite et utilisée par la société d'exploitation forestière. Les courbes de niveau sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain généré avec les données drones du projet iDROC.

### 3.4. Planification des routes

La stratification forestière présentée à la section précédente permet d’optimiser le tracé des routes en fonction des types de strates (richesse en grands arbres, zones de forte pente, zones humides). La figure 3.21 ci-dessous présente un exemple de tracé de route qui pourrait être proposé avant l’ouverture réelle de la route. Ce travail serait réalisé avant le tracé des routes tel que déjà réalisé sur l’AAC survolée dans cet exemple. Il est constaté que les tracés sont assez similaires alors que la proposition de tracé se base uniquement sur les données drones. Le tracé réel est quant à lui le produit d’un tracé théorique et des contraintes rencontrées sur le terrain lors de la construction de la route. La proposition de tracé présente une pente moyenne de 3 % comme le tracé réel mais avec une moins grande variabilité de cette pente (écart-type plus faible) et en particulier une pente maximum rencontrée de 9% contre 11 % pour le tracé réel. Notons que la pente maximale généralement admises sur les routes principales et secondaires est de 8% (exceptionnellement 10 à 12% si le grumier est à vide dans le sens de la montée, source : synthèse EFIR de l’ATIBT<sup>6</sup>).

**Tableau 3.3 : Comparaison des caractéristiques de la proposition de tracé de route faite à partir des données drone par rapport au tracé réel de la route.**

Statistique	Tracé drone iDROC		Tracé réel	
	Pente (%)	Longueur (m)	Pente (%)	Longueur (m)
<b>Somme</b>		10322		10440
<b>Moyenne</b>	3		3	
<b>Ecart-type</b>	2		3	
<b>Minimum</b>	0		0	
<b>Maximum</b>	9		11	

<sup>6</sup> <https://www.atibt.org/files/upload/technical-publications/ATIBT-TEREA-Etude-IFL-Pratique-EFIR-societe-certifiees-Synthese-VF-A----1.pdf>

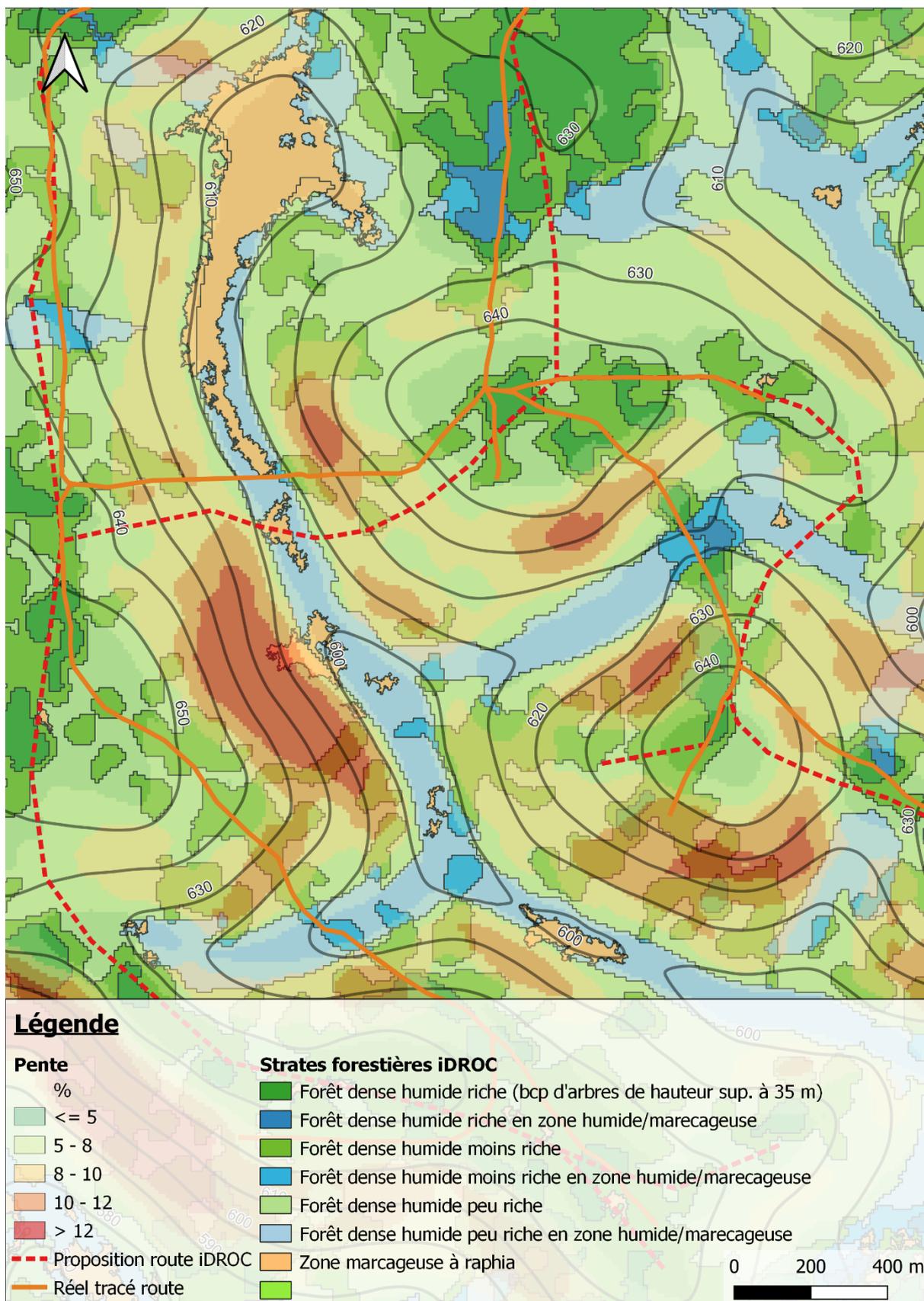


Figure 3.21 : Superposition des couches cartographiques produites à partir des données drone pour proposer un tracé de route. A titre de comparaison, le tracé de route réel déjà réalisé est également présenté.

## 4. Volet 4 - Développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée (activité 6.1.12)

### 4.1. Introduction

L'objectif de cette partie du projet iDROC est de proposer une méthode permettant de cartographier et de quantifier à partir d'images drone les perturbations de la canopée causées par les opérations d'exploitation forestière.

La méthode proposée utilise des images drones récoltées avant et après exploitation. Elle a été testée sur une zone de 30 km<sup>2</sup> dans la concession IFO-Interholco.

Les données utilisées correspondent à 2 vols drones réalisés en février 2019 et en septembre 2019. Les spécifications des données acquises durant ces 2 vols sont reprises dans le chapitre 1.

Les images ont été traitées à l'aide du logiciel *Agisoft Metashape* (version 1.7.1.) afin de produire une orthoimage et un Modèle Numérique de Surface (MNS) de résolutions respectives égales à 13 cm et 25 cm pour chaque date (avant et après exploitation).

La chaîne de traitement des données qui est présentée dans le paragraphe 4.2 a été entièrement développée à l'aide d'outils Opensource dans l'environnement R, à l'aide de l'interface R Studio. Les résultats sont visualisés dans QGIS.

### 4.2. Traitement des données et résultats obtenus

Le traitement des données est structuré en 6 étapes :

1. Préparation des données ;
2. Cartographie des zones de sols nus ;
3. Création d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et d'un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) ;
4. Cartographie des classes de végétation ;
5. Détection des zones perturbées par l'exploitation (changement de hauteur) ;
6. Production de statistiques sur les zones perturbées.

L'ensemble de ces étapes a été réalisé à l'aide d'un script R disponible en annexe. Le texte de ce script reprend les valeurs des paramètres associés aux différents traitements. Pour ne pas alourdir le rapport, ceux-ci ne seront pas détaillés.

#### • Etape 1 – Préparation des données

La préparation des données concerne les opérations suivantes qui sont appliquées aux données des 2 vols :

- Découpage des orthoimages et des MNS des 2 dates en considérant la zone commune entre les 2 vols ;

- Recalage des 2 MNS sur le MNS issu des images ALOS RTC (<https://asf.alaska.edu/>). Ce recalage permet de corriger l'altitude qui n'avait pas été relevée lors des vols drones. C'est une correction liée à ces acquisitions au Congo, mais qui n'est généralement pas nécessaire ;
- Rééchantillonnage (réduction de résolution) des couches de base (orthoimages et MNS) à 1 m de résolution ;
- Calcul d'indices dérivés des orthoimages (résolution 1m). Celles-ci ne comportent que 3 bandes : Rouge, Vert et Bleu. Deux Indices ont été considérés : le MGRVI et la brillance.

$$\text{MGRVI} = \frac{\text{Vert}^2 - \text{Rouge}^2}{\text{Vert}^2 + \text{Rouge}^2}$$

$$\text{Brillance} = \frac{\text{Rouge} + \text{Vert} + \text{Bleu}}{3}$$

- **Etape 2 – Cartographie des zones de sol nu**

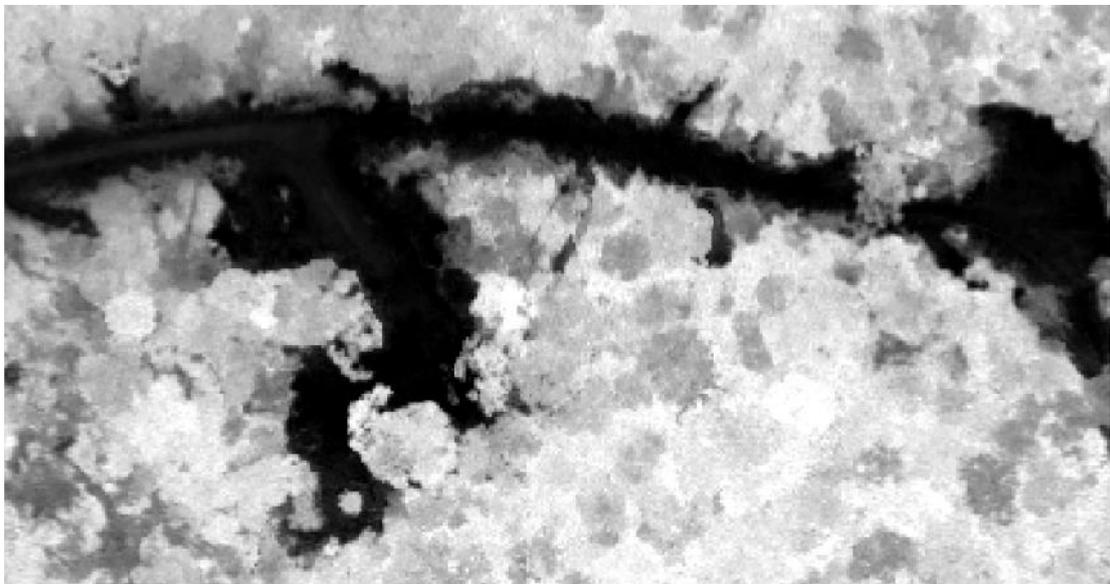
La délimitation des sols nus est un préalable à la production du MNT. Cette délimitation a été réalisée par seuillage de l'indice MGRVI (Figure 4.1).

- **Etape 3 – Création des couches MNT et MNH**

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été généré par interpolation sur une série de points sélectionnée au sein de la zone de sols nus. Pour garantir une couverture suffisante des points « sols nus » sur l'ensemble de la zone d'intérêt, une série de points supplémentaires a été digitalisée manuellement. Le MNT a ensuite été créé avec un processus d'interpolation de type krigeage (fonction *autoKrige* du package *automap* dans R). Le MNT a été complété d'une couche reprenant les courbes de niveau (Figure 4.2).

Le Modèle Numérique de Hauteur (MNH), également appelé Modèle Numérique de Canopée (MNC), a ensuite été dérivé de la soustraction du MNS et du MNT (Figure 4.3).

La figure 4.4 permet d'apprécier la distribution de fréquence des valeurs prises par le MNH. On discerne sur cet histogramme le pic des points « sols » (hauteur nulle), le pic des points de végétation basse correspondant aux marantacées (hauteur comprise entre 0 et 5 m) et enfin le pic correspondant à la strate arborée (hauteur de 20 m et plus).



**Figure 4.1 : Illustration de cartographie des sols nus : ortho image (haut), indice MGRVI (centre), résultat du seuillage du MGRVI pour délimiter les zones de sol nu (bas).**

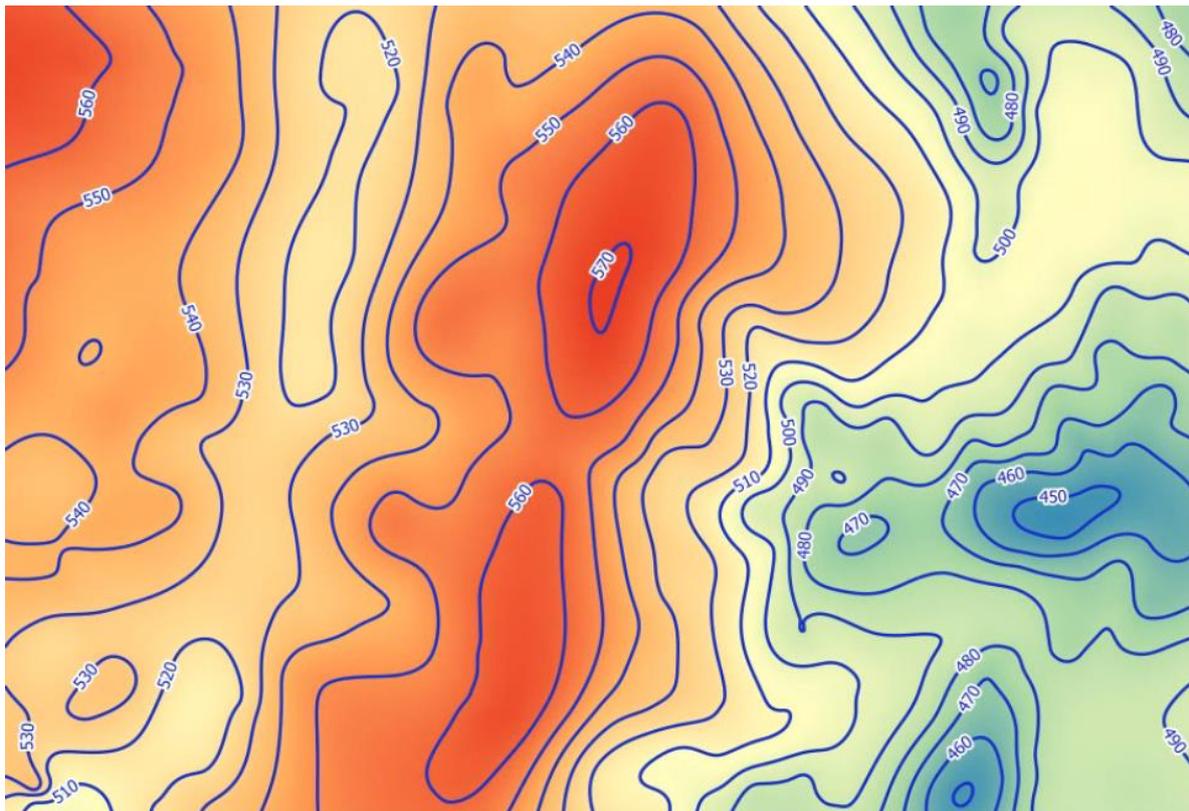


Figure 4.2 : Représentation du MNT produit par interpolation et des courbes de niveau.

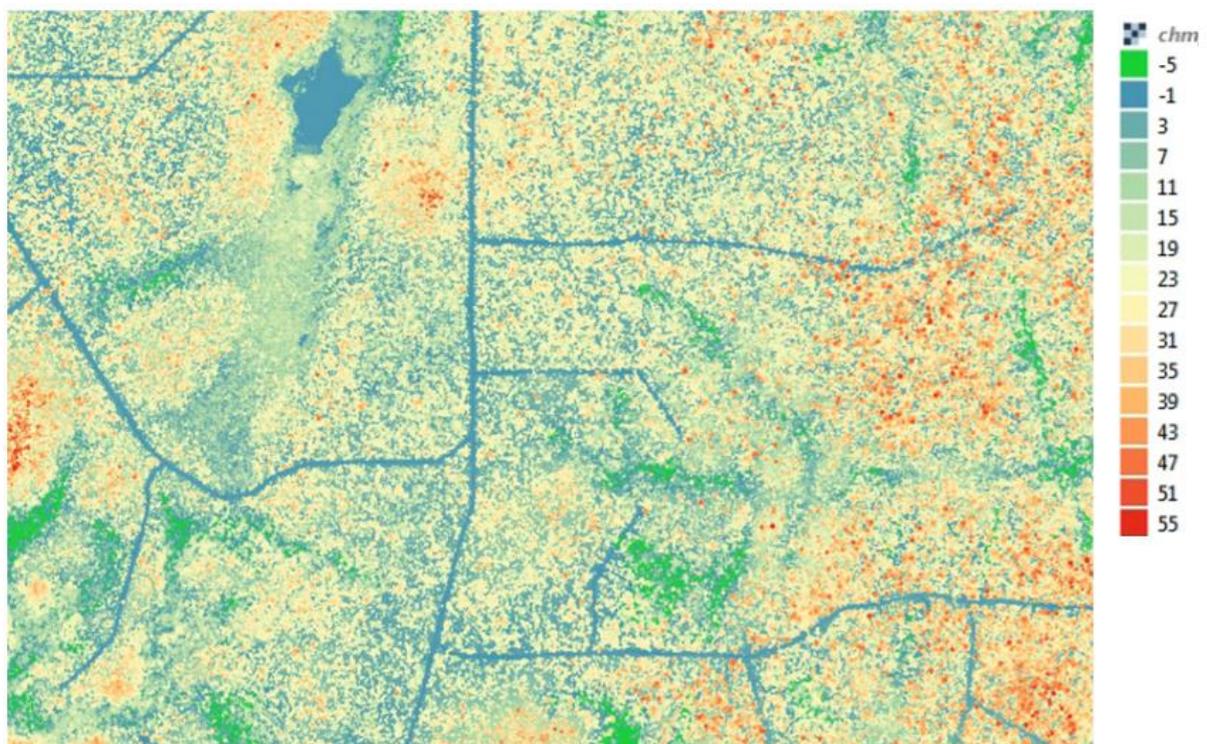


Figure 4.3 : Modèle Numérique de Hauteur (MNH) également appelé Modèle Numérique de Canopée (MNC).

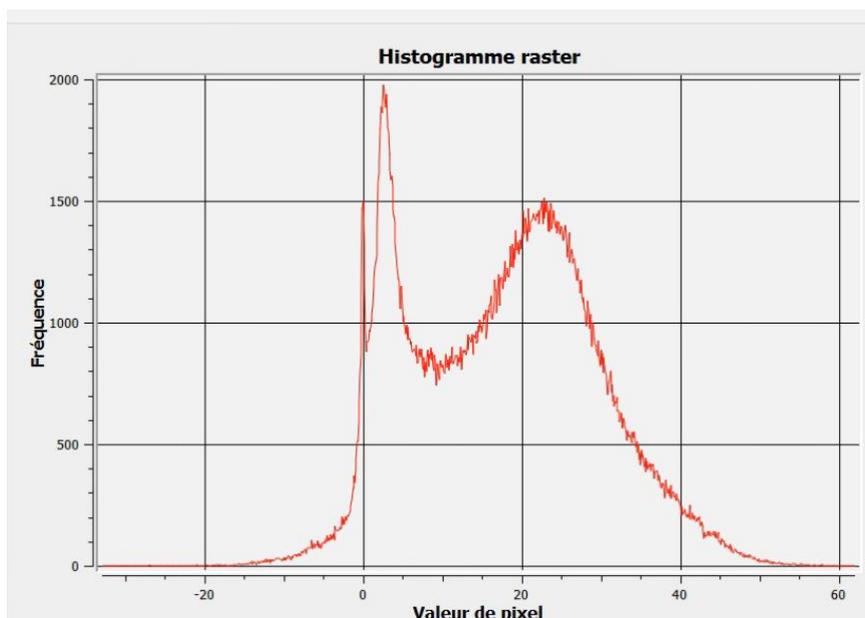


Figure 4.4 : Distribution de fréquence des valeurs prises par le MNH.

- **Etape 4 – Cartographie des classes de végétation**

Pour cette étape, nous avons considéré 3 classes : végétation basse, strate arborée avec feuilles et strate arborée sans feuilles.

La classification a été réalisée après une étape de segmentation (classification orientée objet). La segmentation a été réalisée avec l’algorithme *Meanshift* de la librairie *Orfeo ToolBox* (OTB, commande *otbcli\_Segmentation*).

La classification est réalisée à l’aide de l’algorithme *Random Forest* de la librairie OTB (commande *otbcli\_TrainVectorClassifier* et *otbcli\_VectorClassifier*). Les données d’entraînement du modèle ont été digitalisées manuellement. Cette classification a porté uniquement sur les zones situées en dehors du masque « sols nus » produit à l’étape 2. Les classes strates arborées avec et sans feuilles sont ensuite regroupées et la couche des classes de végétation est finalement fusionnée avec le masque « sols nus » pour produire une couche complète et cohérente (Figure 4.5).

Afin d’évaluer la qualité de la cartographie des classes de végétation, 200 points répartis sur l’orthoimage du vol drone n°1 ont été photo-interprétés et une matrice de confusion a été calculée (Tableau 4.1). Une précision globale de 90% pour cette étape a été calculée. La strate de « végétation basse » est légèrement surestimée avec 16% des prédictions qui sont confondues avec la strate arborée. Par conséquent, la classe « strate arborée » qui sera utilisée dans la suite de la méthode est légèrement sous-estimée. Cela peut s’expliquer par la difficulté de photo-interprétation dans certaines parties de l’orthoimage plus floues. Idéalement, il faudrait réaliser une vraie vérité terrain.

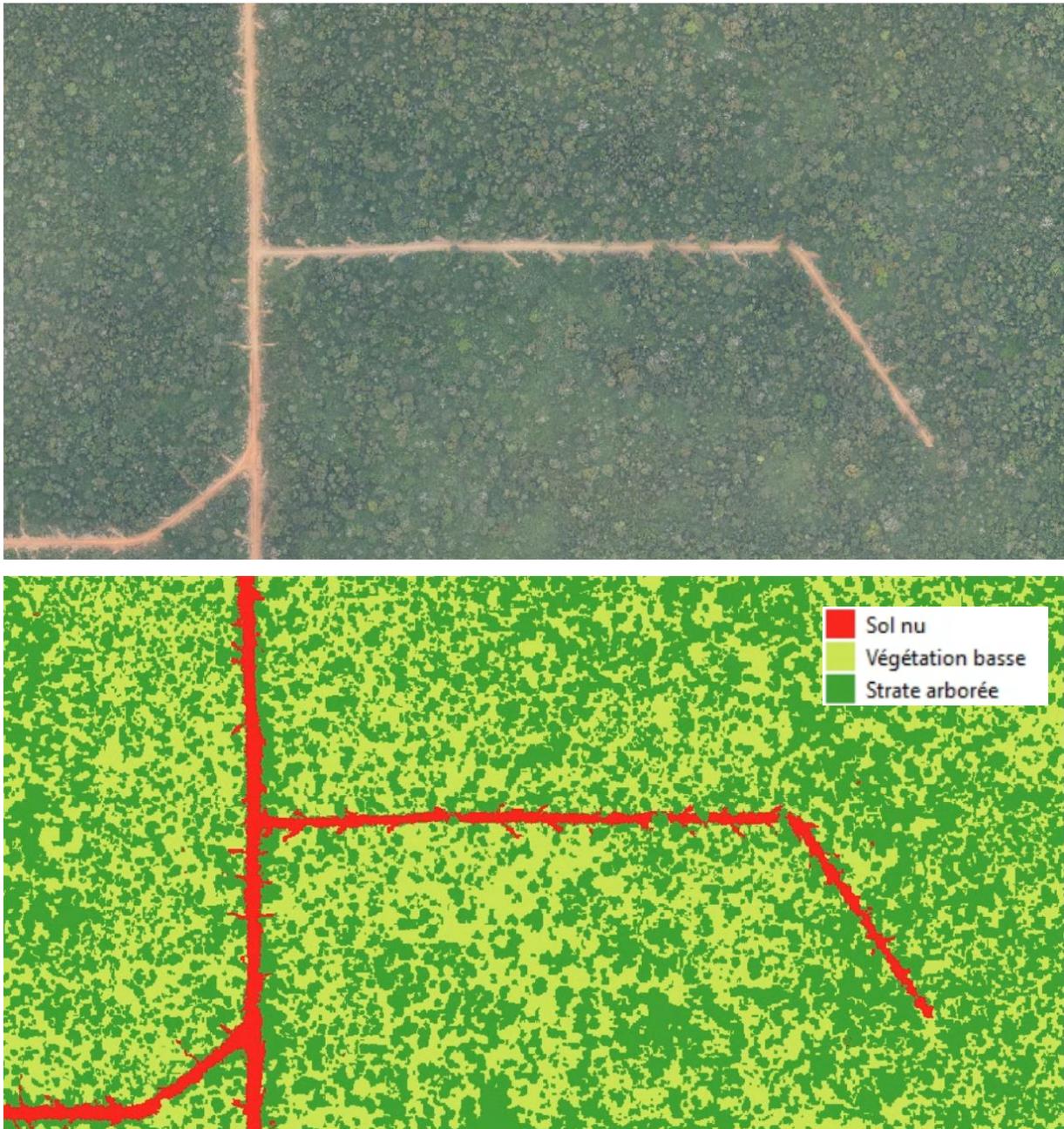


Figure 4.5 : Illustration du résultat de la classification des types de végétation pour le vol 1.

**Tableau 4.1 : Matrice de confusion permettant de comparer les résultats issus de la cartographie des classes de végétation à des données de référence (photo-interprétation des images drone).**

		Prédiction			Précision du producteur
		Sol nu	Végétation basse	Strate arborée	
Référence	Sol nu	4	0	0	<b>1.00</b>
	Végétation basse	0	70	6	<b>0.92</b>
	Strate arborée	1	13	106	<b>0.88</b>
	Précision de l'utilisateur	<b>0.80</b>	<b>0.84</b>	<b>0.95</b>	<b>0.90</b>

• **Etape 5 – Détection des zones perturbées par l'exploitation**

La classification réalisée à l'étape précédente permet de focaliser la recherche des perturbations sur la seule strate arborée. Cette détection s'opère en créant une couche raster traduisant la différence entre les MNH des 2 dates (date 2 – date 1) et en masquant celle-ci avec la classe « Strate arborée » issue de l'étape précédente. Un seuil correspondant à une différence de hauteur de 10 m est ensuite appliqué. La couche ainsi produite décrit les trouées apparues dans la canopée entre les vols 1 et 2. Cette couche est ensuite combinée aux deux MNH pour produire une segmentation décrivant des trouées de hauteur homogène. Chaque polygone est ensuite caractérisé par une différence de hauteur et une surface (Figure 4.6).

Afin d'évaluer la précision de la méthode de détection des zones perturbées, nous avons procédé en 2 temps.

1° Une série de 100 polygones a été sélectionnée au hasard parmi la couche des zones perturbées. Ces polygones ont ensuite été photointerprétés sur les orthoimages pour voir s'ils correspondaient à une perturbation apparue entre les 2 vols. Le pourcentage de détections correctes est de 91 % en termes de surface. Les fausses détections sont plus importantes dans les trouées de petite taille (Tableau 4.3).

2° Une série de 100 trouées repérées par photointerprétation sur les orthoimages a été comparée à la carte des perturbations. La totalité de ces trouées était reprise dans la carte des perturbations.

On peut donc considérer que la méthode proposée est très efficace et détecte la globalité des perturbations apparaissant dans la canopée suite à l'exploitation. Elle a par contre tendance à surestimer les surfaces perturbées de 9 %.

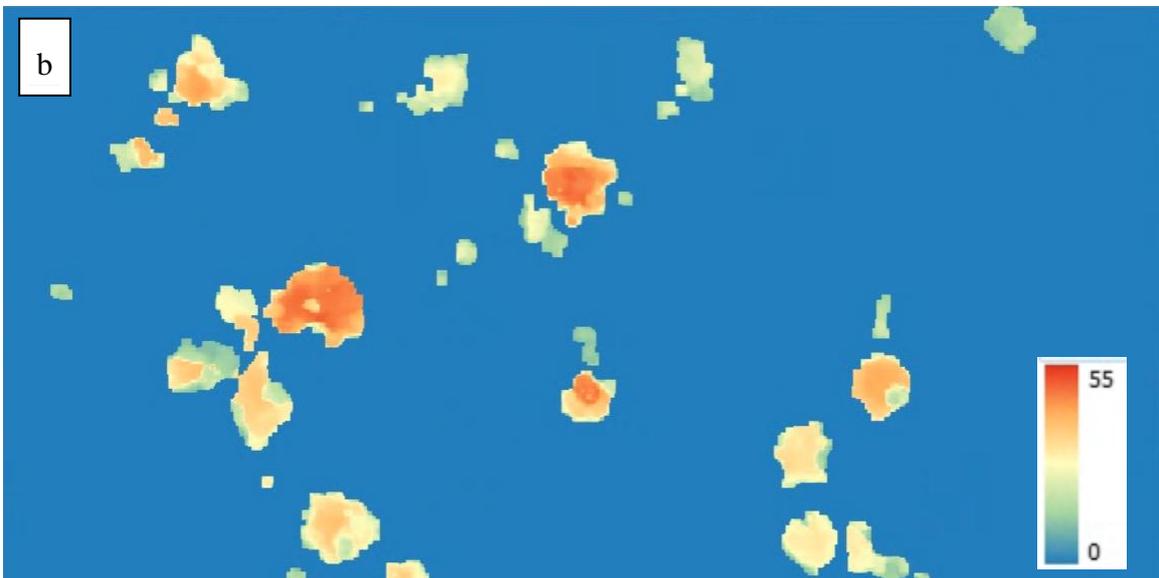
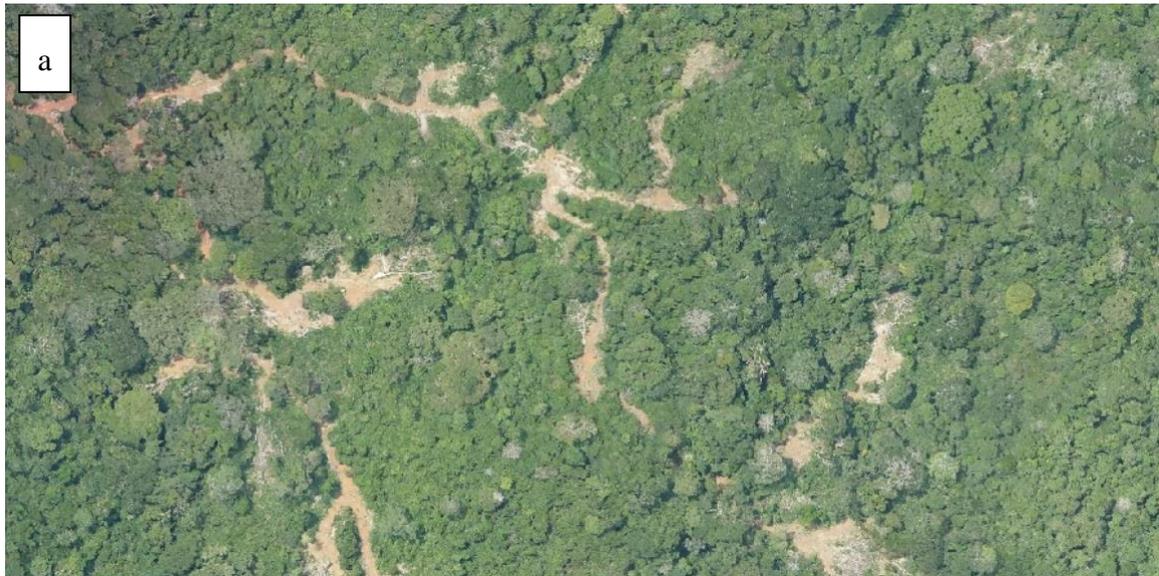


Figure 4.6 : Délimitation des zones perturbées dans la canopée : (a) orthoimage du vol 2, (b) différence de MNH (MNC=MNH dans légende) entre les 2 dates dans la strate arborée, (c) Perturbations opérées dans la strate arborée. Le sol nu encore apparent sur l'image c est le sol nu de la strat « marantacées ».

- **Etape 6 – Production de statistiques sur les zones perturbées**

Les différentes couches produites tout au long de la chaîne de traitement permettent de dériver différentes statistiques.

Le Tableau 4.2 présente la répartition des classes d'occupation du sol au sein de la zone étudiée avant exploitation. On constate que la strate arborée ne représente que 57 % de la surface étudiée. Le Tableau 4.3 quant à lui décrit les perturbations réalisées lors de l'exploitation. Comme évoqué au point précédent, les faux positifs sont plus importants dans la classe « 0 - 0,05 ha » où ils représentent 18 % de la surface prédite. Un facteur correctif a été appliqué aux surfaces prédites par la carte des perturbations. Globalement, celles-ci impactent 6,7 % de la strate arborée. Près de 60 % de la surface perturbée correspond à des surfaces inférieures à 0,1 ha. Les perturbations supérieures à 1 ha ne représentent que 1.1 % de la surface perturbée.

**Tableau 4.2 : Importance des différentes classes d'occupation du sol au sein de la zone d'étude avant exploitation.**

Classe	Surface (vol 1)	
	ha	%
Strate arborée	1676.1	56.9
Végétation basse	1190.0	40.4
Sol nu	66.9	2.3
Baï	14.5	0.5
<b>Total</b>	<b>2947.5</b>	<b>100.0</b>

**Tableau 4.3 : Description des perturbations observées dans la strate arborée suite à l'exploitation réalisée entre les 2 vols en fonction de la taille des perturbations : nombre de perturbations, surface perturbée exprimée en ha, en % de la surface totale, de la surface arborée et de la surface perturbée.**

Classes de surface	Nombre de perturbations	Faux positifs (%)	Surface (ha)		% surface totale	% strate arborée	% perturbations
			Brute	Corrigée			
< 0.05 ha	2409	17.8	38.6	31.7	1.08	1.89	28.2
0.05 - 0.10 ha	513	4.5	35.7	34.1	1.16	2.04	30.3
0.1 - 0.25 ha	241	0	35.0	35.0	1.19	2.09	31.1
0.25 - 0.5 ha	27	0	8.7	8.7	0.30	0.52	7.8
0.5 - 1.0 ha	3	0	1.7	1.7	0.06	0.10	1.5
1.0 - 2.0 ha	1	0	1.2	1.2	0.04	0.07	1.1
<b>Total</b>	<b>3194</b>	<b>8.9</b>	<b>121.1</b>	<b>112.6</b>	<b>3.82</b>	<b>6.72</b>	<b>100.0</b>

### 4.3. Conclusions et perspectives de suivi à partir d'images drone des perturbations de la canopée causées par les opérations d'exploitation forestière

La méthode présentée a permis de dresser une cartographie relativement précise des perturbations causées par l'exploitation dans la strate arborée. La totalité des trouées sont détectées et les faux positifs ne représentent que 9 % des perturbations prédites.

La chaîne de traitement développée fonctionne de manière relativement simple. Elle nécessite cependant quelques interventions manuelles notamment pour la fixation du seuil lié à la détection des sols nus, à la digitalisation de points « sols nus » et à la digitalisation de points d'entraînement pour les modèles de classification.

L'intérêt de l'approche proposée réside dans sa capacité à focaliser sa détection sur la seule strate arborée. Elle évite donc une surestimation des perturbations sachant que la couverture arborée initiale est d'à peine 57 %.

En termes de perspective et de piste d'amélioration, on peut mentionner que le remplacement de la caméra RGB par une caméra multispectrale permettrait certainement d'améliorer l'étape de stratification des classes de végétation.

### 4.4. Génération d'informations pour l'écocertification

Les produits générés pour ce volet 4 ont été mis en relation avec certains critères d'écocertification. Les figures ci-dessous présentent des exemples d'indicateurs quantitatifs objectifs de suivi de l'exploitation forestière à impact réduit qui peuvent être générés.

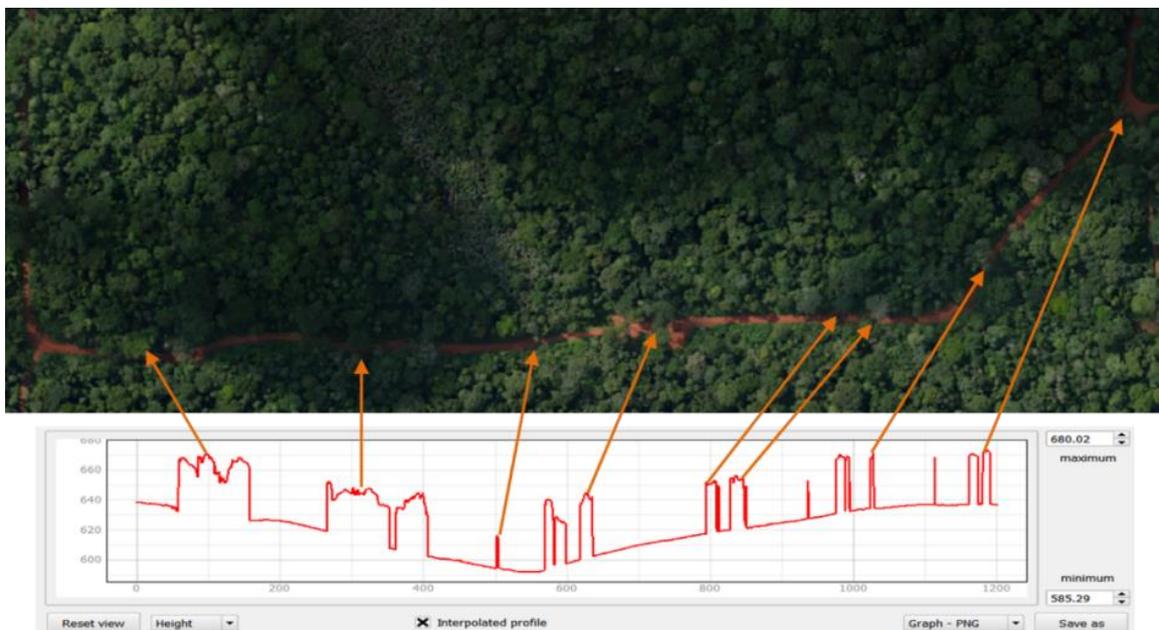


Figure 4.7 : Exemple de l'emprise des houppiers sur le profil longitudinal d'une voirie secondaire généré à partir du Modèle Numérique de Surface. Le rapport entre la longueur d'houpier superposant la route et la longueur de la route serait un bon indicateur quantitatif attestant de pratiques d'Exploitation Forestière à Impact Réduit (EFIR).

Les images drones permettent également le suivi des infrastructures telles que la largeur des routes, le nombre d'exutoires par kilomètre, la longueur des exutoires, la dimension des parcs à grumes, la qualité des ponts.



Figure 4.8 : Mesures de l'impact de la construction des routes sur la canopée, mesure des trouées.



Figure 4.9 : Exemple de mesures réalisées grâce à l'outil drone.

## Pont à culée canadienne



Figure 4.10 : Orthophotos géolocalisées des ponts à culée canadienne.

## Ponceau



Figure 4.11 : Orthophoto d'un ponceau.

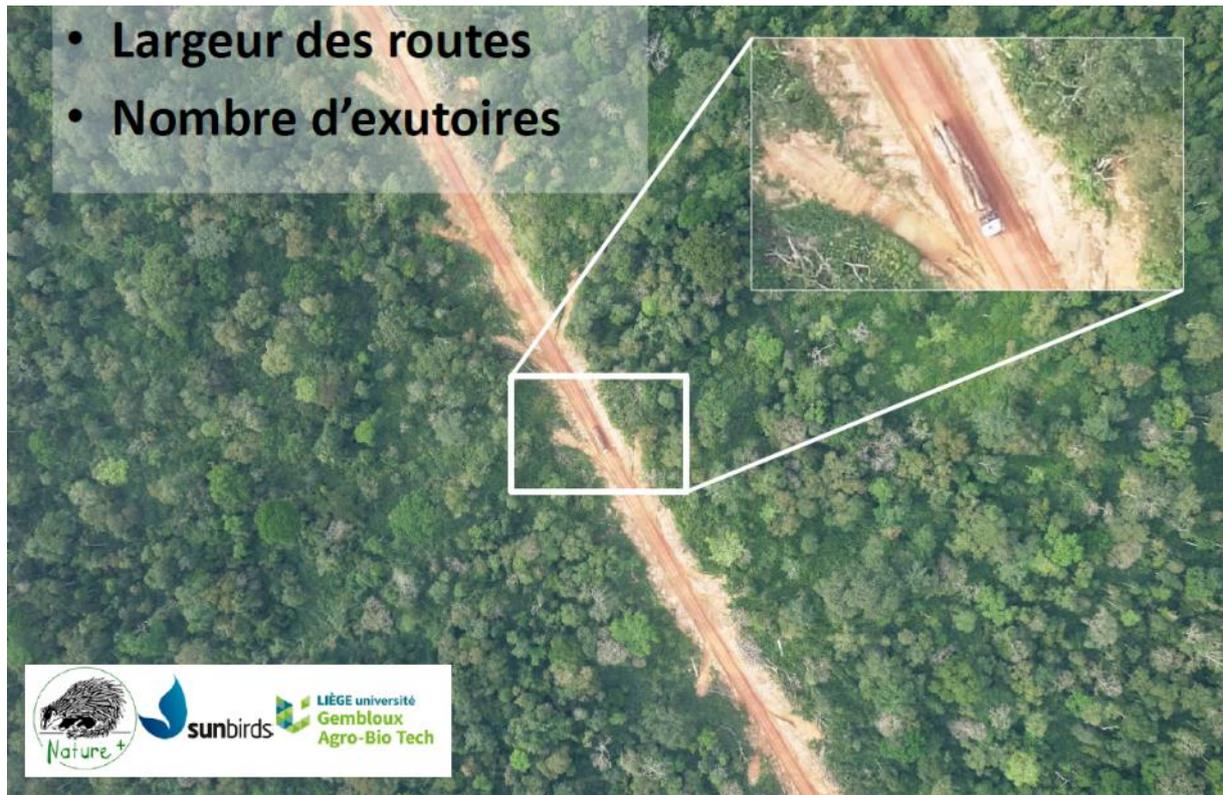


Figure 4.12 : Les orthophotos géolocalisées drone permettent de facilement évaluer la largeur des routes ou le nombre d'exutoires par km de route.



Figure 4.13 : Les orthophotos géolocalisées drone permettent l'identification et la localisation de campements illégaux (braconnage, sciage sauvage etc.).

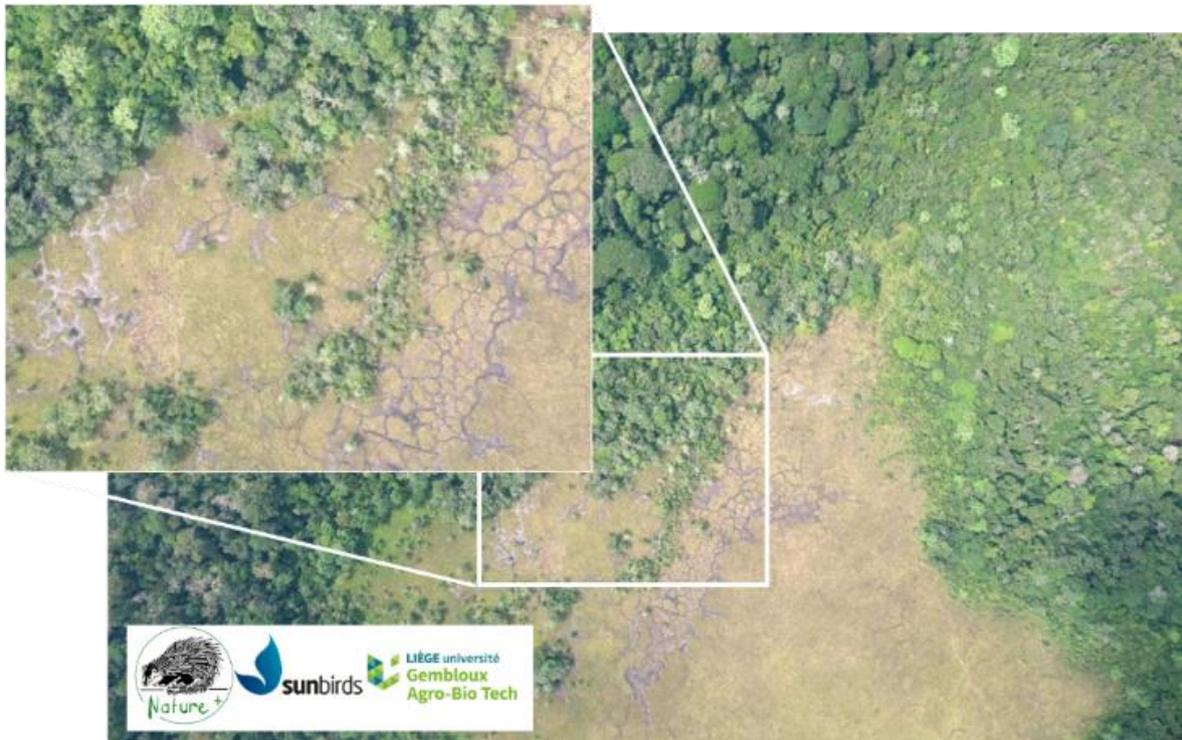


Figure 4.14 : Les orthophotos géolocalisées drone permettent le suivi d’habitats importants pour la faune (baï, saline etc.).



Figure 4.15 : Potentiel de l'imagerie drone comme outil de communication / information / sensibilisation : exploitation forestière à impact réduit d’une entreprise forestière certifiée FSC.



Figure 4.16 : Les orthophotos en appui au développement intégré de la base-vie: scierie, parc à grumes, habitations, préventions (inondations etc.).

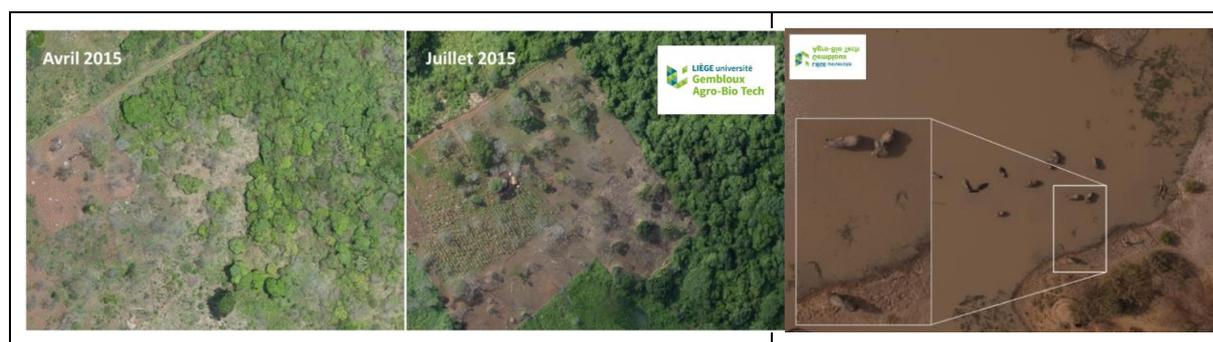


Figure 4.17 : Autres exemples d'usage de l'imagerie drone pour la certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers : suivi des limites des concessions et de l'extension des emprises agricoles illégales (à gauche, exemple en République Démocratique du Congo) suivi de la faune (à droite, exemple au Burkina Faso) (exemples issus de projets réalisés par GxABT).



Figure 4.18 : Autre exemple d'usage de l'imagerie drone pour la certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers : suivi des variations phénologiques dans les forêts d'Afrique centrale (exemples issus de : Utilisation des Phénocams pour le suivi des variations phénologiques dans les forêts d'Afrique centrale : un an à la limite forêt-savane dans le Parc National de Lopé, Gabon).

## 5. Volet 5 (activité 6.1.13) - Communication sur l'apport de la technologie drone en gestion forestière tropicale

Ce cinquième et dernier volet a été mené conjointement par Nature+ et Sunbirds. Les contraintes rencontrées pendant la mise en œuvre de l'action n'ont pas permis l'organisation d'un atelier de restitution dont le public cible devait être les entreprises forestières, les auditeurs d'écocertification ou de légalité et du personnel de l'administration forestière. Sur base des résultats obtenus lors du projet iDROC, des présentations des différentes possibilités d'intégration de la technologie drone dans les activités des entreprises forestières ont toutefois été réalisées. Ces présentations prennent notamment compte les faisabilités techniques, règlementaires et financières, les compétences requises et les formations nécessaires.

Les supports choisis, très illustrés, prennent la forme de matrice Excel, des fiches d'information de fiches techniques Word ou encore de présentation PowerPoint.

Une synthèse des activités mise en œuvre dans le cadre du projet iDROC est reprise dans une présentation PowerPoint : « Le Projet iDROC : Une expérience pilote pour une intégration de l'imagerie DRONE dans la Certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers » (annexe 11).

Les expériences acquises dans le cadre du projet iDROC ont été confrontées aux référentiels d'écocertification et de légalité en termes de potentiel d'utilisation par PCI (Principes, Critères, Indicateurs). L'analyse est reprise et illustrée dans la « Matrice de transfert des référentiels FSC / OLB en tâches élémentaires - potentiel de l'imagerie drone par PCI » (annexe 12).

Les chaînes de traitement appliquées, produits cartographiques et retours d'expérience dans les différents volets du projet iDROC ont été capitalisés et vulgarisés sous forme de fiches techniques / d'information :

- Fiche d'information : L'Intelligence Artificielle (IA) au service de l'identification et localisation d'essences commerciales tropicales par drone (annexe 13) ;
- Fiche technique : estimation du diamètre des essences identifiées par drone (annexe 14) ;
- Fiche technique : Illustrations du potentiel de l'imagerie drone dans la certification forestière dans le bassin du Congo (annexe 15) ;
- Fiche technique : Retour d'expérience sur l'acquisition d'images drone en forêt dense humide tropicale dans le bassin du Congo (annexe 16) ;
- Fiche technique : Carte des classes géomorphologiques à partir d'images drone (annexe 17) ;
- Fiche technique : Carte de densité des grands arbres à partir d'images drone (annexe 18) ;
- Fiche technique : Carte des principaux types d'occupation du sol à partir d'images drone (annexe 19) ;
- Fiche technique : Carte des strates forestières à partir d'images drone et usage son usage pour la planification des routes et pistes forestières (annexe 20) ;
- Fiche technique : Développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée (annexe 21).

Sur base des leçons apprises quant à l'acquisition d'images drone dans les massifs forestiers de production des pays du Bassin du Congo, des opportunités de projets de développement drone contribuant à la certification forestière dans le bassin du Congo ont été reprises de manière succincte dans un mémo présenté en annexe 22.

## Annexes

- Annexe 1 : Contrat de collaboration Nature+ - Sunbirds
- Annexe 2 : Contrat de collaboration Nature+ - TER-Consult
- Annexe 3 : Accord de confidentialité réciproque iDROP / iDROC
- Annexe 4 : Rapport Narratif 1 – 01-2019 à 09/2019
- Annexe 5 : Rapport Narratif 2 – 10-2019 à 10/2020
- Annexe 06 : Le drone en Gestion forestière tropicale 04-02-2020
- Annexe 07 : Etat d'avancement iDROC 06-04-2021
- Annexe 08 : Etat d'avancement iDROC 19-10-2021
- Annexe 09 : Présentation du service DeepForest Sunbirds
- Annexe 10 : Volet 4 - Développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée
- Annexe 11 :: Le Projet iDROC : Une expérience pilote pour une intégration de l'imagerie DRone dans la Certification forestière des écosystèmes tropicaux forestiers
- Annexe 12 : Matrice de transfert des référentiels FSC / OLB en tâches élémentaires - potentiel de l'imagerie drone par PCI
- Annexe 13 : Fiche d'information : L'Intelligence Artificielle (IA) au service de l'identification et localisation d'essences commerciales tropicales par drone
- Annexe 14 : Fiche technique : estimation du diamètre des essences identifiées par drone
- Annexe 15 : Fiche technique : Illustrations du potentiel de l'imagerie drone dans la certification forestière dans le bassin du Congo
- Annexe 16 : Fiche technique : Retour d'expérience sur l'acquisition d'images drone en forêt dense humide tropicale dans le bassin du Congo
- Annexe 17 : Fiche technique : Carte des classes géomorphologiques à partir d'images drone
- Annexe 18 : Fiche technique : Carte de densité des grands arbres à partir d'images drone
- Annexe 19 : Fiche technique : Carte des principaux types d'occupation du sol à partir d'images drone

- Annexe 20 : Fiche technique : Carte des strates forestières à partir d'images drone et usage son usage pour la planification des routes et pistes forestières
- Annexe 21 : Fiche technique : Développement d'un système standardisé de suivi des perturbations de la canopée
- Annexe 22 : Mémo reprenant de manière succincte des opportunités de projets de développement drone contribuant à la certification forestière dans le bassin du Congo