

Contribution de la croissance en hauteur et de l'expansion latérale des couronnes à la fermeture des trouées et influence des facteurs topographiques et des propriétés structurales des trouées au sein de la Réserve de Biosphère de Yangambi (RDC).

Auteur : Leyen, Laurine

Promoteur(s) : Bastin, Jean-François; Vander Linden, Arthur

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24133>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**CONTRIBUTION DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR
ET DE L'EXPANSION LATÉRALE DES COURONNES
À LA FERMETURE DES TROUÉES ET INFLUENCE
DES FACTEURS TOPOGRAPHIQUES ET DES
PROPRIÉTÉS STRUCTURELLES DES TROUÉES AU
SEIN DE LA RÉSERVE DE BIOSPHÈRE DE
YANGAMBI (RDC)**

LAURINE LEYEN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS: PR. JEAN-FRANÇOIS BASTIN – ARTHUR VANDER LINDEN

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**CONTRIBUTION DE LA CROISSANCE EN HAUTEUR
ET DE L'EXPANSION LATÉRALE DES COURONNES
À LA FERMETURE DES TROUÉES ET INFLUENCE
DES FACTEURS TOPOGRAPHIQUES ET DES
PROPRIÉTÉS STRUCTURELLES DES TROUÉES AU
SEIN DE LA RÉSERVE DE BIOSPHÈRE DE
YANGAMBI (RDC)**

LAURINE LEYEN

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN GESTION DES FORETS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

CO-PROMOTEURS: PR. JEAN-FRANÇOIS BASTIN – ARTHUR VANDER LINDEN

Remerciements

Je tiens à remercier Arthur Vander Linden pour son accompagnement et sa disponibilité tout au long de ce mémoire, ainsi que pour ses suggestions pertinentes. Il est à l'origine de nombreuses réflexions et idées qui se retrouvent dans ce travail.

Je remercie également le Professeur Jean-François Bastin pour son suivi régulier. Ses précieux conseils m'ont permis d'améliorer la qualité et la pertinence de mon travail.

Merci aussi à mes parents pour les relectures attentives et pour le soutien tout au long de mes études, et un merci particulier à mon petit frère, qui m'a convaincue d'utiliser LaTeX.

Enfin, merci à mes amis, grâce à qui cette période particulière a été plus agréable, et qui ont rendu mon passage à Gembloux inoubliable.

Résumé

Les trouées sont des ouvertures dans la canopée, et la manière dont elles se referment influence la structure de la forêt, en favorisant la croissance de jeunes arbres ou le développement d'arbres de canopée.

Les trois processus utilisés pour décrire la dynamique forestière se retrouvent dans les trouées : la mortalité, le recrutement et la croissance. La mortalité est approchée par l'apparition des trouées, tandis que pour évaluer le recrutement et la croissance, il faut s'intéresser à la fermeture des trouées. Deux phénomènes participent à la fermeture des trouées : la croissance verticale (la croissance en hauteur des plants situés dans la trouée ou le recrutement de nouveaux arbres) et la croissance horizontale (l'extension des couronnes des arbres adjacents). Elles peuvent aussi stagner pendant un certain temps, c'est-à-dire ne pas se refermer. La surface et la forme de la trouée influencent l'interaction entre les arbres adjacents et l'intérieur de l'ouverture, il est donc probable qu'ils influencent le mode de fermeture. La topographie influence les conditions environnementales, la hauteur de la canopée et la surface des trouées.

Ici nous étudions l'influence de la surface, la forme, la hauteur initiale et la topographie de la trouée sur le mode de fermeture de la trouée, en séparant croissance horizontale, croissance verticale et stagnation.

La surface est le paramètre ayant le plus d'influence sur le mode de fermeture des trouées : les petites surfaces favorisent la croissance horizontale au détriment de la croissance verticale et la stagnation. Cela s'explique par la vitesse plus rapide de la croissance horizontale, qui est favorisée en cas de compétition entre ces deux modes de croissance. Cependant, l'expansion des couronnes est limitée à la bordure des trouées. Lorsque la surface de la trouée augmente, une partie de celle-ci devient inatteignable par la croissance horizontale et cela augmente la proportion de croissance verticale.

Les formes complexes sont associées aux grandes surfaces, leur influence est donc similaire. L'altitude est le facteur topographique qui influence le plus le mode de fermeture. Elle favorise la stagnation, au détriment de la croissance.

Les trouées sont des mécanismes fondamentaux dans la dynamique forestière, et cette étude aide à mieux comprendre leur fonctionnement. Les facteurs utilisés dans ce mémoire sont calculés à l'échelle de la trouée. A l'avenir, il serait pertinent de travailler à l'échelle du pixel. Cela permettrait de tenir compte des variations au sein des trouées, notamment la distance entre un point et la forêt adjacente et la hauteur initiale d'un point.

Mots-clés : Dynamique forestière ; Trouée ; Croissance horizontale ; Croissance verticale ; Topographie ; Forêt tropicale ; Télédétection ; LiDAR ; Afrique Centrale ; République Démocratique du Congo

Abstract

Forest gaps are openings of the canopy. The way they close influences forest structure, by promoting saplings and seedlings or canopy trees. Three processes are used to describe forest dynamic, and they all take place in forest gaps :death, recruitment and growth. Death is approached by gap creation, while recruitment and growth are approached by gap closure. Two processes are part of gap closure : vertical growth (height growth of vegetation and tree recruitment within the gap) and horizontal growth (the extension of adjacent tree crowns). They may also stagnate for a while. Gap size and shape influence the interaction between adjacent trees and the inside of the opening. It is likely that they influence the way gaps close. Topography influences environmental conditions, canopy height and gap sizes.

Here we study the contribution of horizontal growth, vertical growth and stagnation on gap closure, and the way these processes are influenced by size, shape, initial height of gaps and topography.

Gap size is the most influential parameter. Small gaps promotes vertical horizontal growth and limits vertical growth and stagnation, because horizontal growth goes faster than vertical growth. When there is competition between these two types of growth, horizontal growth is promoted. However, crown expansion is restricted to gap edges. When gap size increases, part of it become unreachable to crowns, and proportion of vertical growth and stagnation increases.

Complex shapes are associated to big gaps. Therefore, they have a similar effect. Elevation is the most influencable topographic parameter. It promotes stagnation and limits growth.

Gaps are fundamental elements of forest dynamic, and this study helps to better understand the way they work. The factors used in this report are calculated at gap-scale. Future research could work at pixel-scale= ; It would allow to study within-gap variation, especially within-gap position and initial height.

Keywords : Forest dynamic ; Forest gap ; Horizontal growth ; Vertical growth ; Topography ; Tropical forest ; Remote sensing ; LiDAR ; Central Africa ; Democratic Republic of Congo

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Importance des forêts de la République Démocratique du Congo	6
1.2	Structure et dynamique forestières	6
1.2.1	Rôle et fonctionnement des trouées	7
1.2.2	Facteurs topographiques	9
1.3	Méthodologie	10
1.4	Objectif et hypothèses	12
2	Matériel et Méthodes	13
2.1	Zone d'étude	13
2.2	Données récoltées	14
2.3	Pré-traitement des données	14
2.4	Définition et identification des trouées	15
2.5	Mesure de la taille, de la forme et de la hauteur initiale des trouées et de la topographie . . .	16
2.6	Distinction des croissances horizontale et verticale	16
2.6.1	Méthode 1 : Seuil de hauteur	17
2.6.2	Méthode 2 : Détection automatique des couronnes	17
2.7	Analyse statistique	18
2.7.1	Méthode 1 : Seuil de hauteur	18
2.7.2	Méthode 2 : Détection automatique des couronnes	18
3	Résultats	20
3.1	Définition des trouées	20
3.2	Distribution des variables explicatives	22
3.3	Méthode 1 : Seuil de hauteur	24
3.4	Méthode 2 : Détection automatique des couronnes	26
3.4.1	Modes de fermeture	26
3.4.2	Corrélogramme	26
3.4.3	Modèles Additifs Généralisés	27
4	Discussion	31
4.1	Interprétation écologique	31
4.1.1	Propriétés structurelles	31
4.1.2	Facteurs topographiques	33
4.2	Aspects méthodologiques	34
4.2.1	Définition des trouées	34
4.2.2	Méthode 1 : Seuil de hauteur	35
4.2.3	Méthode 2 : Détection automatique des couronnes	35
5	Conclusion	37
6	Contribution personnelle	38

7	Bibliographie	39
8	Annexes	45
8.1	Annexe 1 : DTM de la zone d'étude en 2014	45
8.2	Annexe 2 : CHM de la zone d'étude en 2014	46
8.3	Annexe 3 : CHM de la zone d'étude en 2023	47
8.4	Annexe 4 : Distribution des surfaces des trouées inférieures à 200 m^2 en 2014	48
8.5	Annexe 5 : Distribution des surfaces des trouées inférieures à 200 m^2 en 2023	48

Table des figures

2.1	<i>Réserve de Biosphère de Yangambi et ses environs.</i>	13
2.2	<i>Localisation de la zone d'étude.</i>	14
2.3	<i>Exemple de trouées identifiées en 2014.</i>	15
2.4	<i>Étapes d'identification de la croissance horizontale sur une zone de 4 ha.</i>	18
3.1	<i>Croissance sur 9 ans (m/9 ans) en fonction de la hauteur initiale en 2014 (m).</i>	20
3.2	<i>Distribution des surfaces des trouées en 2014.</i>	21
3.3	<i>Distribution des surfaces des trouées en 2023.</i>	22
3.4	<i>Distribution des variables explicatives au sein des trouées détectées en 2014.</i>	23
3.5	<i>Variables topographiques sur la zone d'étude.</i>	24
3.6	<i>Première et deuxième composantes principales de la ACP sur les classes de croissance annuelle.</i>	25
3.7	<i>Distribution relative des modes de fermeture.</i>	26
3.8	<i>Corrélations entre les pourcentages de croissance horizontale (% horizontal), de croissance verticale (% vertical) et de stagnation (% stagnation) et les variables explicatives.</i>	27
3.9	<i>Pourcentage de croissance horizontale (Axe Y) en fonction des variables explicatives significatives (Axe X) dans le GAM.</i>	28
3.10	<i>Pourcentage de stagnation (Axe Y) en fonction des variables explicatives significatives (Axe X) dans le GAM.</i>	29
3.11	<i>Pourcentage de croissance verticale (Axe Y) en fonction des variables explicatives significatives (Axe X) dans le GAM.</i>	30
3.12	<i>Surface initiale de la trouée en 2014 (Axe Y) en fonction de la forme de la trouée en 2014 (Axe X).</i>	30
8.1	<i>Modèle Numérique de Terrain (DTM) en 2014.</i>	45
8.2	<i>Modèle Numérique de Canopée (CHM) en 2014.</i>	46
8.3	<i>Modèle Numérique de Canopée (CHM) en 2023.</i>	47
8.4	<i>Distribution des surfaces des trouées en 2014.</i>	48
8.5	<i>Distribution des surfaces des trouées en 2023.</i>	48

Table des tableaux

1.1	<i>Paramètres choisis par différentes études pour définir une trouée.</i>	11
3.1	<i>Répartition de la surface des trouées en 2014 et en 2023.</i>	21
3.2	<i>Minimum, 1^{er} quartile, médiane, moyenne, 3^{ème} quartile et maximum de chaque variable explicative.</i>	23
3.3	<i>Tests de Shapiro, Levene et Kruskal-Wallis effectués pour évaluer l'effet de la largeur de la zone tampon.</i>	25
3.4	<i>Test de Dunn évaluant les différences entre les largeurs de la zone tampon 2 à 2.</i>	26
3.5	<i>P-valeurs des variables explicatives (en ligne) selon les 3 modes de fermeture (en colonne).</i>	28

Liste des abréviations

CHM Canopy Height Model
DTM Digital Terrain Model
GAM General Additive Model
ITD Individual Tree Detection
ITS Individual Tree Segmentation
TPI Topographic Position INdex
TRI Terrain Ruggedness Index
RDC République Démocratique du Congo

Chapitre 1

Introduction

1.1 Importance des forêts de la République Démocratique du Congo

Les forêts denses humides tropicales rendent de nombreux services écosystémiques (Gardner et al., 2009; Pan et al., 2013). Plus particulièrement, le Bassin du Congo abrite le deuxième plus grand massif de forêts tropicales denses au monde, juste après l'Amazonie (C et al., 2012, 2014; Eba'a Atyi et al., 2022). Il présente une diversité floristique et faunique impressionnante, avec entre autre la présence d'espèces emblématiques et menacées, comme les éléphants de forêt ou les chimpanzés (*Le bassin du Congo, forêt pluviale menacée* — WWF France, s. d.). Les forêts d'Afrique Centrale séquestrent environ 40Gt de CO₂ et absorbent en moyenne plus de CO₂ que l'Amazonie, malgré une surface plus faible (Eba'a Atyi et al., 2022). 60 millions de personnes vivent dans ces forêts et en retirent des moyens de subsistance (nourriture, combustible, médicament...) et 40 autres millions de personnes vivant en zone urbaine comptent sur ces milieux pour s'alimenter (C et al., 2014). Rien qu'en République Démocratique du Congo (RDC), les forêts denses couvrent 21 millions d'ha (C et al., 2012). En plus de l'impact du changement climatique et malgré leur importance, ces milieux sont menacés par la déforestation et la dégradation de l'écosystème. En RDC, celles-ci se pratiquent plutôt à petite échelle, en faveur de l'agriculture sur brûlis, de la production artisanale de bois d'œuvre et de charbon de bois. La déforestation tend à s'accélérer : entre 1990 et 2000, le taux de déforestation net (la différence entre le taux de déforestation et le taux de reforestation) était de 0.11%, et il était de 0.22% entre 2000 et 2010 (C et al., 2012).

Les forêts denses humides sont difficiles d'accès, car elles sont reculées et possèdent une végétation dense qui ralentit la progression en forêt. Par conséquent, ces données sont souvent récoltées à petite échelle, ce qui n'aide pas à appréhender l'hétérogénéité de la forêt. Les forêts d'Afrique Centrale, et plus précisément celles de la République Démocratique du Congo, sont encore moins étudiées que les autres (Jucker, 2022), car le contexte socio-économique et politique y complique encore les missions. Pourtant, les conditions environnementales sont différentes en Afrique Centrale, avec des précipitations environ deux fois plus faibles qu'en Amazonie : 1500-2000 mm/an dans le Bassin du Congo, contre 2500-3000 mm/an en Amazonie. Le schéma des sécheresses est également différent, avec des sécheresses plus faibles mais plus longues en Afrique (Asefi-Najafabady & Saatchi, 2013). Il n'est donc pas possible de se contenter des connaissances acquises en Amérique du Sud ou en Asie, car les conclusions risquent d'être différentes d'un continent à l'autre.

1.2 Structure et dynamique forestières

Les forêts tropicales sont des écosystèmes complexes. On y distingue 4 strates verticales ou étages de végétation, du sommet de la forêt jusqu'au sol (*What are characteristics of rainforests ?*, s. d.) :

- les arbres émergents : les arbres les plus grands, qui surplombent la canopée. Ils sont les plus exposés aux facteurs météorologiques : luminosité, vent, pluies ;

- la canopée : l'étage le plus dense, et celui captant le plus de lumière, dans lequel la croissance est la plus importante ;
- le sous-étage : un ensemble d'arbres plus petits mais aussi d'arbres n'ayant pas encore atteint leur hauteur maximale, et dont la croissance est limitée par la canopée qui capte la majorité de la luminosité ;
- le sol : au niveau du sol se retrouvent les très jeunes plants et les buissons. Peu de lumière atteint cette partie de la forêt.

Ces 4 strates sont réparties de manière hétérogène dans la forêt. Par ailleurs, les forêts évoluent avec le temps. Ces variations influencent entre autre les stocks de carbone et la richesse spécifique. En comprendre la dynamique est important pour pouvoir les protéger. La dynamique forestière s'appréhende via trois paramètres :

- **recrutement** : le "passage d'un individu au-delà d'un certain seuil de taille" (Favrichon et al., 1998). On parle aussi de régénération.
- **croissance** : l'accroissement d'un arbre, autant en hauteur qu'en largeur. En hauteur, la croissance verticale consiste en l'agrandissement de la tige vers le haut. En largeur, la croissance horizontale correspond à l'augmentation de la surface de la couronne (Blanchard et al., 2016). Cette dernière permet au tronc de s'épaissir, afin de supporter les contraintes mécaniques induites par la croissance verticale. Le rapport entre la croissance horizontale et verticale est influencé par la compétition. En effet, plus la densité de tige est importante, plus l'arbre favorise la croissance verticale afin de dépasser ses congénères et de capter plus de lumière. Dans les zones moins denses, l'arbre peut mieux se consacrer à la croissance horizontale (Harry et al., 1964).
- **mortalité** : la mort d'un ou plusieurs arbres ou même la chute d'une branche créent des ouvertures dans la canopée appelée trouée (Muscolo et al., 2014). Il arrive que l'arbre meure sur pied mais, dans 85 % des cas, les arbres sont déracinés ou leur tronc se casse (Putz & Milton, 1982, cité par Cushman et al., 2022).

1.2.1 Rôle et fonctionnement des trouées

Les trouées jouent un rôle capital dans la dynamique de la canopée, car elles regroupent ces 3 phénomènes : elles sont créées par la mort d'un ou plusieurs arbres ou par la chute d'une branche, ce qui favorise le recrutement puis la croissance d'autres arbres. En effet, 75 % des espèces de forêts tropicales dépendent de la formation de trouées pour assurer leur régénération (Hartshorn, 1978).

Les trouées apparaissent à la suite d'une perturbation, qui peut être de plusieurs types : la sénescence des arbres ou des facteurs externes tels que le vent, les pluies externes, les maladies (Muscolo et al., 2014), ou encore la profondeur du sol (Cushman et al., 2022).

La chute de l'arbre provoque un changement des conditions environnementales à l'intérieur de la trouée, qui favorise la régénération. La principale variation est l'augmentation des radiations solaires qui arrivent jusqu'aux sous-étages de végétation, ce qui augmente la lumière, la température de l'air et la température du sol au sein de la trouée (Denslow, 1987). C'est ce facteur qui influence le plus la régénération (van Dam, 2001). L'humidité du sol est également affectée : la partie supérieure du sol est plus sèche car l'augmentation des rayons lumineux arrivant au sol augmente l'évaporation du sol. A l'inverse, la partie inférieure du sol est plus humide, car la quantité de précipitations atteignant le sol est plus importante, et car l'évapotranspiration diminue. Il y a également un gradient d'humidité décroissant entre le centre des trouées et les bordures. (Becker et al., 1988).

Si la formation des trouées promeut la régénération, la fermeture des trouées influence la durée et le succès de cette phase de régénération. Quand la trouée se referme, les conditions environnementales initiales se rétablissent peu à peu (Schliemann & Bockheim, 2011). Les croissances verticale et horizontale participent à la fermeture des trouées. Pour la croissance verticale, les trouées sont d'abord colonisées par des espèces

héliophiles, puis par des espèces sciaphiles, et disparaissent petit à petit. La croissance horizontale au sein des trouées est aussi favorisée, puisque de l'espace est libéré dans la canopée. Cette phase de fermeture peut prendre du temps, et il arrive aussi que les trouées soient en stagnation. Bien sûr, plusieurs modes de croissance/stagnation peuvent co-exister au sein d'une même trouée.

L'apparition de trouées est relativement bien étudiée, et est utilisée comme proxy pour évaluer la mortalité de la forêt. Par contre, il y a un manque de connaissance sur leur mode de fermeture. Différencier la croissance horizontale de la croissance verticale est pourtant important, car cela permettrait de mieux évaluer la contribution des trouées à la croissance verticale, et donc à l'apparition de nouveaux arbres de canopée.

Il y a de l'hétérogénéité spatiale à l'échelle de la forêt, et toutes les trouées ne sont pas identiques. En particulier, la taille, la forme et la hauteur initiale des trouées varient (Whitmore, 1989).

La taille de la trouée, évaluée via la surface, reflète l'importance de la perturbation. Les grandes trouées sont causées par un grand taux de perturbation ou un faible taux de fermeture (Reis et al., 2022). La distribution de la taille des trouées suit en général une courbe en J inversé (ou distribution de puissance), indiquant une prédominance des trouées de petite surface, avec la présence de quelques trouées plus grandes. Ainsi, Gorgens et al. (2023) ont montré que 82 à 95% des trouées étaient inférieures à 100 m^2 dans l'Amazonie brésilienne. Plus la trouée est grande, plus les changements environnementaux décrits plus haut sont importants. En effet, quand la surface augmente, la proportion d'ombre créée par les arbres adjacents diminue, ce qui augmente la proportion de radiations solaires et accentue la modification des conditions environnementales décrites précédemment (Schliemann & Bockheim, 2011). Ainsi, les grandes trouées favorisent les espèces pionnières, tandis que les petites trouées facilitent la présence d'espèces climaciques, souvent plus tolérantes à l'ombre (Denslow, 1987; Whitmore, 1989). La surface de la trouée influence aussi son mode de fermeture : les petites trouées sont plus facilement refermées par les arbres adjacents (croissance horizontale), tandis que les grandes trouées sont plutôt refermées par des arbres pionniers ou des lianes (croissance verticale) (Whitmore, 1989).

Les trouées sont généralement de forme irrégulière (Muscolo et al., 2014). La forme la plus simple est le cercle. Plus on s'en éloigne, plus la forme devient complexe et plus le périmètre de la trouée est grand. Cela signifie qu'une trouée de forme complexe aura plus de bordures, et donc plus d'interaction avec la forêt environnante. Cela se manifeste par de la compétition accrue pour la lumière et les ressources du sol (Muscolo et al., 2014).

Tout au long de l'existence d'une trouée, la hauteur moyenne de celle-ci varie. Elle commence par être relativement faible, en fonction de l'impact de la perturbation : certains arbres se cassent au niveau du tronc, tandis que d'autres sont complètement déracinés (Hartshorn, 1978). Ensuite, la trouée se referme petit à petit, et sa hauteur moyenne augmente pour finalement atteindre la canopée. La hauteur observée lors de la première collecte de données (appelée ci-après la hauteur initiale) reflète donc l'importance de la perturbation et/ou le stade d'avancement de la perturbation de la trouée.

La hauteur de la canopée influence la fréquence des trouées et la proportion de grandes trouées : plus les arbres sont hauts, plus leurs couronnes sont grandes (Sterck & Bongers, 2001), ce qui a tendance à créer des trouées plus étendues lorsqu'ils meurent (Reis et al., 2022). Cela pourrait aussi favoriser la croissance horizontale, car des arbres plus hauts ont une ombre plus grande. Les zones de canopée basse ont généralement une densité de bois plus importante et une diversité spécifique plus faible (Jucker, Bongalov, et al., 2018). Leur température est aussi généralement plus faible (Jucker, Hardwick, et al., 2018). La richesse du sol influence aussi la surface des trouées. Sur les sols plus fertiles, les trouées sont plus grandes, en partie parce que les arbres sont plus grands sur ce type de sol (Reis et al., 2022). Le déficit en eau du sol favorise les grandes trouées, probablement car ce manque d'eau ralentit la fermeture des trouées (Reis et al., 2022). L'exposition au vent favorise directement la présence de trouées, puisque le vent est un des facteurs de création de ces dernières.

1.2.2 Facteurs topographiques

La topographie est la "disposition, [le] relief d'un lieu" (Larousse, s. d.). De multiples variables existent pour appréhender cette notion complexe. Elles ont des impacts généralement indirects sur la présence et la surface des trouées, en jouant sur d'autres paramètres environnementaux. Entre autres, les variations du relief influencent aussi les trouées : un relief différent entraîne la modification de l'angle avec lequel les rayons solaires touchent le sol (Muscolo et al., 2014) ce qui peut influencer leur quantité et leur intensité, et donc les paramètres décrits au point 1.2.1.

La variable topographique la plus simple à appréhender est l'altitude, qui représente l'élévation au-dessus du niveau de la mer et s'exprime en mètres. Lorsque l'altitude augmente, les conditions climatiques changent : la température diminue, le vent est plus fort... En Equateur, la hauteur moyenne passe de 32 m à 9 m lorsque qu'on passe de 1050 à 3060 m d'altitude (Homeier & Breckle, 2008). Même de faibles variations d'altitude, comme celles étudiées dans ce mémoire, peuvent avoir un impact (Jucker, Bongalov, et al., 2018 ; Werner & Homeier, 2015). Ainsi, plus l'altitude augmente, plus la hauteur de la canopée diminue (Tudose et al., 2023) car la disponibilité en eau et en nutriment diminue (Reis et al., 2022 ; Werner & Homeier, 2015). Jucker, Bongalov, et al. (2018) ont ainsi observé une diminution de la canopée de 1,5 m tous les 10 m d'altitude supplémentaires, et ce dans une zone d'étude comprise entre 50 et 250 m au-dessus du niveau de la mer. Les vallées alluviales ont donc les hauteurs de canopée maximales les plus grandes, ainsi que les plus grandes proportions de trouées. En altitude, le déficit en eau est plus élevé, ce qui favorise la présence de grandes trouées (Reis et al., 2022).

La pente représente l'inclinaison du terrain. Elle s'exprime en degrés ou en pourcentage. Les arbres situés en zone de pente sont plus instables, car ils sont plus exposés au vent et leur enracinement est moins profond, facilitant leur déracinement (Quesada et al., 2009). De plus, la pente est caractérisée par une canopée plus haute (Jucker, Hardwick, et al., 2018). Tout cela favorise la présence de (grandes) trouées. Des résultats contradictoires ont été trouvés par Werner & Homeier (2015) : sur les zones de fortes pentes, la décomposition de la matière organique est plus lente, entraînant des stocks de nutriments dans le sol plus faibles. Cela diminue la hauteur de la canopée, la production de biomasse et la surface terrière.

L'orientation de la pente influence aussi la hauteur des arbres et la présence de trouées. En effet, en région tropicale, des nuages se forment dans la journée. Ceux-ci diminuent l'intensité lumineuse l'après-midi, lorsque les pentes orientées à l'Ouest sont exposées au soleil. La végétation est donc plus haute sur les pentes orientées à l'Est, qui bénéficient de plus d'ensoleillement (Smith, 1977). La direction principale du vent influence aussi l'impact de l'orientation. Cependant, en Roumanie, Tudose et al. (2023) n'ont pas trouvé d'influence de l'orientation sur la surface des trouées.

Une autre manière de décrire la topographie est de s'intéresser à l'hétérogénéité du relief étudié, en calculant pour chaque point l'indice de rugosité du terrain (*Terrain Ruggedness Index* ou TRI). Celui-ci correspond à la moyenne des différences absolues d'altitude entre un point donné et ses huit voisins (Riley et al., 1999). Comme cet indice utilise la valeur absolue des différences d'altitude, un sommet et une dépression présentant une même différence absolue ont la même valeur de TRI. Or, les conditions climatiques sur ces deux modalités topographiques sont fort différentes, puisque les dépressions sont plus abritées des éléments météorologiques que les sommets. En leur attribuant la même valeur, on risque d'effacer la précision de l'information. Pour pallier à cela, il existe l'Indice de Position Topographique (*Topographic Position Index* ou TPI), qui évalue la différence d'altitude entre un point et ses voisins. Il est supérieur à zéro pour les zones concaves (les collines et crêtes sont caractérisées par un TPI > 6) et inférieur à zéro pour les zones convexes (les ravins sont caractérisés par un TPI < 6). Un TPI proche de zéro reflète un terrain avec peu de variations de relief. Le déficit en eau est plus important dans les zones concaves que dans les zones convexes (Jucker, Hardwick, et al., 2018), sûrement parce que ces zones favorisent le ruissellement vers les zones convexes. Les régions à TPI négatif sont moins exposées au vent.

Tous ces paramètres amènent aussi des variations des quantités de carbone stockées. Les stocks de carbone sont favorisés par des altitudes proches de 13 m, des pentes moyennes et des terrains plats (=à TPI proche de 0)(Jucker, Bongalov, et al., 2018).

1.3 Méthodologie

Pour étudier les trouées, il est important de les définir précisément. Dans un des premiers articles abordant ce sujet, Brokaw (1982) a défini les trouées selon :

- leur hauteur maximale : 2 m
- leur surface minimale : 20 m²

Depuis, de nombreuses études ont repris cette définition (Tableau 1.1). Puisque les trouées sont des ouvertures de la canopée, il est logique de les définir par une hauteur maximale, au-delà de laquelle la trouée est considérée comme refermée, et la canopée est revenue à son état normal. Cette hauteur maximale fait l’objet de nombreuses discussions parmi la communauté scientifique. Si Brokaw (1982) a fixé 2 m de haut, de nombreuses études s’accordent maintenant à dire que ce seuil est trop bas, car il ne tient pas compte des éventuels résidus qui persistent dans la trouée suite à la perturbation. De plus, ce seuil suppose qu’au-delà de 2 m, les conditions environnementales redeviennent identiques au reste de la canopée, ce qui ne semble pas être le cas. Souvent, le seuil choisi est de 10 m (Gorgens et al., 2023 ; Hunter et al., 2015 ; Leclère et al., 2024), mais il est aussi possible de considérer que la trouée est refermée une fois qu’elle atteint 20 m de haut (Bottero et al., 2011 ; Nagel & Svoboda, 2008 ; Petritan et al., 2013).

Définir les trouées par un seuil de hauteur fixe ne tient pas compte des variations naturelles de la hauteur de la canopée. En effet, une zone de hauteur maximale de 10 m n’aura pas le même impact si la canopée est à 15 m de haut ou à 35 m de haut. Si le seuil est fixé en fonction de la hauteur de la canopée environnante (Runkle, 1992), il est généralement identique pour toute la zone d’étude. D’autres méthodes ont été développées pour tenir compte de ce paramètre. Par exemple, il est possible de se baser sur les différences de hauteur au sein de la canopée : Pedersen & Howard (2004) définissent les trouées comme étant les zones de plus de 50 m de large au sein desquelles la végétation fait partie des 2/3 inférieurs de la distribution de hauteur de la canopée. D’autres études utilisent des définitions dynamiques des trouées : ce sont des zones dont la hauteur a suffisamment diminué entre 2 collectes de données, par exemple une chute d’au moins 5 m en 3 ou 4 ans (Cushman et al., 2022), 10 m en 1 ou 2 ans (Winstanley et al., 2024) ou encore 10 m en 5 ans (Dalagnol et al., 2021). Cette méthode se base donc sur la perte de hauteur par rapport à la canopée. La définition dynamique des trouées permet donc de s’affranchir de la hauteur de la canopée.

Brokaw (1982) fixe une surface minimale, et de nombreuses études ajoutent une surface maximale (Tableau 1.1). Il est important de définir les surfaces minimale et maximale que peuvent avoir les trouées, puisque les changements de conditions environnementales diffèrent selon la taille de la trouée. Trop petite, il n’y aura pas suffisamment de variation avec le reste de la canopée, notamment car il n’y aura pas assez de rayons lumineux qui atteindront le sol. Trop grandes, les conditions environnementales sont trop différentes du reste de la canopée, et cela correspond plutôt à une zone ouverte dans la forêt. Selon les études, la surface minimale est comprise entre 5 m² (Lobo & Dalling, 2013 ; Vepakomma et al., 2011) et 25 m² (Cushman et al., 2022). Plusieurs études ont choisi 10 m² (Gorgens et al., 2023 ; Hunter et al., 2015 ; Winstanley et al., 2024). Reis et al. (2022) ont choisi 20 m². Souvent, la surface maximale est de 2000 m² (Leclère et al., 2024) ou 10000 m² (Dalagnol et al., 2021).

Le profil vertical des bords de la trouée est irrégulier mais, pour simplifier la définition et l’identification, les limites de la trouée sont définies par la projection verticale de l’avancée la plus profonde de la couronne, quelque soit la hauteur de celui-ci (Brokaw, 1982 ; Petritan et al., 2013). Tudose et al. (2023) ont aussi relevé la surface étendue des trouées, en se basant sur la localisation des troncs adjacents.

TABLE 1.1 – Hauteur maximale (m), surfaces minimale et maximale (m^2).

Hauteur maximale (m)	Surface minimale (m^2)	Surface maximale (m^2)	Source
2	20	/	(Brokaw, 1982)
10	10		(Gorgens et al., 2023)
10	10	/	(Hunter et al., 2015)
10	50	2000	(Leclère et al., 2024)
2, 5 et 10		10 000	(Dalagnol et al., 2021)

Initialement, les trouées étaient identifiées visuellement depuis le sol, puis reportées sur une carte en mesurant 8 distances entre le centre et les bords de la trouée (Brokaw, 1982) ce qui permet d’estimer leur surface. Cette méthode est encore parfois utilisée aujourd’hui (Tudose et al., 2023). Ainsi, Petritan et al. (2013) ont parcouru à pied un quadrillage de 100 m*100 m établi sur une zone de 32 ha. Pour évaluer la proportion de trouées présentes dans la forêt, une méthode appelée Line Intersect Sampling a été utilisée dans de nombreuses études selon Battles et al. (1996). Celle-ci consiste à parcourir un transect de longueur donnée en relevant la proportion de cette longueur couverte par des trouées. Il est possible d’estimer le diamètre de la trouée pour améliorer la précision de cette mesure (Runkle, 1985) .

Plusieurs méthodes existent pour calculer la croissance horizontale, qui passe souvent par la mesure répétée de la surface des couronnes d’un arbre. La différence de surface entre deux années indique la croissance horizontale. En cas de collecte sur le terrain, il est possible d’identifier les arbres adjacents aux trouées et de mesurer l’étendue de leur couronne depuis le sol. Pour cela, il faut calculer la distance entre le tronc et plusieurs extrémités de la couronne (Runkle, 1982). Des mesures à plusieurs années d’écart permettent d’évaluer la croissance horizontale de ces couronnes. Une méthode similaire a été appliquée par Lu et al. (2015) : ils ont créés des trouées artificielles, au sein desquelles ils limitaient la régénération naturelle, et utilisaient des photographies hémisphériques, obtenues avec un appareil situé au centre de la trouée et orienté vers le ciel. Ensuite, ils estimaient la surface de la trouée en mesurant la distance entre le centre de la trouée et l’extrémité de chaque couronne (Lu et al., 2015). Trimble & Tryon (1966) ont développé une régression calculant la surface de la couronne à partir de l’âge de la trouée et du diamètre à hauteur de poitrine.

Les méthodes présentées ci-dessus sont toutes basées sur des collectes de données sur le terrain, ce qui limite les quantités de données récoltées. Par exemple, l’étude de Brokaw (1982) est basée sur 66 trouées. De plus, elles manquent parfois de précision et leur échelle. En effet, calculer des surfaces (de trouées ou de couronnes) à partir de quelques rayons ne permet pas de tenir compte de la variabilité de la forme de ces éléments. Or, les couronnes sont souvent asymétriques, car elles se développent dans les zones où la compétition est la plus faible (Muth & Bazzaz, 2011). Par ailleurs, évaluer la hauteur depuis le sol peut être approximatif. Ainsi, Runkle (1982) considère que les trouées sont refermées lorsqu’on ne peut plus distinguer l’ouverture depuis le sol, et fixe un seuil de 10 à 20 m de haut.

Depuis les années 2000, le développement de la télédétection se présente comme une alternative au terrain pour étudier la dynamique forestière. En effet, l’utilisation d’engins aériens ou d’images satellites facilite et accélère la collecte de données, ce qui permet d’augmenter la surface de forêt couverte par les inventaires et la fréquence de ceux-ci (Parra & Simard, 2023). C’est particulièrement le cas pour l’étude des trouées, dont la localisation hasardeuse complique l’échantillonnage (Jucker, 2022). Un des outils de télédétection est le LiDAR (*Light Detection And Ranging*), qui envoie des centaines de milliers de laser par seconde et mesure leur temps de retour. Celui-ci indique la distance à laquelle se trouvent les objets rencontrés. Le résultat est un nuage de point qui donne une représentation en trois dimensions de l’environnement étudié (Dalponte & Coomes, 2016). A partir de ce nuage de points, les points sol sont identifiés puis interpolés pour créer le Modèle Numérique de Terrain (*Digital Terrain Model* ou DTM) qui représente le sol. Ensuite, les hauteurs des points restants sont normalisés et le Modèle Numérique de Canopée (*Canopy Height Model* ou CHM est créé à partir de ces données (*The lidR package*, s. d.). Survoler les forêts avec un capteur LiDAR donne ainsi

une vision aérienne du sol et de la canopée, ce qui permet d'étudier la structure de la forêt (Cushman et al., 2022 ; Parra & Simard, 2023). Pour étudier la dynamique de la forêt, c'est-à-dire l'évolution de la structure forestière dans le temps, on peut réaliser des mesures LiDAR répétées dans le temps et les comparer (Song et al., 2016). Le LiDAR permet aussi d'améliorer la précision des mesures, en fournissant une mesure de la hauteur plus précise. Cela permet aussi de mesurer plus efficacement la surface de la trouée, puisqu'il est fréquent de travailler à 1 ou 2 m de résolution. Une méthode développée pour distinguer croissances horizontale et verticale à partir de données LiDAR consiste à séparer ces deux croissances selon un seuil de croissance maximale. En posant l'hypothèse que la vitesse de la croissance en hauteur est plus faible que celle de la croissance horizontale, on peut déterminer un seuil de croissance verticale maximale, au-delà duquel toute la croissance observée vient de l'expansion des couronnes des arbres adjacents (Hunter et al., 2015). Le LiDAR facilite aussi l'étude de la topographie.

1.4 Objectif et hypothèses

La fermeture des trouées est de plus en plus étudiée, mais il manque encore des informations sur les liens avec les facteurs topographiques et structurels. L'objectif de ce mémoire est de **déterminer l'influence de la surface, de la forme et de la hauteur initiale moyenne des trouées, et la topographie sur le mode de fermeture des trouées de la forêt de Yangambi (RDC), en distinguant la croissance verticale, la croissance horizontale et la stagnation**. Les hypothèses initiales sont les suivantes :

- *La surface de la trouée est corrélée positivement à la stagnation et à la croissance verticale, et corrélée négativement à la croissance horizontale.*
- *La complexité de la forme est corrélée positivement à la croissance horizontale, et corrélée négativement à la croissance verticale et à la stagnation.*
- *La hauteur initiale est corrélée positivement à la croissance verticale, et corrélée négativement à la croissance horizontale et la stagnation.*
- *L'altitude favorise la stagnation, les fortes pentes favorisent la croissance verticale, tandis que les pentes orientées à l'Ouest et les dépressions favorisent la croissance horizontale.*

Chapitre 2

Matériel et Méthodes

2.1 Zone d'étude

D'une superficie de 2350km², la Réserve de Biosphère de Yangambi est située au Nord-Est de la RDC (Figure 2.1). Elle fait partie de la forêt du Bassin du Congo, le deuxième plus grand massif forestier au monde (*La réserve de biosphère de Yangambi, dans le bassin du Congo, va devenir un pôle de connaissances sur le climat et la biodiversité* — UNESCO, s. d.). Le climat y est équatorial (type Af selon la classification de Köppen-Geiger), avec des précipitations d'environ 1800 mm/an, et des températures constantes, aux alentours de 25°C. Il y a une seule saison sèche par an, lors de laquelle les précipitations sont d'environ 100 m/mois (Kearsley et al., 2017). La réserve de Yangambi assure la subsistance de 220 000 personnes, dont une partie vit à l'intérieur de la réserve (CIFOR, 2022). En effet, les réserves de biosphères ont pour objectif de promouvoir une utilisation durable des ressources naturelles, et l'intégration des communautés locales dans le projet de conservation est un élément essentiel de leur gestion (*Qu'est-ce qu'une réserve de biosphère ?*, s. d.). La zone d'étude est une surface de 675 ha située au Sud-Est de la Réserve de Biosphère de Yangambi (Figure 2.2).

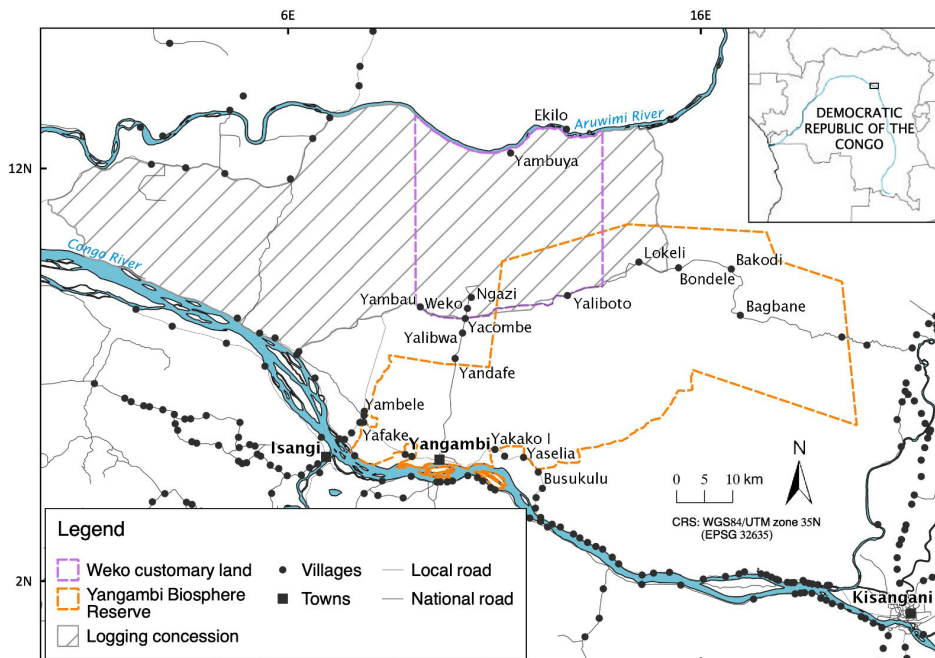


FIGURE 2.1 – Réserve de Biosphère de Yangambi et ses environs. © (Shephard et al., 2023)

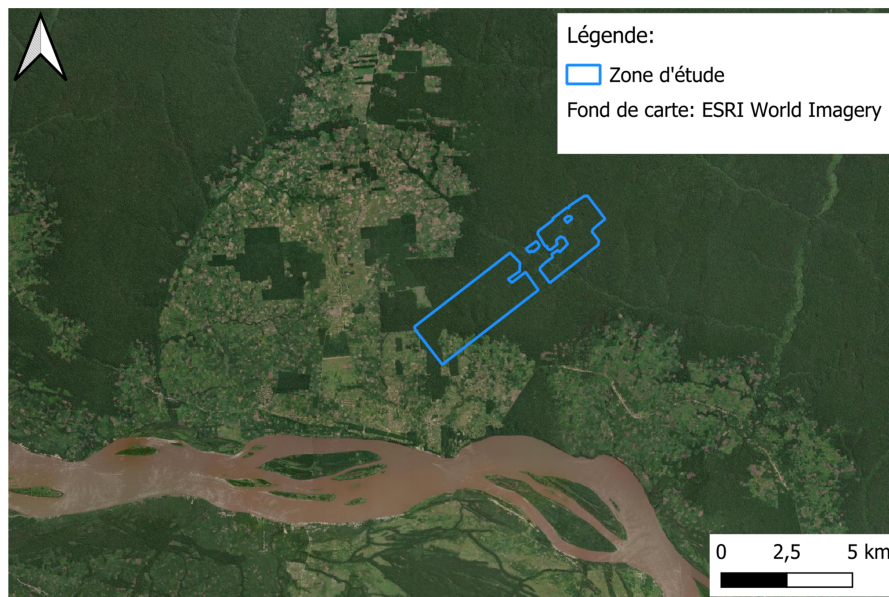


FIGURE 2.2 – Localisation de la zone d'étude (EPSG : 4326).

2.2 Données récoltées

Des photographies aériennes à haute résolution et des données LiDAR ont été récoltées en 2014 et en 2023. Ces données ont été collectées dans le cadre d'une étude des forêts tropicales de la RDC, lors de laquelle 216 parcelles de 2000 ha ont été inventoriées. Ce mémoire se base sur une de ces parcelles, à Yangambi. La première période de collecte a eu lieu le 25 octobre 2014, avec un avion F406 équipé d'un scanner LiDAR Optech ALTM 3100 EA (Xu et al., 2017). La densité de points des images LiDAR était de 4.5 points/m². En 2023, les données ont été récoltées avec un drone Dji M300 avec un capteur LiDAR Zenmuse L1, avec une hauteur de vol de 200m et un recouvrement latéral de 75%, pour une densité de points de 309.3 points/m² (Kavali Tondo, 2024). La zone couverte par des données traitables est d'une superficie de 675 ha.

Les traitements présentés ci-dessous ont été réalisés avec le logiciel R (version 4.3.1.). Le package *lidR* a été utilisé pour traiter les nuages de points (The lidR package, s. d.).

2.3 Pré-traitement des données

Avant de commencer les analyses à proprement parler, les nuages de points ont été pré-traités. Lors de la collecte de données, l'impulsion laser envoyée depuis le drone ou l'avion descend vers le sol et rencontre les premiers éléments de végétation. Lorsque le laser rencontre un élément solide, trois phénomènes peuvent arriver : l'impulsion est renvoyée, absorbée et/ou traverse l'objet. Une fois arrivée à l'élément suivant, les mêmes phénomènes se répètent. Chaque renvoi de l'impulsion laser est appelée un retour, et les derniers retours correspondent à l'élément qui n'a pas été traversé par le laser. Il s'agit en général du sol. Les données brutes de LiDAR sont composées de l'ensemble de ces retours et forment un nuage de points. La première étape est la classification des points de sol, pour pouvoir créer le Modèle Numérique de Terrain (*Digital Terrain Model* ou DTM), une représentation raster du sol. Pour cela, les derniers retours ont été classés en points de sol, puis ils ont été interpolés pour créer une image continue du sol. La deuxième étape est la normalisation des données LiDAR. A ce stade, les hauteurs renseignées dans le nuage de points correspondent à la hauteur des éléments au-dessus du niveau de la mer (ici, la végétation) et la hauteur du sol. Or, pour remplir les objectifs de ce mémoire, il est nécessaire d'avoir la hauteur des arbres, et donc de s'affranchir du relief. Cette normalisation a été faite à partir du nuage de points. Les nuages de points ont donc été normalisés avec l'algorithme *tin* qui opère une triangulation de Delauney sur les points sols. Ainsi, les points

de sol sont à $Z = 0$, et cela permet d'obtenir la hauteur relative à la surface du sol.

Les données LiDAR ont des densités de point différentes selon leur période de collecte (pour rappel : 5 points/ m^2 en 2014 et 300 points/ m^2 en 2023). Cela s'explique par le mode d'acquisition différent : avion en 2014 et drone en 2023. Cependant, afin de pouvoir comparer ces données, il est nécessaire qu'elles aient la même densité de points. Les données de 2023 ont donc été dédensifiées pour atteindre 5 points/ m^2 . Pour cela, une grille de cellules de 1 m^2 a été créée sur le nuage de points, et un nombre égal de points a été retenu dans chaque cellule. Cela permet de créer un nuage de point uniforme (Roussel & Auty, 2016). En 2023, certains points avaient des valeurs inférieures à zéro malgré la normalisation. Ils ont été enlevés. Enfin, le nuage de points de la végétation a été transformé en un *Canopy Height Model* (CHM) à 1 m de résolution. Il s'agit d'une représentation raster de la hauteur de la végétation. Les CHM de 2014 et 2023 et le DTM de 2014 sont présentés aux Annexes 1, 2 et 3.

2.4 Définition et identification des trouées

Si la littérature scientifique s'accorde à définir les trouées en fixant des surfaces minimales et maximales et une hauteur maximale (Point 1.3), les valeurs de ces paramètres diffèrent grandement selon les études (Tableau 1.1). Plusieurs études utilisent 10 m^2 comme limite inférieure. Néanmoins, cela correspond à 3,6 m de diamètre, et cela nous semble trop faible pour qu'il y ait suffisamment de variations de conditions environnementales, car il est probable que l'ombre des arbres adjacents impacte trop ces ouvertures. C'est pourquoi nous avons choisi 20 m^2 comme surface maximale, comme Brokaw (1982). Souvent, le choix de la hauteur maximale se base sur des observations de terrain. Dans le cadre de ce mémoire, il n'y a pas eu de collecte de données sur le terrain. Pour pallier à ce manque d'information, la croissance annuelle en fonction de la hauteur initiale a été calculée (Figure 3.1). Les trouées sont considérées ici comme étant des zones où la croissance est dynamique. Ainsi, la hauteur maximale pour qu'une zone appartienne à une trouée est de 23 m : cela correspond à la hauteur dont la croissance moyenne est nulle à l'échelle du paysage étudié (Figure 3.1). Toutes les zones en-dessous de 23 m sont donc, en moyenne, en croissance. Pour faire ce choix, la moyenne a été préférée à la médiane afin d'aussi prendre en compte les cas extrêmes.

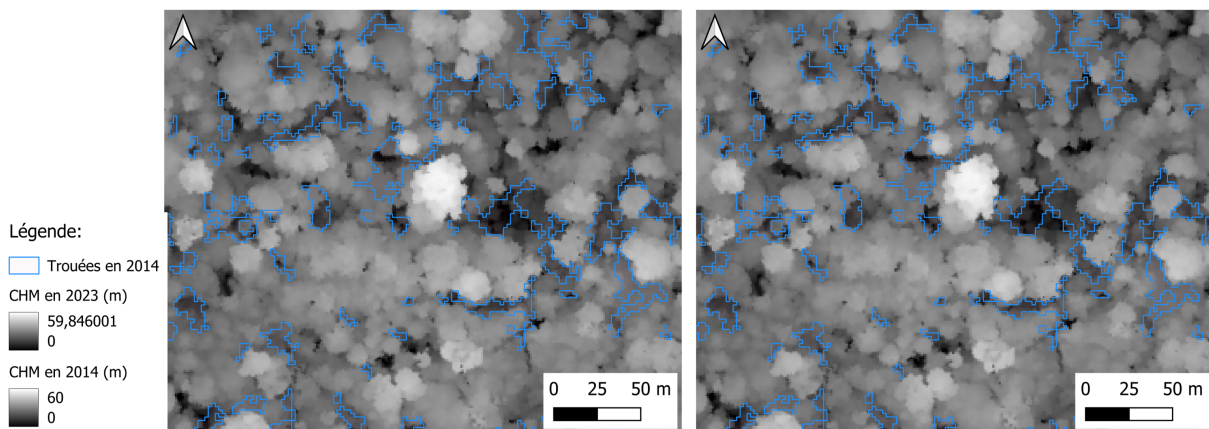


FIGURE 2.3 – Exemple de trouées identifiées en 2014. Gauche : CHM de 2014 - Droite : CHM de 2023.

Ces paramètres ont été appliqués au CHM, puis les pixels adjacents qui correspondent à ces caractéristiques ont été agrégés pour former les trouées. Cela a permis de créer un fichier *raster* qui a ensuite été vectorisé. A proximité des rivières, dans les zones où l'eau s'accumule, cette technique a identifié de très grandes trouées ($> 10\,000\ m^2$). Elles correspondent en réalité à des ouvertures dans la canopée naturellement présentes au-dessus des rivières empêchant l'établissement d'arbres au sol. Ces discontinuités dans la canopée ne sont donc pas

des trouées en tant que telles (c'est-à-dire des ouvertures de la canopée créées par des perturbations) et ne sont pas explicables par la dynamique forestière. Elles ont donc été supprimées du jeu de données.

2.5 Mesure de la taille, de la forme et de la hauteur initiale des trouées et de la topographie

La surface en m^2 a été utilisée pour évaluer la taille des trouées. L'évaluation de la complexité de la trouée se base sur le rapport entre la surface et le périmètre de la trouée. En effet, le cercle est la forme la plus compacte, c'est-à-dire que, pour une même surface, son périmètre est plus petit que celui de n'importe quelle autre forme, et, plus la complexité augmente, plus le périmètre augmente. L'indice utilisé ici est le suivant :

$$\frac{a}{p^2} = \frac{\text{aire}}{\text{périmètre}^2}$$

Élever le périmètre au carré permet de rendre cet indice adimensionnel, il est donc indépendant de la taille de la trouée : 2 trouées de même forme mais de taille différente ont la même valeur de a/p^2 . Plus la forme est complexe, plus le rapport est faible. Cet indice présente aussi l'avantage d'être borné en $]0; 1/(4\pi)$ [. La borne inférieure représente la forme la plus complexe et la borne supérieure correspond à la valeur de l'indice pour un cercle, r correspondant au rayon du cercle. L'existence de bornes finies permet d'évaluer la complexité d'une trouée sans devoir nécessairement la comparer à d'autres.

Pour étudier la topographie, plusieurs métriques ont été calculées :

- L'altitude : elle représente l'élévation par rapport au niveau de la mer
- La pente : elle représente l'inclinaison du terrain
- L'orientation (aspect) : elle représente l'orientation du terrain. Elle va de 0 à 360 degrés dans le sens des aiguilles d'une montre, 0 indiquant une orientation Nord et 90 indiquant l'Est etc. (*Slope, Aspect, and Hillshade — GEOG 480 : Exploring Imagery and Elevation Data in GIS Applications*, s. d.)
- Le *Topographic Position Index* (TPI) : il indique la position du point par rapport à ses voisins. Un point plus haut que son voisinage, tel qu'un sommet ou une crête, aura une valeur positive, et un point plus bas, situé par exemple dans une vallée, aura une valeur négative. Pour un point donné, il correspond à la différence entre la hauteur de ce point et la moyenne de ses huit voisins (Roussel & Auty, 2016).
- Le *Terrain Ruggedness Index* (TRI) : Il évalue l'hétérogénéité du terrain. Plus un point a des voisins ayant des hauteurs différentes, plus le TRI sera élevé (Riley et al., 1999). Pour un point donné, il correspond à la moyenne des différences absolues entre ce point et ses huit voisins.

Pour chacune de ces métriques, la valeur moyenne au sein de chaque trouée a été calculée à partir du DTM.

2.6 Distinction des croissances horizontale et verticale

Deux méthodes ont été testées : une méthode issue de la littérature scientifique basée sur un seuil de croissance vertical maximale (appelée ci-après "Méthode 1 : Seuil de hauteur") et une méthode développée dans le cadre de ce mémoire et qui utilise la détection automatique des couronnes à partir du nuage de points LiDAR (appelée ci-après : "Méthode 2 : Détection automatique des couronnes"). Ces deux méthodes ne permettent pas de distinguer le recrutement de la croissance verticale. Ci-dessous, les termes "croissance verticale" et "régénération naturelle" sont utilisés pour décrire indistinctement toutes les croissances en hauteur.

2.6.1 Méthode 1 : Seuil de hauteur

Dans la littérature scientifique (Hunter et al., 2015), la distinction entre croissance horizontale et verticale se base sur les vitesses de croissance observées au sein des trouées, à partir du CHM. Un seuil est fixé, souvent sur base d’observations sur le terrain. En-dessous de ce seuil, la croissance correspond à de la croissance verticale. Au-dessus de ce seuil, il s’agit de croissance horizontale. La croissance horizontale est plus rapide, car elle part de plus haut que la croissance verticale, puisque les couronnes des arbres adjacents appartiennent à la canopée. En l’absence d’observations sur le terrain, la croissance en hauteur maximale a été calculée en se basant sur le centre des trouées. Exclure les bordures des trouées permet de s’affranchir de la croissance horizontale. En effet, les arbres adjacents ne peuvent pas étendre indéfiniment leurs couronnes, l’hypothèse est donc que les centres des trouées ne contiennent que de la croissance verticale. Pour déterminer ces zones centrales, plusieurs largeurs de zone tampon ont été testées : 3, 5, 7 et 10 m. La croissance en hauteur maximale correspond à la croissance moyenne observée au centre des trouées plus trois fois l’écart-type. Les pixels dont la valeur est supérieure à ce seuil sont classés en croissance horizontale, et les autres en croissance verticale. Le résultat est donc une classification binaire des pixels des trouées.

2.6.2 Méthode 2 : Détection automatique des couronnes

Cette méthode se base sur l’hypothèse que la croissance horizontale est détectable par le LiDAR aérien.. En effet, certains algorithmes permettent de détecter automatiquement les couronnes d’arbres sur les nuages de points LiDAR (Dalponte & Coomes, 2016). La première étape est l’*Individual Tree Detection* (ITD) : une fonction itérative parcourt le nuage de points et détecte les maximums locaux en identifiant le point le plus haut au sein d’une fenêtre dont la taille varie selon la hauteur des points étudiés. En effet, plus un arbre est haut et plus sa couronne risque d’être grande, et il ne faudrait pas détecter plusieurs arbres là où il n’y en a qu’un. A l’inverse, une fenêtre trop grande risquerait d’agréger plusieurs petites couronnes ensemble. Ici, la taille de la fenêtre est donc une fonction exponentielle dépendant de la hauteur, dont les paramètres sont fixés à partir de l’équation développée par Blanchard et al. (2016) pour la zone Gabon-Congo et pour l’ensemble de la canopée :

$$ws = 2 * \sqrt{\frac{0.223 * H^{1.5}}{\pi}}$$

où ws correspond à la *window size* ou taille de la fenêtre, et H à la hauteur du point étudié.

Afin de faciliter le traitement des données, le nuage de points LiDAR a été divisé en plusieurs tuiles réunies sous la forme d’un LAScatalog, et les tuiles sont traitées l’une après l’autre. Cependant, cette subdivision de la zone d’étude implique qu’un arbre situé sur la limite entre 2 tuiles sera séparé en 2 (The lidR package, s. d.). Pour éviter cela, des zones tampons de 50 m de large ont été créés autour de chaque tuile.

La seconde étape est l’*Individual Tree Segmentation* (ITS) : une couronne est délimitée à partir de chaque maximum local, avec l’algorithme développé par (Dalponte & Coomes, 2016).

Ensuite, les couronnes de 2023 qui intersectent les trouées de 2014 sont sélectionnées. Parmi ces couronnes, celles qui participent à la croissance horizontale sont celles dont le maximum local (déterminé lors de l’ITD) est situé à l’extérieur de la trouée de 2014. En effet, la position du maximum local supposée correspondre à la position du tronc, qui est par définition situé à l’extérieur de la trouée si l’arbre participe à la croissance horizontale. Les couronnes dont le maximum local est situé à l’intérieur de la trouée sont assimilées à la croissance verticale. Il reste à calculer la proportion de la surface couverte par la croissance horizontale, la croissance verticale et la stagnation :

$$S_{totale} = S_{croissance-horizontale} + S_{croissance-verticale} + S_{stagnation}$$

où S représente la surface. Ces surfaces sont exprimées en % de la surface totale de la trouée.

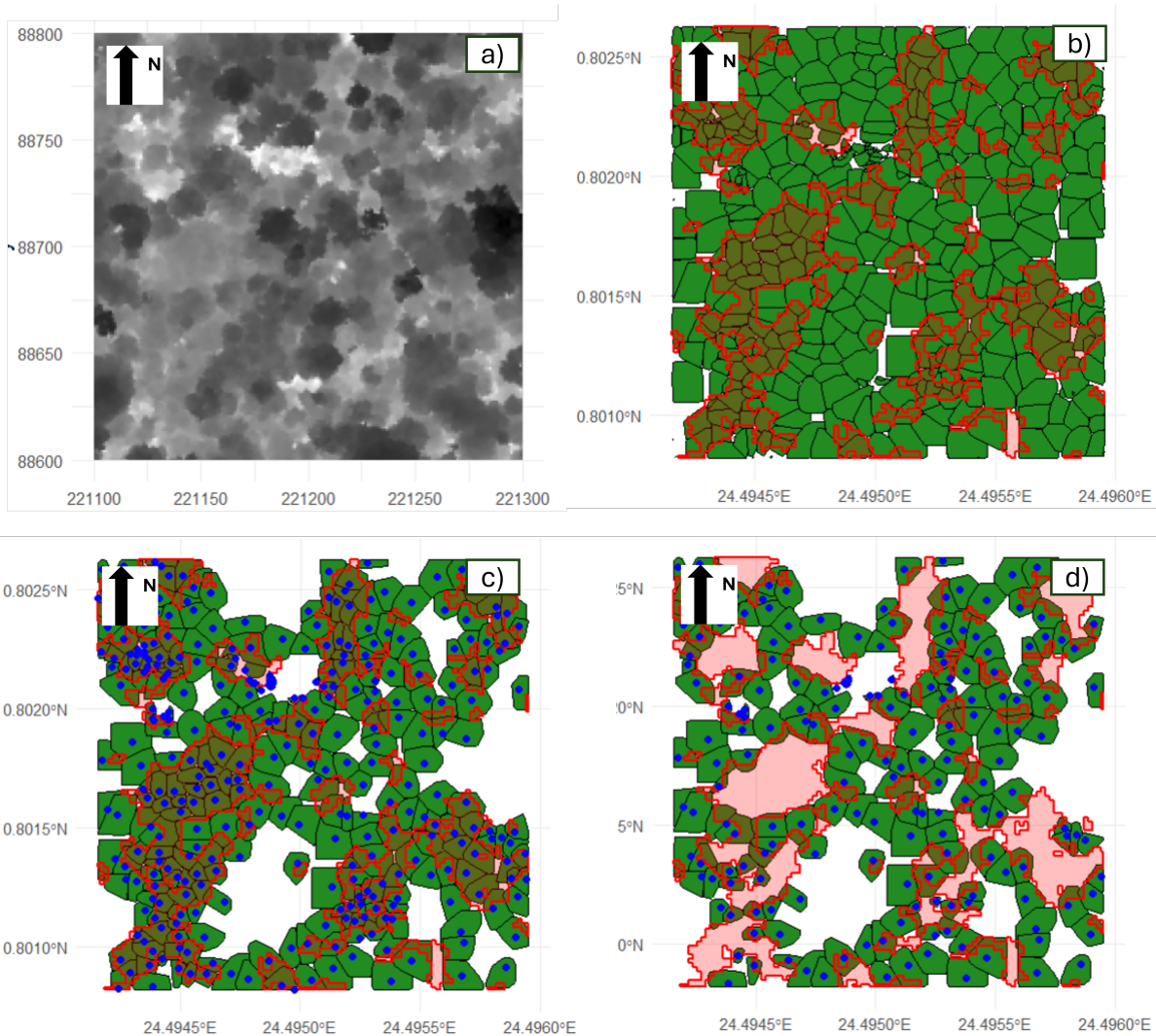


FIGURE 2.4 – Étapes d'identification de la croissance horizontale sur une zone de 4 ha. Les arbres sont représentés en vert, les trouées en rouge, les troncs (assimilés aux maxima locaux) en bleu. a) CHM en 2023. b) Identification des couronnes des arbres par ITS. c) Sélection des arbres qui intersectent les trouées d) Sélection des arbres participant à la croissance horizontale, c'est-à-dire les arbres qui intersectent les trouées et dont le tronc se trouve à l'extérieur de la trouée.

2.7 Analyse statistique

2.7.1 Méthode 1 : Seuil de hauteur

Afin d'évaluer l'effet de la largeur de la zone tampon, un test de Kruskal-Wallis a été effectué, car les résidus de l'analyse de la variance ne sont pas normaux. Ces résultats étant significatifs, un test de Dunn avec un ajustement de Bonferroni a été réalisé pour tester les différences deux à deux de ces largeurs. Par ailleurs, la croissance a été divisée en classe d'intervalles de 0.2 m/an et une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée, pour voir si un seuil pouvait se distinguer visuellement.

2.7.2 Méthode 2 : Détection automatique des couronnes

Trois régressions ont été réalisées. Les variables à expliquer sont le pourcentage de croissance horizontale, verticale et de stagnation. Les variables explicatives sont celles présentées au point 2.5 : surface de la trouée, a/p^2 (indice de forme), altitude, pente, orientation, TPI, et TRI. Dans un premier temps, des modèles linéaires ont été construits, mais les résidus ne suivent pas une distribution normale. Dans un deuxième

temps, les modèles linéaires ont donc été remplacés par des modèles linéaires généralisés des Modèles Additifs Généraux (GAM). Les variables à expliquer suivent des distributions *beta*. Pour respecter les conditions de ces distributions, deux transformations de variables ont été appliquées : les pourcentages ont été ramenés à des valeurs comprises entre $[0;1]$ et les valeurs strictement égales à 0 ou 1 ont respectivement été transformées en 0.001 et en 0.999. En effet, les distributions *beta* ne peuvent contenir de valeurs exactement égales à 0 ou 1. Le jeu de données a été séparé en deux : un pour l'entraînement (75% des données) et l'autre pour la validation (25% des données). Le Root Mean Square Error (RMSE ou racine de l'erreur quadratique moyenne) a été calculé pour chaque variable. Les GAM ayant des RMSE légèrement plus faibles, seuls ceux-ci sont présentés dans ce travail.

Chapitre 3

Résultats

3.1 Définition des trouées

Pour choisir le seuil de hauteur maximale définissant une trouée, on se base en général sur des observations de terrain, qui n'ont pas eu lieu ici. L'analyse de la croissance en fonction de la hauteur initiale montre que les petits arbres ont une croissance importante (Figure 3.1). A partir d'une hauteur initiale de 23 m de haut, la croissance moyenne devient négative. La hauteur maximale des trouées a été choisie sur base de cette valeur. Au-delà de 23 m, la moyenne reste légèrement négative, cela indique que si de la croissance existe encore, elle ne suffit pas à compenser la chute des arbres.

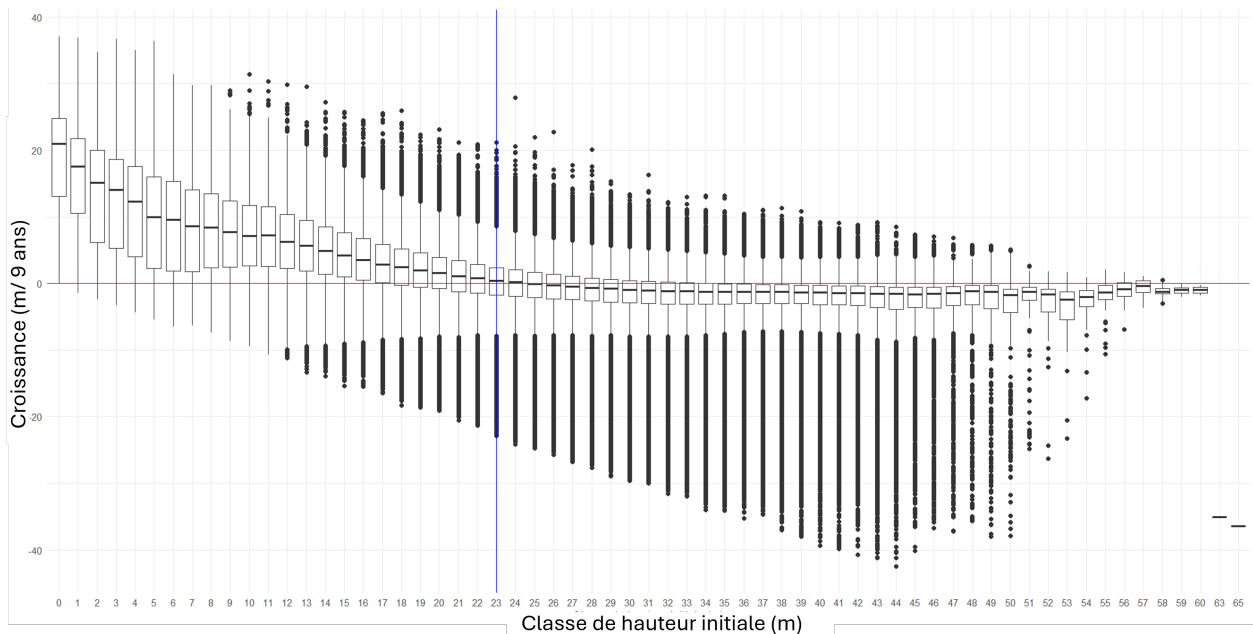


FIGURE 3.1 – Croissance sur 9 ans ($m/9$ ans) en fonction de la hauteur initiale en 2014 (m). La droite rouge correspond à $y=0$ m/9 ans. La droite bleue correspond à $x=23$ m.

Cette définition a mené à l'identification, sur 675 ha, de 4348 trouées en 2014, et 3723 en 2023. Les distributions suivent une loi de puissance (Figures 3.2 et 3.3), et 3354 trouées sont étaient à $200 m^2$ en 2014. Un zoom sur les trouées inférieures à $200 m^2$ est disponible dans les Annexes 4 et 5 . Le nombre de trouées a diminué sur la période étudiée, mais il y a proportionnellement plus de grandes trouées en 2023 (Tableau 3.1).

TABLE 3.1 – Répartition de la surface des trouées en 2014 et en 2023. Surfaces minimale, premier quartile, médiane, moyenne, troisième quartile, et maximale. Toutes les surfaces sont exprimées en m^2 .

Année	Minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	Moyenne	3 ^{ème} quartile	Maximum
2014	20	32	68	215	181	10624
2023	20	36	80	282	232	16440

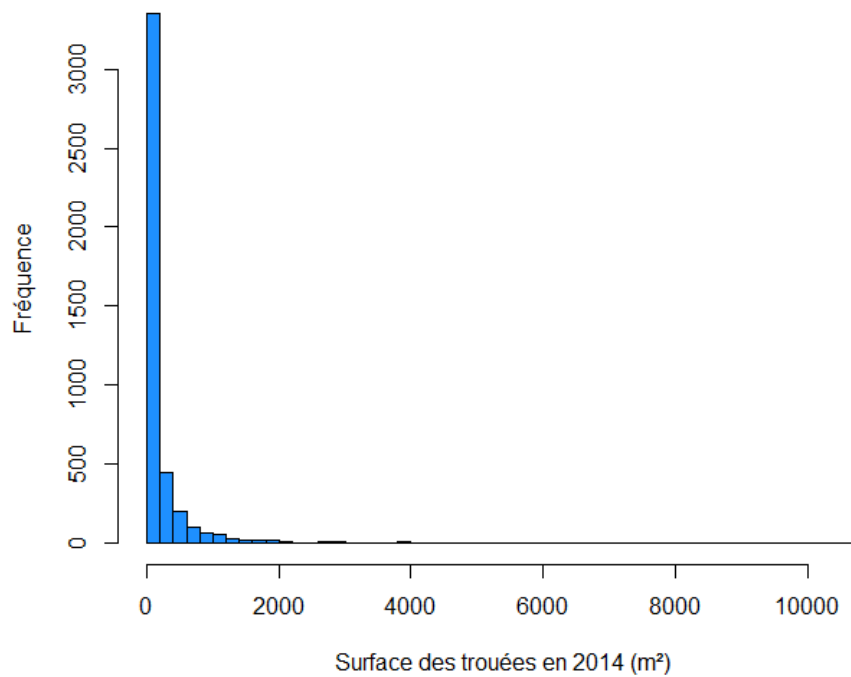


FIGURE 3.2 – Distribution des surfaces des trouées en 2014. Sur l'axe X, chaque intervalle correspond à $200 m^2$.

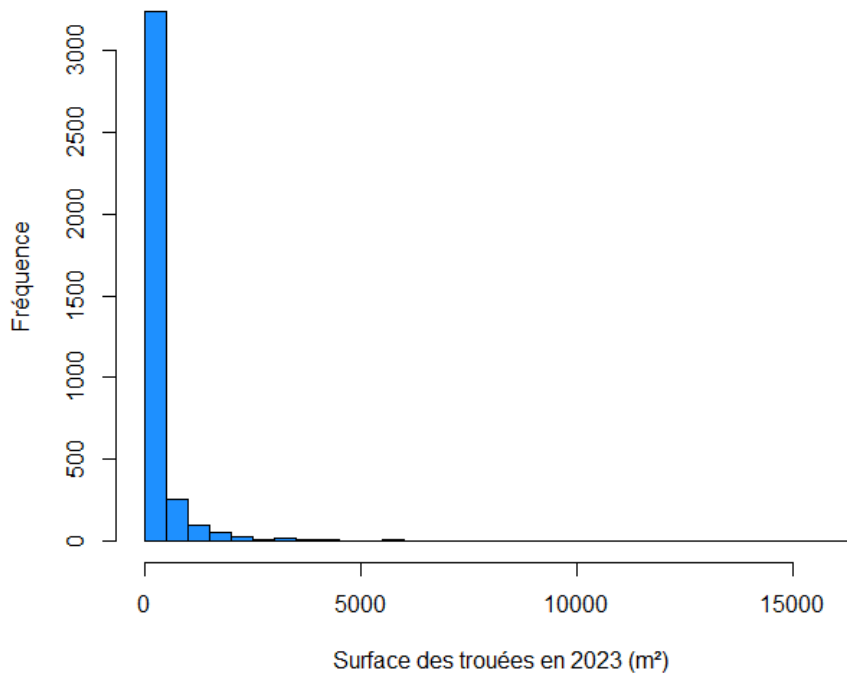


FIGURE 3.3 – Distribution des surfaces des trouées en 2023. Sur l’axe X, chaque intervalle correspond à 200 m^2 .

3.2 Distribution des variables explicatives

Pour comprendre l’effet des variables explicatives, il est nécessaire de connaître leur distribution. La surface des trouées suit bien une distribution de puissance (point 1.2.1), avec une majorité de petites trouées et quelques grandes trouées (Figure 3.4 a)). En effet, la médiane est de 72 m^2 et le 3^{ème} quartile de 188 m^2 (Tableau 3.2), tandis que la plus grande trouée mesure un peu plus de 10 000 m^2 . La distribution de l’indice de forme est plus homogène (Figure 3.4 b)), avec cependant peu de formes proches du cercle. La hauteur moyenne dans la trouée est fréquemment assez élevée (Figure 3.4 c)), puisque la majorité des observations sont supérieures à 15 m de moyenne, et la médiane est de 19 m (Tableau 3.2). Le gradient d’altitude est d’environ 75 m et suit une distribution normale avec une fréquence maximale aux alentours de 450 m. L’orientation aussi suit une distribution normale (Figure 3.4 d) et f)), avec un pic de distribution vers 180°, indiquant des trouées majoritairement orientées vers le Sud. Concernant la pente, elle reste relativement faible sur la zone d’étude, puisque 75% des observations sont inférieures à 6°, avec néanmoins quelques pentes plus raides, allant jusqu’à 40° (Figure 3.4 e) et Tableau 3.2). Le TRI est de maximum 1.3 m, indiquant que les variations de relief sont légères et progressives (Figure 3.4 h)). La faible variation du TPI indique aussi qu’il y a peu de crêtes et de vallées (Figure 3.4 g)).

TABLE 3.2 – Minimum, 1^{er} quartile, médiane, moyenne, 3^{ème} quartile et maximum de chaque variable explicative.

Variabiles explicatives	Minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	Moyenne	3 ^{ème} quartile	Maximum
Surface (m^2)	20	32	72	221	188	10624
Forme (/)	$1 * 10^{-3}$	$1.4 * 10^{-2}$	$2.2 * 10^{-2}$	$2.3 * 10^{-2}$	$3.1 * 10^{-2}$	$6.2 * 10^{-2}$
Hauteur initiale (m)	4.151	17.171	19.003	18.638	20.568	23.0
Altitude (m)	398	434	444	443	0454	476
Pente (°)	0.615	3.052	4.098	4.139	6.084	40.026
Orientation (°)	11	123	175	178	231	346
TPI (m)	$-3 * 10^{-2}$	$-9 * 10^{-3}$	$1 * 10^{-3}$	$3 * 10^{-3}$	$1.3 * 10^{-2}$	$2 * 10^{-1}$
TRI (m)	$2.1 * 10^{-2}$	$9.9 * 10^{-9}$	$1.3 * 10^{-1}$	$1.5 * 10^{-1}$	$1.8 * 10^{-1}$	1.3

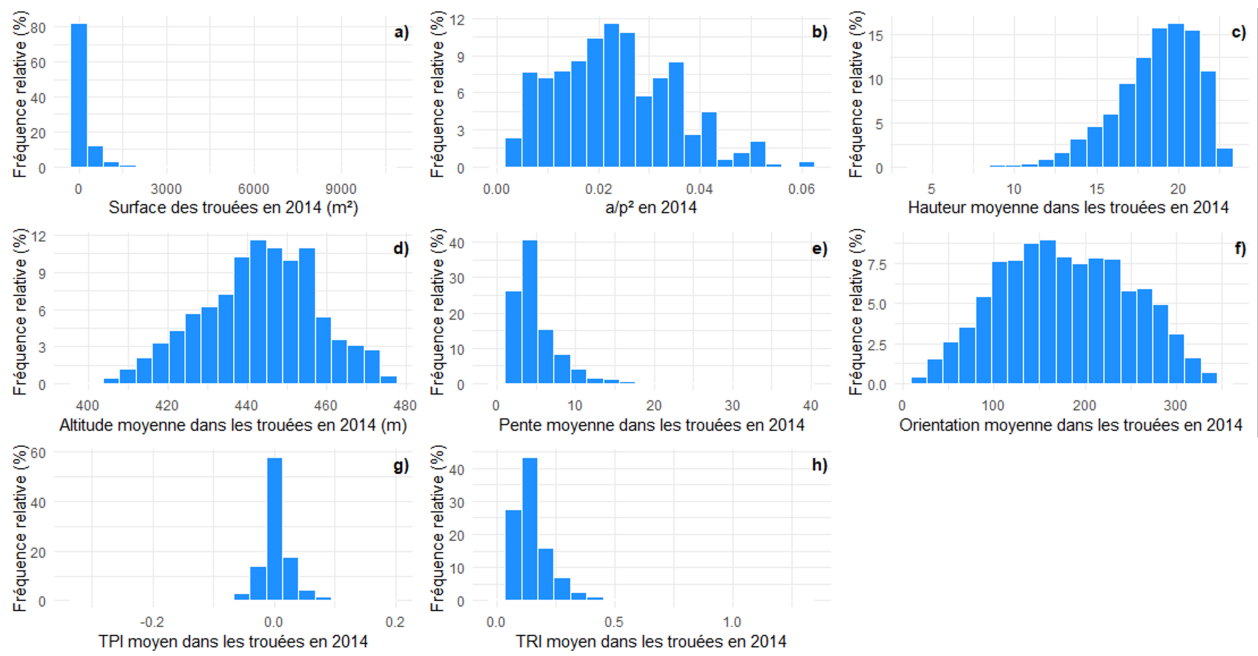


FIGURE 3.4 – Distribution des variables explicatives au sein des trouées détectées en 2014. a) Surface des trouées, en m^2 - b) a/p^2 (indice de forme) - c) Hauteur moyenne à l'intérieur des trouées - d) Altitude moyenne - e) Pente moyenne - f) Orientation moyenne - g) Topographic Position Index (TPI) moyen - h) Terrain Ruggedness Index (TRI) moyen.

A l'échelle de la zone d'étude, la topographie est assez homogène (Figure 3.5). En effet, les principales variations d'altitude, de pente et de TRI s'observent au niveau des cours d'eau qui traversent la forêt au Sud-Ouest et au Nord-Est. L'orientation du sol varie plus mais est associée à l'altitude et la pente : les berges de la rivière se font face et sont donc exposées différemment. Le TPI est très homogène.

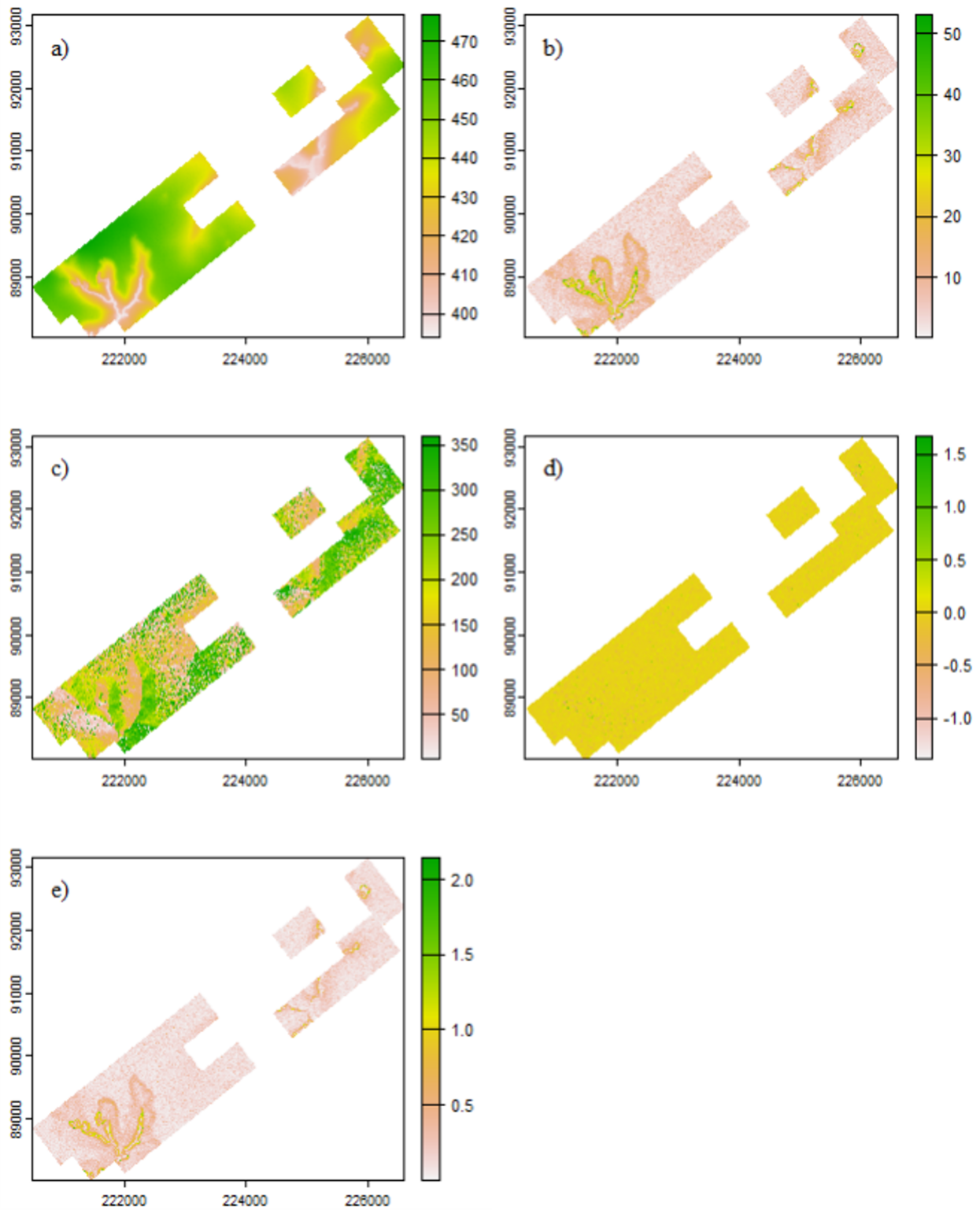


FIGURE 3.5 – Variables topographiques sur la zone d'étude. a) altitude (m) - b) pente (°) - c) orientation (°) - d) TPI (m) - e) TRI (m)(EPSG :32635).

3.3 Méthode 1 : Seuil de hauteur

Pour déterminer un seuil de hauteur séparant la croissance horizontale et verticale, une ACP a été réalisée sur les classes de croissance (Figure 3.6) . Les deux premières dimensions expliquent respectivement 23% et 13% de la variance observée. Il y a une séparation entre les classes de croissance très faible ([0;0.2], [0.2;0.4]

et [0.4;0.6] m/an) et les autres. Excepté cela, aucun groupe ne se distingue visuellement, il n'y a pas de séparation nette entre les classes de croissance.

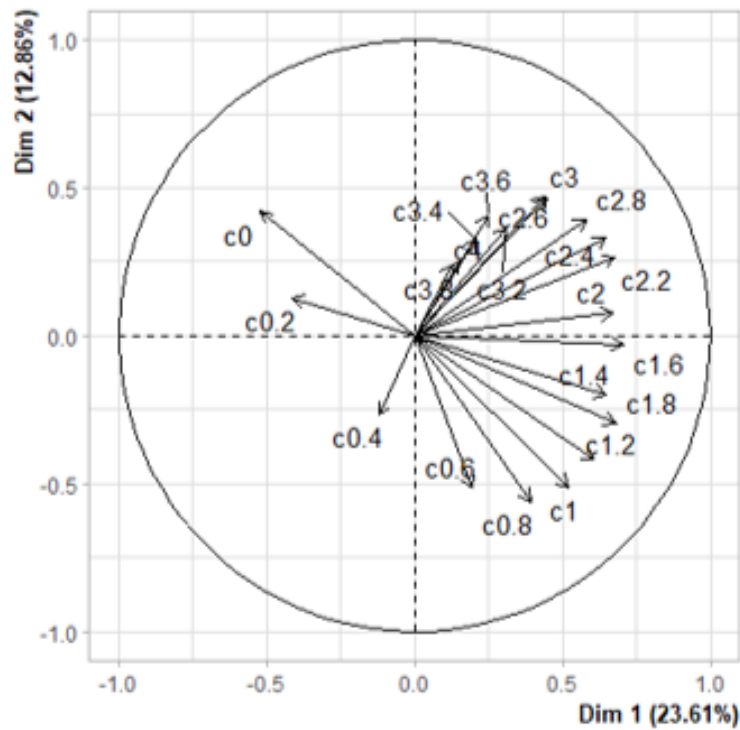


FIGURE 3.6 – Première et deuxième composantes principales de la ACP sur les classes de croissance annuelle. Le chiffre indiqué correspond à la première valeur de l'intervalle de la classe, chaque classe ayant une largeur de 0.2 m/an.

Pour évaluer l'effet de la largeur de la zone tampon, un test de Kruskal-Wallis, non paramétrique, a été réalisé (Tableau 3.3). En effet, les résidus de l'analyse de la variance sont non-normaux (test de Shapiro très hautement significatif) et l'homogénéité de la variance n'est pas respectée (test de Levene très hautement significatif). Le choix de la largeur de la zone tampon a un effet très hautement significatif sur le pourcentage de croissance vertical. Pour déterminer d'où vient cette différence, les largeurs de zone tampon ont été testées 2 à 2 avec un test de Dunn (Tableau 3.4). Deux groupes ressortent de cette analyse : les largeurs de 0, 3 et 5m et les largeurs de 7 et 10m.

TABLE 3.3 – Tests de Shapiro, Levene et Kruskal-Wallis effectués pour évaluer l'effet de la largeur de la zone tampon. Dans la 3^{ème} colonne, le nombre d'astérisques indique le niveau de significativité : "*" correspond à un résultat significatif (p -valeur <0.05), "***" correspond à un résultat hautement significatif (p -valeur <0.01) et "****" correspond à un résultat très hautement significatif (p -valeur <0.001)

Test	P-valeur	Significativité
Shapiro	$2.2 * 10^{-16}$	***
Levene	$7.278 * 10^{-6}$	***
Kruskal-Wallis	$3.97 * 10^{-10}$	***

TABLE 3.4 – Test de Dunn évaluant les différences entre les largeurs de la zone tampon 2 à 2. Le chiffre (à gauche de « - ») indique la p-valeur et le nombre d'astérisques (à droite de « - ») le niveau de significativité du test : * = significatif ($p\text{-valeur} < 0.05$) ; ** = hautement significatif ($p\text{-valeur} < 0.01$) ; *** = très hautement significatif ($p\text{-valeur} < 0.001$).

Largeur de la zone-tampon	0m	10m	3m	5m
10m	0 - *			
3m	1 - /	0 - *		
5m	1 - /	0.0029 - *	0.1463 - /	
7m	0.0002 - *	1 - /	0 - *	0.0114 - *

3.4 Méthode 2 : Détection automatique des couronnes

3.4.1 Modes de fermeture

La répartition des modes de fermeture, quelles que soient les variables explicatives, a été étudiée (Figure 3.7). Il est rare que les croissances horizontale et verticale referment une grande partie de la trouée : plus de 20% des trouées ont été refermées par de la croissance verticale sur moins de 25% de leur territoire. La proportion de trouées qui ont subi une majorité de croissance horizontale est légèrement plus importante. C'est d'ailleurs la croissance horizontale qui est le mode de fermeture ayant le plus refermé entièrement des trouées (pic à 1.00). En effet, la majorité des trouées ont stagné sur plus de la moitié de leur surface. Néanmoins, un peu moins de 10% des trouées n'ont pas du tout stagné et se sont entièrement refermées.

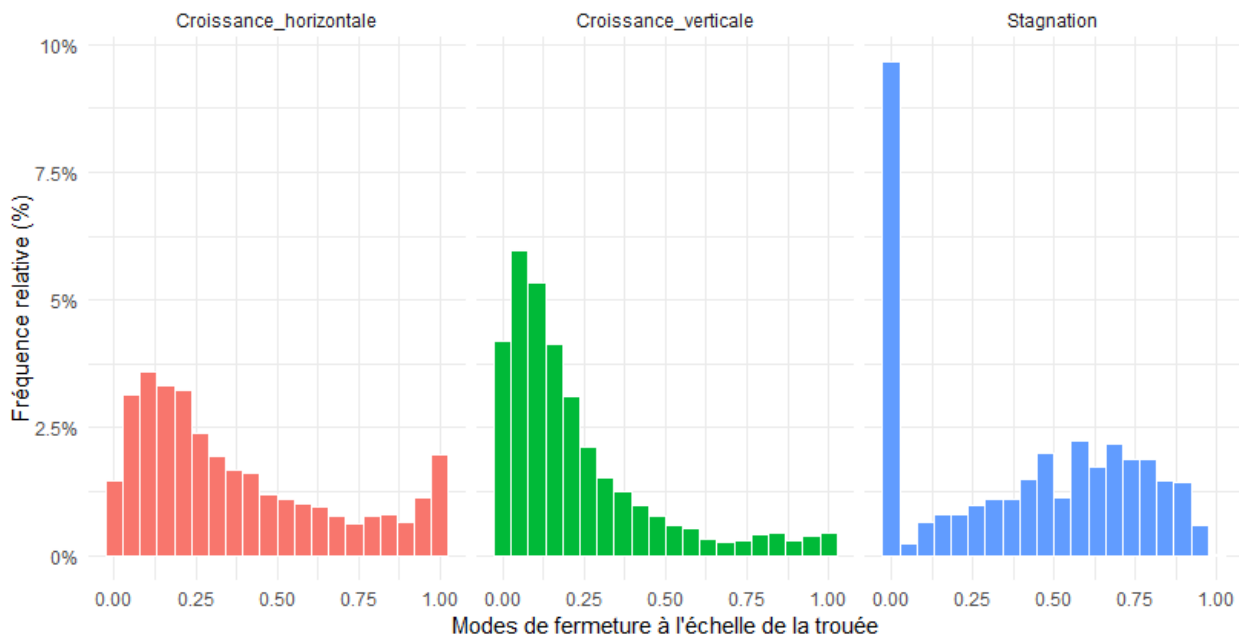


FIGURE 3.7 – Distribution relative des modes de fermeture. Gauche : croissance horizontale - Centre : croissance verticale - Droite : Stagnation. L'axe X représente la proportion de points concernés par ce mode de fermeture au sein d'une trouée, et l'axe Y représente la fréquence relative des trouées qui ont eu cette proportion de ce mode de fermeture.

3.4.2 Corrélogramme

La corrélation entre le mode de fermeture et la forme, la surface, la hauteur initiale et les variables topographiques des trouées a été testée, et montre que des relations existent entre ces différentes variables (Figure 3.8). Les grandes surfaces favorisent la stagnation et défavorisent la croissance horizontale. A l'inverse, la complexité de la forme et la hauteur initiale sont corrélées positivement à la croissance horizontale

et négativement à la stagnation. L'altitude quant à elle influence négativement la croissance verticale et positivement la stagnation. L'orientation, le TPI, et le TRI ont des corrélations faibles voire non significatives. La surface, la forme, l'altitude et la hauteur initiale sont donc les variables les plus corrélées aux modes de fermetures.

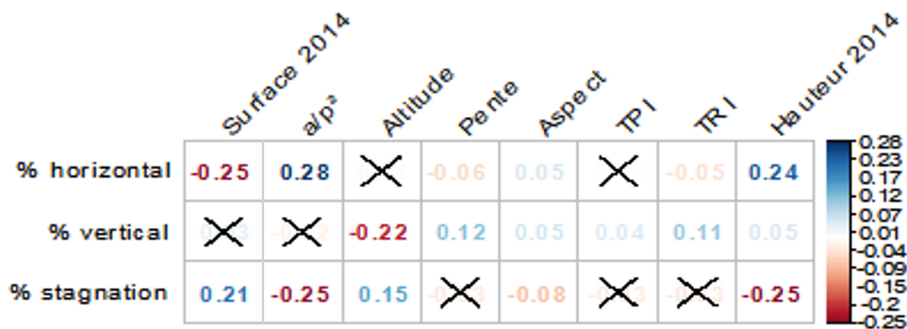


FIGURE 3.8 – Corrélations entre les pourcentages de croissance horizontale (% horizontal), de croissance verticale (% vertical) et de stagnation (% stagnation) et les variables explicatives. La surface de la trouée en 2014 (Surface 2014), la forme (a/p^2), l'altitude moyenne de la trouée (Altitude), la pente moyenne de la trouée (Pente), l'orientation moyenne de la trouée (Aspect), le Topographic Position Index moyen de la trouée (TPI), le Terrain Ruggedness Index moyen de la trouée (TRI) et la hauteur moyenne de la trouée en 2014 (Hauteur 2014). Les croix indiquent les corrélations non significatives (p -valeurs inférieures à 0.05).

3.4.3 Modèles Additifs Généralisés

Les Modèles Additifs Généralisés (GAM) permettent d'étudier plus finement les relations entre variables à expliquer et variables réponses, en modélisant des relations non-linéaires.

Cinq variables influencent significativement la croissance horizontale (Figure 3.9 et Tableau 3.5). La surface en 2014 est négativement corrélée à la croissance horizontale, car, plus la surface est petite, plus il est facile pour les arbres adjacents de refermer la trouée. La relation est particulièrement forte pour les trouées inférieures à $1000 m^2$. Au-delà de cette limite, l'intervalle de confiance s'agrandit fortement, car peu de grandes trouées sont présentes sur la zone d'étude (Figure 3.4 a)). La croissance horizontale est corrélée négativement à la complexité de la forme. L'hypothèse initiale de l'influence de la forme sur la croissance horizontale est donc à rejeter. L'altitude montre une relation légèrement positive avec la croissance horizontale entre 400 et 460 m. Ensuite, la relation devient négative. La pente montre une relation positive. La hauteur initiale influence peu la croissance horizontale, sauf quand la hauteur se situe aux alentours de 20-23 m, c'est-à-dire proche de la limite de la définition de la trouée.

<

TABLE 3.5 – *P*-valeurs des variables explicatives (en ligne) selon les 3 modes de fermeture (en colonne). La présence d'un symbole entre parenthèse indique le niveau de significativité de la variable : "*" indique une variable significative (p -valeur <0.05), "***" une variable hautement significative (p -valeur <0.01) et "****" indique une variable très hautement significatif (p -valeur <0.001). Si rien n'est indiqué, c'est que la variable est non significative.

Variables explicatives	Croissance horizontale	Croissance verticale	Stagnation
Surface	$< 2 * 10^{-16}(***)$	0.00675(**)	$< 2 * 10^{-16}(***)$
Forme	$5.13 * 10^{-5}(***)$	0.079	0.0250(*)
Hauteur initiale	$< 2 * 10^{-16}(***)$	0.0752	$< 2 * 10^{-16}(***)$
Altitude	$2.78 * 10^{-06}(***)$	$< 2 * 10^{-16}(***)$	$< 2 * 10^{-16}(***)$
Pente	0.00477(**)	0.0671	0.988
Orientation	0.0691	0.739	0.00716(**)
TPI	0.971	0.0633	0.136
TRI	0.130	0.0779	0.876

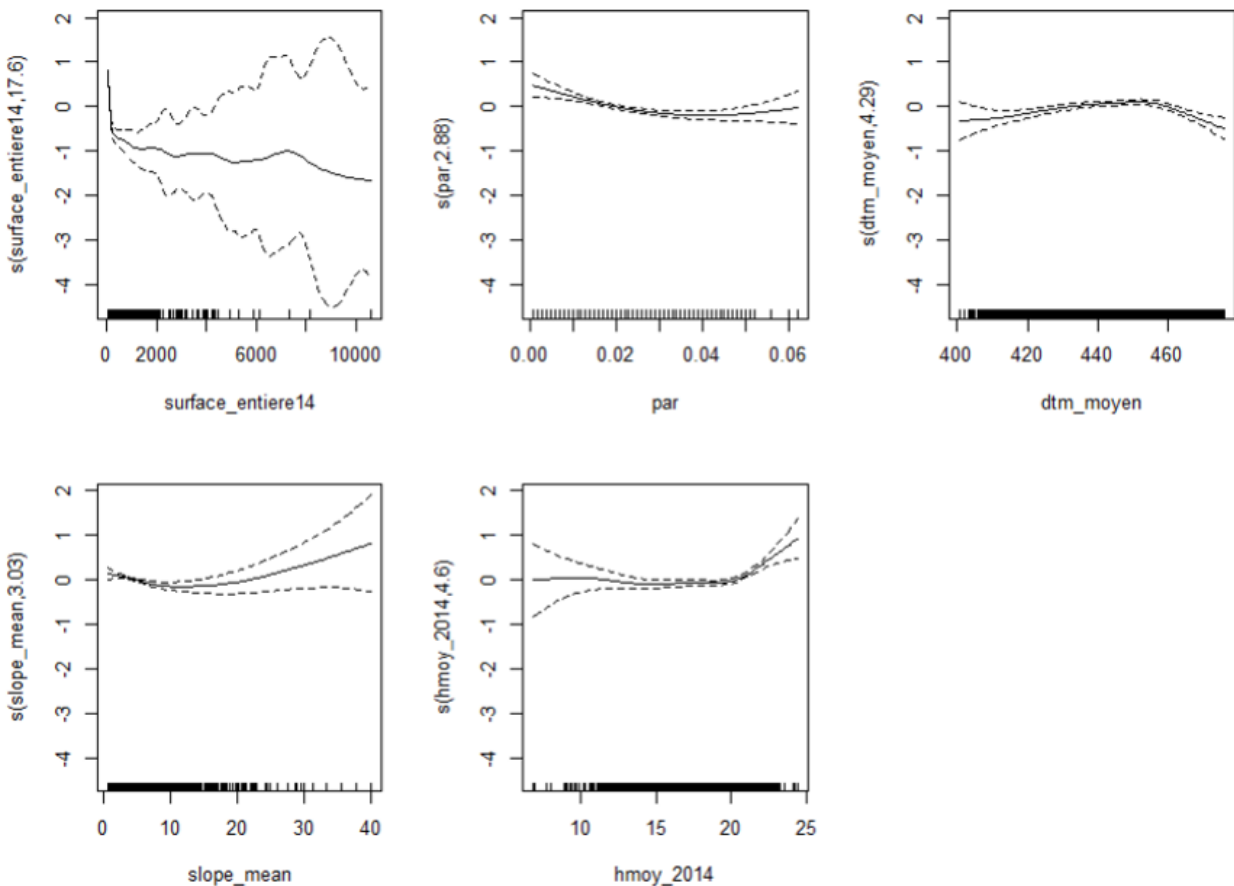


FIGURE 3.9 – Pourcentage de croissance horizontale (Axe Y) en fonction des variables explicatives significatives (Axe X) dans le GAM. Les variables significatives sont la surface de la trouée en 2014 (*surface_entiere14*), la forme de la trouée (a/p^2), l'altitude moyenne de la trouée (*dtm_moyen*), la pente moyenne de la trouée (*slope_mean*) et la hauteur moyenne de la trouée en 2014 (*hmoy_2014*). Les lignes en pointillés correspondent à l'intervalle de confiance de la modélisation (95%). Les petites lignes verticales en bas de chaque graphique indiquent les valeurs de la variable explicative présentes dans le jeu de données de calibration. $RMSE = 0.26$

La stagnation est expliquée par 4 variables : la surface initiale, l'altitude, l'orientation et la hauteur initiale (Figure 3.10 et Tableau 3.5). La surface initiale et l'altitude ont une relation positive avec la stagnation tandis que l'orientation et la hauteur initiale ont une influence légèrement négative. Pour la surface initiale,

l'évolution de l'intervalle de confiance est identique à celle de la croissance horizontale (Figure 3.9).

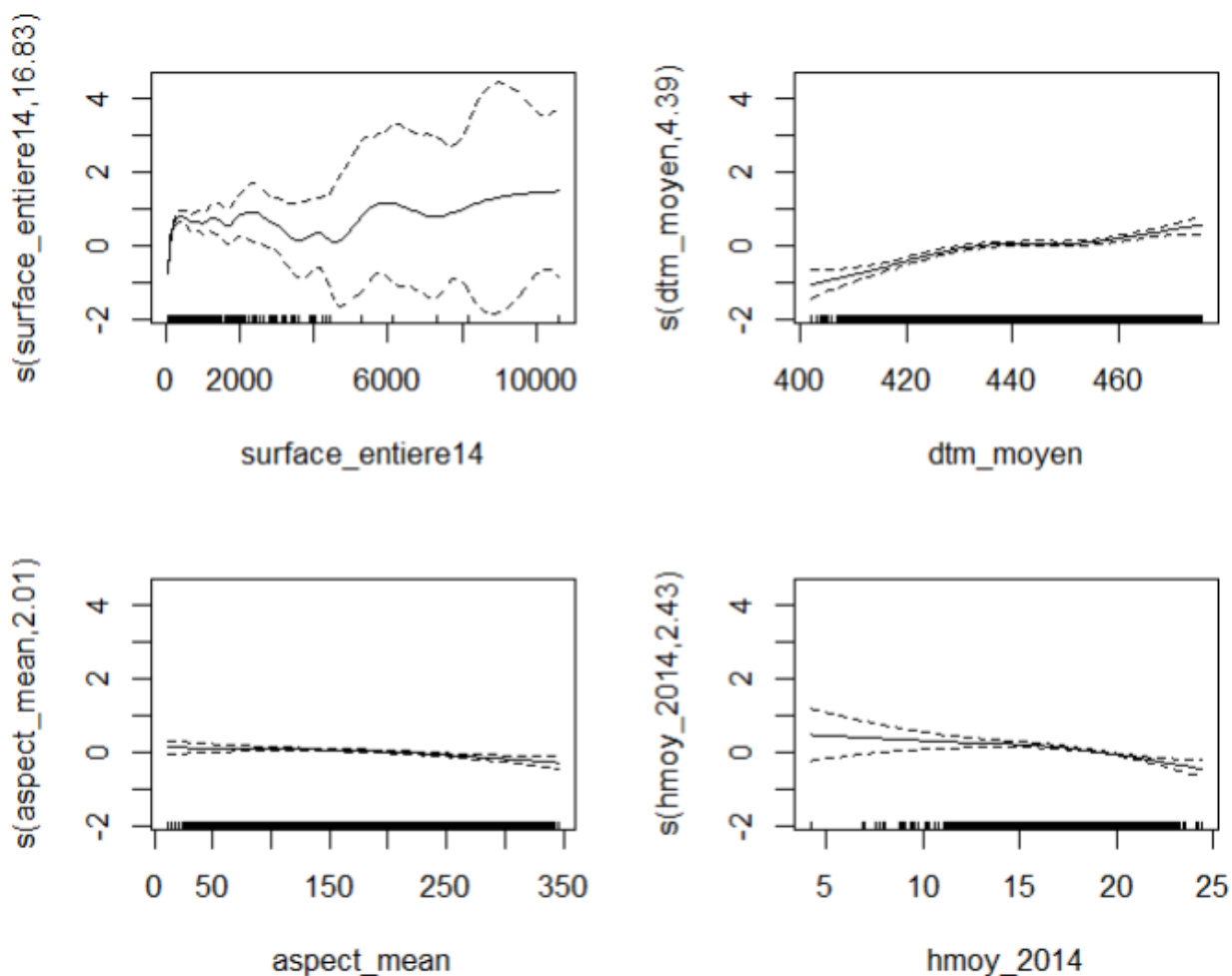


FIGURE 3.10 – Pourcentage de stagnation (Axe Y) en fonction des variables explicatives significatives (Axe X) dans le GAM. Les variables significatives sont la surface de la trouée en 2014 (surface_entiere14), l'altitude moyenne de la trouée (dtm_moyen), l'orientation moyenne de la trouée (aspect_mean) et la hauteur moyenne de la trouée en 2014 (hmoy_2014). Les lignes en pointillés correspondent à l'intervalle de confiance de la modélisation (95%). Les petites lignes verticales en bas de chaque graphique indiquent les valeurs de la variable explicative présentes dans le jeu de données de calibration. $RMSE = 0.29$

La croissance verticale est assez mal expliquée par les variables choisies (Figure 3.11 et Tableau 3.5). La surface montre une corrélation négative avec la croissance verticale : dans les petites trouées, il y a peu de croissance verticale. L'intervalle de confiance augmente fortement pour les trouées supérieures à $2000m^2$, pour les raisons présentées précédemment. L'altitude montre une relation négative avec la croissance verticale.

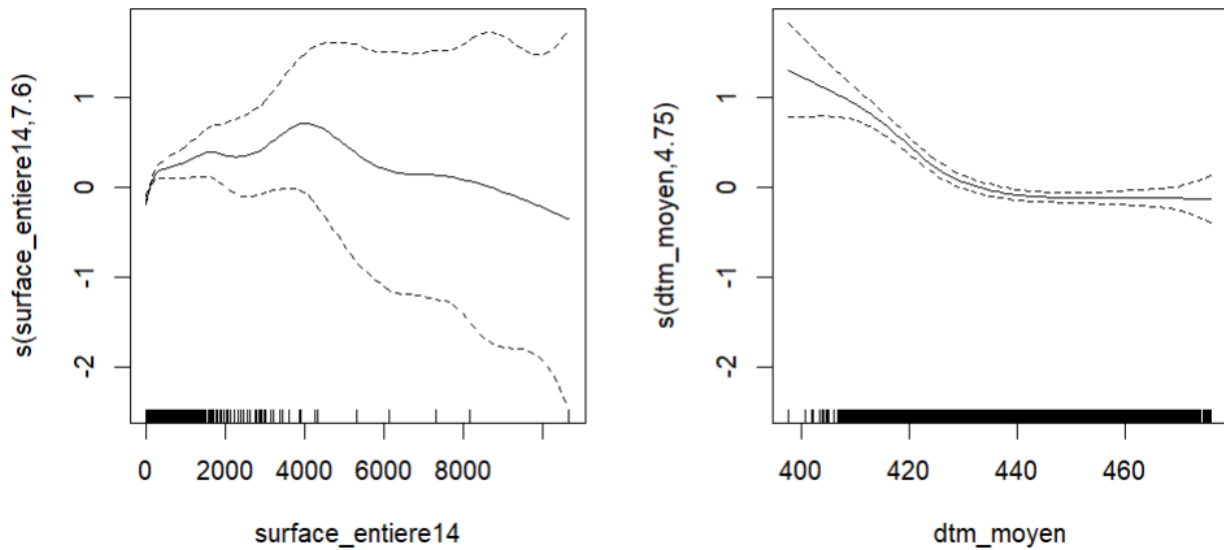


FIGURE 3.11 – Pourcentage de croissance verticale (Axe Y) en fonction des variables explicatives significatives (Axe X) dans le GAM. Les variables explicatives sont la surface de la trouée en 2014 (*surface_entiere14*) et l'altitude moyenne de la trouée (*dtm_moyen*). Les lignes en pointillés correspondent à l'intervalle de confiance de la modélisation (95%). Les petites lignes verticales en bas de chaque graphique indiquent les valeurs de la variable explicative présentes dans le jeu de données de calibration. $RMSE=0.21$

L'existence d'une relation entre la forme et la surface de la trouée a été testée. Il y a une forte relation négative entre ces deux variables : les petites surfaces sont associées à des formes simples et les grandes trouées ont des formes plus complexes (Figure 3.12). Le coefficient de corrélation entre ces deux variables est de 0.463.

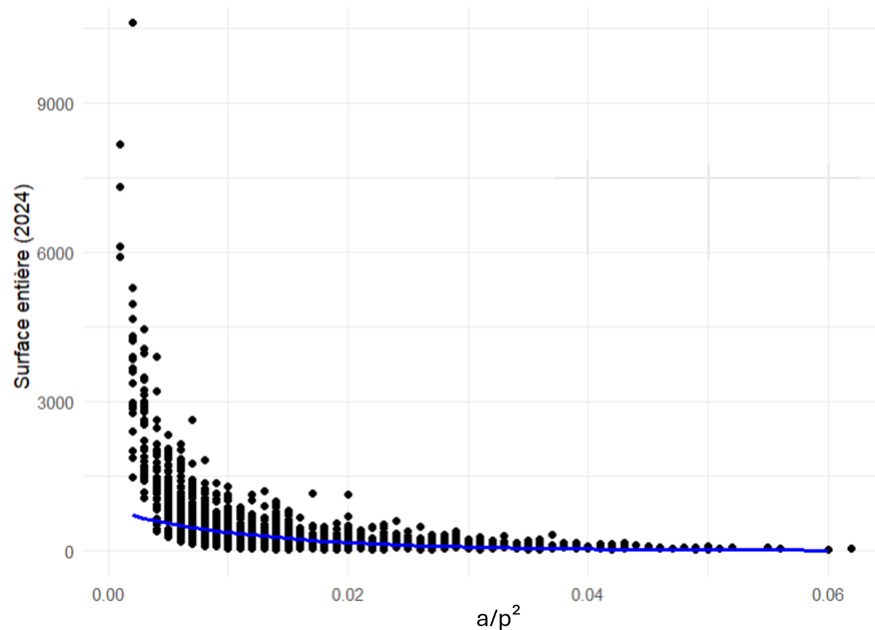


FIGURE 3.12 – Surface initiale de la trouée en 2014 (Axe Y) en fonction de la forme de la trouée en 2014 (Axe X). Les points représentent les données individuelles et la courbe bleue indique le modèle linéaire généralisé (*glm*) modélisé à partir de ces données, avec une distribution de type gamma.

Chapitre 4

Discussion

4.1 Interprétation écologique

L'objectif de ce mémoire est d'identifier les facteurs externes influençant la stagnation et les croissances horizontale et verticale, parmi la forme, la surface et la hauteur initiale de la trouée, l'altitude, la pente, l'orientation, le TPI, et le TRI.

4.1.1 Propriétés structurelles

Nos résultats révèlent que les petites surfaces, les formes simples et les hauteurs initiales élevées favorisent la croissance horizontale.

Nos résultats ont permis de confirmer l'hypothèse initiale d'une influence de la surface sur le mode de fermeture : les grandes trouées favorisent la croissance verticale et la stagnation, tandis que les trouées plus petites favorisent la croissance horizontale (Figures 3.8, 3.9, 3.11 et 3.10). Le même phénomène a été observé dans les forêts boréales du Canada par Vepakomma et al. (2011) où 83% de la croissance horizontale a été observée dans les trouées inférieures à $200m^2$. L'expansion des couronnes est plus rapide que la régénération naturelle (Ogden et al., 1991). Cela s'explique sûrement car les arbres qui étendent leur cime peuvent compter sur des systèmes foliaire et racinaire déjà établis, facilitant la photosynthèse et la récolte d'eau et de nutriments. La croissance verticale est de ce fait défavorisée lorsque ces deux modes de croissance sont en compétition. Pour autant, la croissance des cimes est limitée horizontalement. Ces dernières ne peuvent s'étendre indéfiniment car le tronc ne pourrait le supporter. La croissance horizontale est donc limitée aux bordures des trouées. Or, les trouées de petites surfaces ont proportionnellement plus de bordures, ce qui permet aux arbres adjacents d'atteindre une plus grande part de la trouée en étendant leurs couronnes. Cela favorise donc la croissance horizontale, et diminue la proportion de croissance verticale (Denslow, 1980). Dans les grandes trouées, la zone non atteignable par les couronnes adjacentes augmente, et c'est dans ces zones que se retrouvent la stagnation et la croissance verticale. L'augmentation de la proportion de stagnation en fonction de la surface est rapide au début, puis il y a un plateau entre 500 et $5000 m^2$, puis à nouveau une augmentation, moins forte. Cette seconde augmentation pourrait correspondre à la présence de Marantaceae, des herbacées et lianes géantes particulièrement présentes en Afrique Centrale. Elles poussent de manière très dense, empêchant ainsi la régénération d'autres espèces, et elles peuvent occuper de grandes étendues. Elles sont plus basses que les autres arbres de canopées, ce qui les fait passer pour des trouées, alors qu'elles correspondent en réalité à la stabilisation d'une phase de perturbation dans le cycle sylvigénétique (Pouteau et al., 2024). Si cette hypothèse est vérifiée, il serait intéressant d'exclure les zones à Marantaceae des trouées, soit en identifiant les zones contenant ces espèces, soit en excluant les trouées trop grandes (l'ampleur de cette surface-seuil étant à déterminer). A l'avenir, le changement climatique va augmenter la fréquence d'événements climatiques extrêmes. Par exemple, le vent et les éclairs favorisent les trouées plus grandes (Reis et al., 2022). Cela devrait augmenter la perturbation des trouées, et favoriser la création de trouées plus grandes. Cela faciliterait donc

la croissance des jeunes arbres, mais aussi la stagnation. Si ce phénomène prenait trop d'ampleur, il pourrait donc participer à la dégradation des forêts. Il est important de continuer à étudier ces processus.

Concernant la forme, l'hypothèse initiale est que les formes complexes ont plus de croissance horizontale et moins de croissance verticale et de stagnation, à cause de l'effet de bordure augmentant l'interaction avec les arbres adjacents, et donc la surface sur laquelle ceux-ci peuvent étendre leur couronne. Cette hypothèse est rejetée, car les résultats montrent que la croissance horizontale est plutôt associée à une forme simple (Figure 3.9 et 3.8) et la stagnation (Figure 3.8) à des formes complexes, tandis que la croissance verticale n'est pas influencée par la forme de la trouée (Figure 3.11). Ce résultat inattendu s'explique par la forte relation entre la surface et la forme des trouées : les petites surfaces sont associées à des formes simples et les grandes surfaces à des formes plus complexes (Figure 3.12). Or, les petites surfaces favorisent la croissance horizontale, au détriment de la croissance verticale et de la stagnation (Figures 3.9, 3.11 et 3.10). Les trouées de forme simple favorisent donc la croissance horizontale parce qu'elles correspondent à de petites trouées. L'indice de forme est donc influencé par la taille de la trouée, ce qui empêche d'appréhender l'impact réel de la forme sur le mode de fermeture. Or, l'impact présumé de la forme correspond en réalité à l'impact de la distance entre un point de la trouée et la forêt adjacente : plus un point est proche de la forêt, plus la croissance horizontale est favorisée puisque, comme expliqué précédemment, l'extension des cimes est plus rapide que la régénération naturelle. En effet, la croissance en hauteur des espèces héliophiles est favorisée lorsqu'elles sont au centre de la trouée (Lu et al., 2021). De plus, leur croissance est plus importante si ces plants se trouvent au Nord, à l'Est ou à l'Ouest (Lu et al., 2021) car l'intensité lumineuse y est plus importante (Zhang et al., 2018) : lorsque le soleil est au Sud de la trouée, les plants situés au Sud de la trouée en sont protégés par les arbres adjacents. La surface de la trouée agit aussi sur le type d'espèces présentes. Dans les petites trouées, il y a plus d'espèces tolérantes à l'ombre, et au sein des grandes trouées, il y a plus d'espèces héliophiles et thermophiles, ayant besoin de température et de luminosité plus importantes pour se développer (Denslow, 1980). Au sein des petites trouées, la proportion de surface impactée par l'ombre ou la croissance horizontale des arbres adjacents est plus importante. En effet, il existe un gradient lumineux, qui influence entre autre la présence d'un type ou l'autre d'espèces (Kobe, 1999). Ce gradient influence aussi probablement le mode de fermeture : là où la luminosité au sol est faible (=au Sud et sur les bords), la croissance horizontale est favorisée, tandis que quand la luminosité est importante, la croissance verticale est favorisée. La croissance horizontale à proximité des bords pourrait être éclipsée par la prédominance de la croissance verticale dans les grandes trouées. Néanmoins, ce mémoire ne tient pas compte de la variabilité intra-trouées, il faudrait donc analyser la croissance de chaque pixel individuellement, et en incluant par exemple la distance à la bordure de la trouée.

La hauteur moyenne initiale de la trouée n'a pas d'effet sur la stagnation (Figure 3.10), mais elle semble influencer positivement la croissance horizontale et négativement la croissance verticale. Cela revient à rejeter l'hypothèse initiale, selon laquelle la hauteur initiale favorise la croissance verticale et à la stagnation, et défavorise la croissance horizontale. Mais cette influence s'applique surtout sur les trouées dont la hauteur initiale moyenne est supérieure à 20 m, c'est-à-dire proche de la limite maximale de 23 m (Figures 3.8, 3.9, 3.11).

Concernant la hauteur initiale, l'hypothèse de départ était qu'une hauteur initiale haute favorise la croissance initiale. En effet, les arbres les plus grands de la trouée devraient être plus compétitifs face aux couronnes des arbres adjacents. Or, l'effet inverse a été observé : quand la hauteur initiale augmente, la stagnation diminue et la croissance horizontale augmente (Figures 3.9 et 3.10). Cependant, cette influence s'applique surtout sur les trouées dont la hauteur initiale moyenne est supérieure à 20 m, c'est-à-dire proche de la limite maximale de 23 m. Cela pourrait s'expliquer par la méthode d'identification des couronnes : les couronnes ont été identifiées parmi les zones supérieures à 23 m (c'est-à-dire les zones qui ne sont pas des trouées). Or, il est tout à fait possible que seule une partie d'un houppier soit inférieure à 23 m. Ainsi, en 2014, une même couronne peut appartenir à la fois à la canopée et à la trouée et, en 2023, appartenir entièrement à la canopée. La croissance verticale n'est pas influencée par la hauteur initiale, probablement car elle reste moins compétitrice que la croissance horizontale. Par ailleurs, ce travail utilise la hauteur initiale moyenne,

afin de travailler à l'échelle de la trouée, mais il est possible que ce choix masque certains effets de la hauteur initiale. Par exemple, la croissance (sans distinguer un type ou l'autre) diminue lorsque la hauteur initiale augmente (Figure 3.1). De futures recherches pourraient s'intéresser aux variations de hauteur au sein des trouées, en travaillant à l'échelle du pixel. Il serait également intéressant de mettre cette hauteur initiale en relation avec la position au sein de la trouée. En effet, comme la croissance horizontale est limitée aux bords de la trouée, il se pourrait que la hauteur initiale n'est pas d'influence au centre de la trouée mais bien au niveau des bordures.

4.1.2 Facteurs topographiques

La topographie est assez peu marquée sur la zone d'étude, sauf à proximité des cours d'eau (Figure 3.5). Elle a néanmoins une influence sur le mode de fermeture des trouées. L'altitude favorise la stagnation au détriment des deux types de croissance, la pente influence négativement la croissance horizontale, et les trouées orientées à l'Ouest défavorisent légèrement la stagnation. Le TPI et le TRI influencent moins fortement le mode de fermeture.

L'altitude varie peu sur la zone d'étude, puisqu'elle est comprise entre 398 m et 476 m de haut (Tableau 3.2), mais c'est le facteur topographique qui a le plus d'influence sur le mode de fermeture. Nos résultats montrent que, plus l'altitude augmente, plus la stagnation est favorisée, au détriment des croissances horizontale et verticale (Figures 3.9, 3.10 et 3.10). Comme expliqué au Point 1.2.1, la hauteur de la canopée est influencée négativement par l'altitude (Jucker, Bongalov, et al., 2018 ; Reis et al., 2022 ; Tudose et al., 2023 ; Werner & Homeier, 2015). Si cette diminution de hauteur s'accompagne d'une croissance plus lente, alors il est logique qu'il y ait plus de stagnation dans les trouées d'altitude plus importante, tout simplement car elles mettent plus de temps à se refermer. A l'inverse, une étude menée en Afrique Centrale sur des faibles variations d'altitude a montré que les arbres situés entre 71 et 350 m d'altitude étaient plus petits que lorsque l'altitude est supérieure à 350 m (pour un même diamètre) (Menanzala Miambam et al., 2021). Ainsi, si les arbres sont plus grands, la probabilité qu'ils se brisent et créent des trouées est plus importante, et la surface des trouées est en moyenne plus grande également. Or, les grandes surfaces favorisent la stagnation (Figure 3.10). L'altitude influence donc probablement indirectement le mode de fermeture, en étant corrélée à la surface de la trouée. Enfin, une dernière hypothèse pour expliquer la relation entre l'altitude et les modes de croissance est que le gradient altitudinal corresponde par hasard à un gradient d'impact anthropique. Effectivement, les plateaux se trouvent dans la moitié sud de la zone d'étude, à proximité de plusieurs villages et de la ville de Yangambi. Cela suggère que les habitants exploitent la forêt, de préférence à proximité de leur village. Cette exploitation, pour exemple pour la récolte de bois l'agriculture sur brulis, favoriserait la présence de grandes trouées (Reis et al., 2022), et donc la stagnation et la croissance verticale.

Nos analyses démontrent que les pentes inférieures à 15° sont défavorables à la croissance horizontale, tandis que les pentes plus fortes favorisent l'expansion des cimes. (Figure 3.9). Lobo & Dalling (2014) et Goulamoussène et al. (2017) ont montré que sur des pentes légères, la proportion totale de trouées diminue, mais qu'il y a proportionnellement plus de grandes trouées. Or, les grandes trouées sont moins favorables à l'expansion latérales des couronnes. Cela suggère que la pente influence indirectement le mode de croissance, en jouant sur la surface des trouées. De surcroit, les zones de pente sont plus pauvres en eau et en nutriment, de part le ruissellement, cela complique donc probablement le développement de la régénération naturelle. Peu de trouées présentent une pente importante (75% des observations sont inférieures à 6,084%, Tableau 3.2), ce qui se traduit par une plus grande incertitude quant à la relation entre ces 2 paramètres sur les fortes pentes (Figure 3.9). Il convient donc d'être prudent face à cette relation positive entre la pente et la croissance horizontale. De plus, la pente n'a pas d'influence significative sur la régénération naturelle ou sur la stagnation.

L'orientation est une variable significative dans l'explication de la stagnation. Les résultats indiquent que la stagnation est plus faible dans les trouées orientées à l'Ouest, c'est-à-dire vers 240°(Figure 3.10) contrairement à l'hypothèse initiale. La présence des nuages ne semble donc pas influencer la croissance.

Cependant, la relation observée est si faible qu’il ne semble pas pertinent d’en tenir compte. La rugosité du terrain, approchée par le TRI, n’a aucun impact sur le mode de fermeture (Tableau 3.5). Cela s’explique probablement par la faible variation de l’indice sur la zone d’étude : 75% des points ont un TRI compris entre 0.0210 et 0.184 m (Tableau 3.2 et Figure 3.5 a)). Cela signifie que les différences entre un point et ses voisins (avec une résolution de 1 m) sont majoritairement inférieures à 20 cm. Le TPI n’est pas non plus une variable significative pour expliquer le mode de fermeture des trouées. Cela indique que le fait qu’une trouée soit située sur un sommet ou dans une vallée n’a pas d’impact.

Au cours de cette étude, les facteurs topographiques ont été calculés sur une seule échelle : d’abord à 2 m de résolution, puis leur valeur moyenne a été calculée pour chaque trouée. Cependant, l’effet des variables topographiques varie selon l’échelle à laquelle celles-ci sont calculées. Par exemple, Cushman et al. (2022) ont montré qu’une échelle de 16 m de résolution favorisait la relation entre la pente et les perturbations de la canopée. Pour une trouée circulaire, cela correspond à environ 200 m^2 . Jucker, Bongalov et al. (2018) ont calculé la pente et le TPI par zone de 1 ha. En comparaison, la surface médiane des trouées est ici de 72 m^2 . Il est donc possible que les résultats de cette étude soient influencés par des variations locales peu importantes en réalité. Ainsi, les variations de pente, TPI et TRI seraient plus importantes, et auraient peut-être un effet sur le mode de croissance. Il est d’ailleurs possible que l’influence de l’altitude cache une influence de la pente. Effectivement, le pourcentage de régénération naturelle se stabilise vers 440 m de haut, tandis que la proportion d’expansion des cimes chute à partir de cette limite. Or, cette altitude correspond aux plateaux (Figure 3.5 a)). Dans ces zones de plateaux, la pente varie mais reste relativement faible. Il est possible que l’échelle choisie pour évaluer la pente soit trop faible, et que cela ait pris en compte des variations locales peu importantes pour comprendre le relief global de la zone d’étude. Cela peut aussi expliquer l’absence d’influence du TPI et du TRI. De prochaines études pourraient tester plusieurs échelles de calcul, pour déterminer laquelle est la plus pertinente pour expliquer les contributions des modes de croissance à la fermeture des trouées.

Dans les forêts exploitées, la principale cause d’apparition de trouées est l’abatage d’un arbre. Les trouées sont généralement d’une surface plus importante qu’en forêt non exploitée, alors que la hauteur de la canopée est généralement plus faible (Reis et al., 2022). Les résultats de ce mémoire peuvent être appliqués à la gestion des forêts. En effet, la sylviculture applique les découvertes scientifiques pour imiter le comportement naturel des forêts. Cela permet d’améliorer les rendements tout en protégeant le milieu naturel. Ainsi, si l’on souhaite favoriser la croissance verticale, il est pertinent de garantir une trouée suffisamment grande, et au besoin, de l’agrandir après avoir récolté l’arbre ciblé si nécessaire. Cependant, il ne faut pas créer de trouées trop grandes car celles-ci mettent plus de temps à se refermer (Reis et al., 2022) voire se transforment en zones à Marantaceae.

4.2 Aspects méthodologiques

4.2.1 Définition des trouées

Les analyses démontrent que la croissance moyenne devient négative à partir de 23 m de haut (Figure 3.1). Hunter et al. (2015) ont aussi détecté un passage à une croissance moyenne négative aux alentours de 20 m de haut. Dans le cadre de ce mémoire, cette valeur a été choisie pour définir la hauteur maximale d’une trouée. Cette valeur s’éloigne des 10 m régulièrement utilisés (Tableau 1.1). Elle reste dans la gamme de données régulièrement utilisées, puisque plusieurs études utilisent 20 m (Bottero et al., 2011 ; Nagel & Svoboda, 2008 ; Petritan et al., 2013). Cela permet de prendre en compte une plus grande variabilité de la forêt. De plus, cette méthode permet de s’affranchir des observations sur le terrain. Se baser sur une définition dynamique des trouées (où les trouées sont les zones dont la hauteur a suffisamment diminué sur une période donnée) semble plus approprié pour tenir compte des variations locales de la canopée (Cushman et al., 2022 ; Dalagnol et al., 2021 ; Winstanley et al., 2024). Néanmoins, les données utilisées dans ce mémoire ne permettent pas d’utiliser une définition dynamique des trouées, car cela nécessiterait trois périodes de collecte de données, pour voir la formation de trouée puis la fermeture. Or, ici, seules deux périodes de collecte de données sont

disponibles.

4.2.2 Méthode 1 : Seuil de hauteur

L'analyse révèle que la largeur de la zone tampon utilisée pour déterminer la valeur du seuil de croissance verticale maximale a un effet significatif sur la proportion de croissance verticale observée. Cette méthode a pour but de s'affranchir des observations de terrain, en isolant le centre des trouées, supposé abriter seulement de la croissance verticale. Cependant, selon la largeur de zone tampon utilisée, des résultats significativement différents sont obtenus. Selon le test de Dunn réalisé, deux groupes de largeur se distinguent : 0-3-5 m et 7-10 m. Or, il n'est pas possible de connaître la largeur de zone tampon appropriée à partir de ces résultats et, si un choix devait être fait, il serait arbitraire. Le choix le plus sécurisé serait d'utiliser une grande largeur de zone tampon, par exemple 10 m. Cela restreindrait l'analyse aux plus grandes trouées, dans lesquelles la croissance horizontale est défavorisée, ce qui assurerait de séparer efficacement les deux modes de croissance. Cependant, les grandes trouées favorisent également la stagnation, ce qui pourrait limiter la valeur de croissance en hauteur maximale obtenue. Par ailleurs, une largeur de 10 m correspond à une trouée circulaire d'au moins 300 m^2 . Or, 75% des observations sont inférieures à 188 m^2 (Tableau 3.2, cela reviendrait donc à exclure une grande partie des trouées. Cela risque d'engendrer une perte de représentativité.

Par ailleurs, cette méthode se base sur l'hypothèse peu probable que les valeurs de croissances verticale et horizontale sont clairement séparées. Il semble pourtant envisageable d'avoir une même valeur de croissance qui correspond dans certains cas à la croissance horizontale et dans d'autres à la croissance verticale. En effet, l'Analyse en Composante Principale réalisée sur les différentes classes de hauteur ne met pas en évidence de seuil fixe séparant les croissances verticale et horizontale (Figure 3.6). Il y a bien une séparation vers 0.6 m/an , mais cette valeur semble trop faible pour servir de seuil. De plus, les études se basant sur de tels seuils ont utilisé des valeurs plus grandes, 4 m/an (Hunter et al., 2015) ou 1 m/an par exemple (Leclère et al., 2024). Il n'est donc pas possible de déterminer un seuil séparant les croissances horizontale et verticale. Il est à noter que les 2 premières dimensions n'expliquent que 36% de la variance, ces résultats sont donc à nuancer.

Néanmoins, selon cette méthode, plus de 99% des zones qui se sont refermées au cours de la période étudiée l'ont été par croissance verticale et ce, quelle que soit la largeur du zone tampon utilisée. C'est légèrement supérieur à ce que d'autres études ont trouvé : 90 à 94% de croissance verticale dans les forêts tropicales d'Amazonie (Hunter et al., 2015), 88% de croissance verticale dans les forêts boréales (Vepakomma et al., 2011). Il est probable que le seuil déterminé soit trop haut. Cela pourrait indiquer que cette méthode fonctionne tout de même.

Au regard de ces éléments, l'influence des variables explicatives sur le mode de fermeture n'a donc pas été étudié pour cette méthode. En effet, le choix d'une largeur de zone tampon est arbitraire et l'existence même d'un seuil séparant croissance verticale et horizontale est remise en question, cette méthode semble donc trop biaisée pour être fiable. Les trouées sont des écosystèmes complexes, et cette méthode semble ne pas suffisamment prendre en compte la variabilité des trouées.

4.2.3 Méthode 2 : Détection automatique des couronnes

Une nouvelle méthode a été développée, en essayant de s'affranchir des hypothèses de la méthode des seuils de hauteur. La méthode développée ici se base sur la détection des couronnes des arbres adjacents aux trouées. Cela évite de devoir choisir un seuil de croissance verticale maximale. Cela permet aussi de sortir d'une vision binaire de la croissance, dans laquelle les croissances verticale et horizontale sont clairement séparées.

Ce mémoire analyse le mode de fermeture de plus de 4000 trouées. Ce travail à grande échelle permet d'appréhender une variété de situations et d'entraîner et de valider les GAM. Cependant, aucune données

n'ont été collectées sur le terrain pour évaluer l'efficacité et la précision de la méthode développée pour différencier les croissances horizontale et verticale ("Détection automatique des couronnes").

La détection automatique des couronnes (ITC) à partir des données LiDAR n'est pas très précise. Elle sépare correctement les zones de canopée et les zones de trouée, mais elle identifie mal les arbres individuellement. En effet, certaines couronnes ont des bordures linéaires, ce qui n'est pas réaliste (Figure 2.4). L'impact de ce problème reste limité, car l'objectif ici n'est pas de s'intéresser à la croissance individuelle de chaque arbre, mais bien au mode de fermeture des trouées. Néanmoins, les maxima locaux détectés sont assimilés aux troncs des arbres et c'est sur base de ces troncs d'arbres qu'il est déterminé si un arbre appartient à la trouée ou à l'extérieur. Il serait donc intéressant de tester la même méthode mais avec une meilleure identification des couronnes, par exemple à partir de photo-interprétation. En effet, des photographies aériennes à très haute résolution ont été prises en même temps que les données LiDAR, il est donc possible de les utiliser pour délimiter les couronnes des arbres, puis de superposer ces données avec celles sur les trouées. La photo-interprétation manuelle prend un temps non-négligeable, d'autant plus que cette zone d'étude comprend 4000 trouées, dont il faut identifier tous les arbres adjacents. Cependant, depuis quelques années, il est possible d'entraîner des algorithmes à détecter automatiquement les couronnes sur base de photographies aériennes, en créant un jeu de données d'entraînement basé sur une délimitation manuelle des couronnes. C'est par exemple le cas de l'algorithme *DetectTree*. Utiliser deux méthodes d'identification des arbres permettrait aussi de comparer les résultats sur les modes de croissance observés.

Ce mémoire se base sur des données LiDAR collectées en 2014 et en 2023 selon des modalités différentes (Point 2.2). Pour minimiser l'impact de ces différences, les deux jeux de données ont été ramenés à des densités de points similaires. Pour cela, il a fallu dédensifier celles de 2023 de $300 \text{ points}/\text{m}^2$ à $5 \text{ points}/\text{m}^2$ comme en 2014. Cela correspond à une importante perte de données. Cependant, une densité de points de $0.5 \text{ points}/\text{m}^2$ est suffisante pour étudier les forêts (Treitz et al., 2012).

Chapitre 5

Conclusion

Pour mieux comprendre le processus de fermeture des trouées, nous avons étudié l'impact de la surface, la forme, la hauteur initiale et divers facteurs topographiques influençant les conditions environnementales. Nos analyses mettent en avant le rôle prépondérant de la surface dans ce processus de fermeture : les petites trouées sont rapidement refermées par les couronnes des arbres adjacents, limitant ainsi la régénération naturelle. Celle-ci prend plutôt place dans les trouées plus grandes, en combinaison avec la stagnation. La topographie impacte aussi le mode de fermeture des trouées. L'altitude favorise la stagnation au détriment des croissances, mais cette étude ne permet pas d'identifier une cause précise à cette relation. Sur les pentes plus fortes, les trouées sont probablement plus petites, ce qui expliquerait le rôle plus important de l'expansion latérale des cimes sur ces pentes. La complexité de la forme est liée à la surface, il n'a donc pas été possible de tirer des conclusions indépendantes pour ce paramètre.

Lors de prochaines études, il serait intéressant de travailler à l'échelle du pixel, pour étudier l'influence de la position au sein de la trouée. Cela permettrait de s'affranchir de la relation entre la surface et la forme en calculant la distance entre un point donné et la canopée adjacente. Cela permettrait aussi de tenir compte des variations de hauteur initiale au sein de la trouée.

Chapitre 6

Contribution personnelle

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre de la thèse d'Arthur Vander Linden. Les données brutes (nuages de points LiDAR) utilisées dans ce mémoire ont été récoltées lors de précédentes études. Le design de l'étude a été créé par Jean-François Bastin, Arthur Vander Linden et moi-même. Je me suis chargée de l'implémentation et de l'analyse des résultats. Le fichier représentant les rivières a été créé par Arthur Vander Linden. Les codes ont été réalisés par l'étudiante, avec l'aide de l'intelligence artificielle (ChatGPT version *GPT-4* et Claude version *Claude Sonnet 4*).

Chapitre 7

Bibliographie

Asefi-Najafabady, S., & Saatchi, S. (2013). Response of African humid tropical forests to recent rainfall anomalies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 368(1625), 20120306. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0306>

Battles, J. J., Dushoff, J. G., & Fahey, T. J. (1996). Line Intersect Sampling of Forest Canopy Gaps. *Forest Science*, 42(2), 131-138. <https://doi.org/10.1093/forestscience/42.2.131>

Becker, P., Rabenold, P. E., Idol, J. R., & Smith, A. P. (1988). Water potential gradients for gaps and slopes in a Panamanian tropical moist forest's dry season. *Journal of Tropical Ecology*, 4(2), 173-184. <https://doi.org/10.1017/S0266467400002674>

Blanchard, E., Birnbaum, P., Ibanez, T., Boutreux, T., Antin, C., Ploton, P., Vincent, G., Pouteau, R., Vandrot, H., Hequet, V., Barbier, N., Droissart, V., Sonké, B., Texier, N., Kamdem, N. G., Zebaze, D., Libalah, M., & Couteron, P. (2016). Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. *Trees*, 30(6), 1953-1968. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1424-3>

Bottero, A., Garbarino, M., Dukic, V., Govedar, Z., Lingua, E., Nagel, T., & Motta, R. (2011). Gap-phase dynamics in the old-growth forest of Lom, Bosnia and Herzegovina. *Silva Fennica*, 45(5). <https://doi.org/10.14214/sf.76>

Brokaw, N. V. L. (1982). The Definition of Treefall Gap and Its Effect on Measures of Forest Dynamics. *Biotropica*, 14(2), 158-160. <https://doi.org/10.2307/2387750>

C, (ed) De Wasseige, J, (ed) Flynn, D, (ed) Louppe, F, (ed) Hiol Hiol, & P, (ed) Mayaux. (2014). Les forêts du bassin du Congo—Etat des forêts 2013. Weyrich. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=574740

C, (ed) De Wasseige, P, (ed) De Marcken, N, (ed) Bayol, F, (ed) Hiol Hiol, P, (ed) Mayaux, B, (ed) Desclée, A, (ed) Billand, & R, (ed) Nasi. (2012). Les forêts du Bassin du Congo : Etat des forêts 2010. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=564102

CIFOR. (2022, septembre 4). Partenariats, renforcement des capacités et entrepreneuriat pour un futur durable dans le paysage de Yangambi. CIFOR-ICRAF. <https://www.cifor-icraf.org/knowledge/publication/7862/>

Cushman, K. c., Detto, M., García, M., & Muller-Landau, H. C. (2022). Soils and topography control natural disturbance rates and thereby forest structure in a lowland tropical landscape. *Ecology Letters*, 25(5), 1126-1138. <https://doi.org/10.1111/ele.13978>

Dalagnol, R., Wagner, F. H., Galvão, L. S., Streher, A. S., Phillips, O. L., Gloor, E., Pugh, T. A. M., Ometto, J. P. H. B., & Aragão, L. E. O. C. (2021). Large-scale variations in the dynamics of Amazon forest canopy gaps from airborne lidar data and opportunities for tree mortality estimates. *Scientific Reports*, 11(1), 1388. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80809-w>

Dalponte, M., & Coomes, D. A. (2016). Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(10), 1236-1245. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12575>

Denslow, J. S. (1980). Gap Partitioning among Tropical Rainforest Trees. *Biotropica*, 12(2), 47-55. <https://doi.org/10.2307/2388156>

Denslow, J. S. (1987). Tropical Rainforest Gaps and Tree Species Diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18, 431-451.

Eba'a Atyi, R., Hiol Hiol, F., Lescuyer, G., Mayaux, P., Defourny, P., Bayol, N., Saracco, F., Pokem, D., Sufo Kankeu, R., & Nasi, R. (2022, mai 20). Les forêts du bassin du Congo : État des Forêts 2021. CIFOR-ICRAF. <https://doi.org/10.17528/cifor/008565>

Favrichon, V., Gourlet-Fleury, S., Bar-Hen, A., & Dessard, H. (1998). Parcelles permanentes de recherche en forêt dense tropicale humide. Eléments pour une méthodologie d'analyse de données (Côte d'Ivoire). CIRAD-Forêt. <https://agritrop.cirad.fr/315472/>

Gardner, T. A., Barlow, J., Chazdon, R., Ewers, R. M., Harvey, C. A., Peres, C. A., & Sodhi, N. S. (2009). Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecology Letters*, 12(6), 561-582. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01294.x>

Gorgens, E. B., Keller, M., Jackson, T., Marra, D. M., Reis, C. R., De Almeida, D. R. A., Coomes, D., & Ometto, J. P. (2023). Out of steady state : Tracking canopy gap dynamics across Brazilian Amazon. *Biotropica*, 55(4), 755-766. <https://doi.org/10.1111/btp.13226>

Goulamoussène, Y., Bedeau, C., Descroix, L., Linguet, L., & Hérault, B. (2017). Environmental control of natural gap size distribution in tropical forests. *Biogeosciences*, 14(2), 353-364. <https://doi.org/10.5194/bg-14-353-2017>

Harry, J., Smith, G., & Bailey, G. R. (1964). Influence of Stocking and Stand Density on Crown Widths of Douglas Fir and Lodgepole Pine. *The Commonwealth Forestry Review*, 43(3 (117)), 243-246.

Hartshorn, G. S. (1978). Tree falls and tropical forest dynamics. *Tropical Trees as Living Systems*. https://www.researchgate.net/publication/304024713_Tree_falls_and_tropical_forest_dynamics

Homeier, J., & Breckle, S.-W. (2008). Gap Dynamics in a Tropical Lower Montane Forest in South Ecuador. In E. Beck, J. Bendix, I. Kottke, F. Makeschin, & R. Mosandl (Éds.), *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador* (p. 311-317). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73526-7_30

Hunter, M. O., Keller, M., Morton, D., Cook, B., Lefsky, M., Ducey, M., Saleska, S., De Oliveira, R. C., & Schiatti, J. (2015). Structural Dynamics of Tropical Moist Forest Gaps. *PLOS ONE*, 10(7), e0132144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132144>

Jucker, T. (2022). Deciphering the fingerprint of disturbance on the three-dimensional structure of the world's forests. *New Phytologist*, 233(2), 612-617. <https://doi.org/10.1111/nph.17729>

Jucker, T., Bongalov, B., Burslem, D. F. R. P., Nilus, R., Dalponte, M., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Qie, L., & Coomes, D. A. (2018). Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes. *Ecology Letters*, 21(7), 989-1000. <https://doi.org/10.1111/ele.12964>

Jucker, T., Hardwick, S. R., Both, S., Elias, D. M. O., Ewers, R. M., Milodowski, D. T., Swinfield, T., & Coomes, D. A. (2018). Canopy structure and topography jointly constrain the microclimate of human-modified tropical landscapes. *Global Change Biology*, 24(11), 5243-5258. <https://doi.org/10.1111/gcb.14415>

Kavali Tondo, T. (2024). Sujet : Caractérisation de la dynamique spatio-temporelle des trouées dans la canopée des forêts naturelles de la Réserve de Biosphère de Yangambi (RD. Congo) à partir des données LiDAR.

Kearsley, E., Moonen, P. C., Hufkens, K., Doetterl, S., Lisingo, J., Boyemba Bosela, F., Boeckx, P., Beekman, H., & Verbeeck, H. (2017). Model performance of tree height-diameter relationships in the central Congo Basin. *Annals of Forest Science*, 74(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0611-0>

Kobe, R. K. (1999). Light Gradient Partitioning Among Tropical Tree Species Through Differential Seedling Mortality and Growth. *Ecology*, 80(1), 187-201. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[0187:LG-PATT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[0187:LG-PATT]2.0.CO;2)

La réserve de biosphère de Yangambi, dans le bassin du Congo, va devenir un pôle de connaissances sur le climat et la biodiversité — UNESCO. (s. d.). Consulté 5 juin 2025, à l'adresse <https://www.unesco.org/fr/articles/la-reserve-de-biosphere-de-yangambi-dans-le-bassin-du-congo-va-devenir-un-pole-de-connaissances-sur>

Larousse, É. (s. d.). Définitions : Topographie - Dictionnaire de français Larousse. Consulté 9 août 2025, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/topographie/78455>

Le bassin du Congo, forêt pluviale menacée — WWF France. (s. d.). Consulté 25 juillet 2025, à l'adresse <https://www.wwf.fr/espaces-prioritaires/bassin-du-congo>

Leclère, L., Latte, N., Candaele, R., Ligot, G., & Lejeune, P. (2024). Estimation of within-gap regeneration height growth in managed temperate deciduous forests using bi-temporal airborne laser scanning data. *Annals of Forest Science*, 81(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01252-9>

Lobo, E., & Dalling, J. W. (2013). Effects of topography, soil type and forest age on the frequency and size distribution of canopy gap disturbances in a tropical forest. *Biogeosciences*, 10(11), 6769-6781. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6769-2013>

Lu, D., Zhu, J., Sun, Y., Hu, L., & Zhang, G. (2015). Gap closure process by lateral extension growth of canopy trees and its effect on woody species regeneration in a temperate secondary forest, Northeast China. *Silva Fennica*, 49(5). <https://www.silvafennica.fi/article/1310/author/3995>

Lu, D., Zhu, J., Wang, X., Hao, G., & Wang, G. G. (2021). A systematic evaluation of gap size and within-gap position effects on seedling regeneration in a temperate secondary forest, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 490, 119140. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119140>

Menanzala Miambam, E., Loubota Panzou, G. J., Bocko, Y. E., & Loumeto, J. J. (2021). Fine-scale altitudinal gradients influence the relationships between structural attributes and aboveground biomass in Central Africa. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(9), 1368-1376. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0019>

Muscolo, A., Bagnato, S., Sidari, M., & Mercurio, R. (2014). A review of the roles of forest canopy gaps. *Journal of Forestry Research*, 25(4), 725-736. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0521-7>

Muth, C. C., & Bazzaz, F. A. (2011). Tree canopy displacement at forest gap edges. *Canadian Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1139/x01-196>

Nagel, T. A., & Svoboda, M. (2008). Gap disturbance regime in an old-growth *Fagus–Abies* forest in the Dinaric Mountains, Bosnia-Herzegovina. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(11), 2728-2737. <https://doi.org/10.1139/X08-110>

Ogden, J., Fordham, R. A., Pilkington, S., & Serra, R. G. (1991). Forest gap formation and closure along an altitudinal gradient in Tongariro National Park, New Zealand. *Journal of Vegetation Science*, 2(2), 165-172. <https://doi.org/10.2307/3235948>

Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44(1), 593-622. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>

Parra, A., & Simard, M. (2023). Evaluation of Tree-Growth Rate in the Laurentides Wildlife Reserve Using GEDI and Airborne-LiDAR Data. *Remote Sensing*, 15(22), 5352. <https://doi.org/10.3390/rs15225352>

Pedersen, B. S., & Howard, J. L. (2004). The influence of canopy gaps on overstory tree and forest growth rates in a mature mixed-age, mixed-species forest. *Forest Ecology and Management*, 196(2), 351-366. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.031>

Petritan, A. M., Nuske, R. S., Petritan, I. C., & Tudose, N. C. (2013). Gap disturbance patterns in an old-growth sessile oak (*Quercus petraea* L.)–European beech (*Fagus sylvatica* L.) forest remnant in the Carpathian Mountains, Romania. *Forest Ecology and Management*, 308, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.045>

Pouteau, R., Picard, J., Doumenge, C., Brncic, T., Gillet, J.-F., Doucet, J.-L., Gourlet-Fleury, S., Kim-pouni, V., Loumeto, J.-J., Pélissier, R., & Réjou-Méchain, M. (2024). The puzzling ecology of African Marantaceae forests. *American Journal of Botany*, 111(4), e16320. <https://doi.org/10.1002/ajb2.16320>

Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Baker, T. R., Phillips, O. L., Patiño, S., Czimczik, C., Hodnett, M. G., Herrera, R., Arneith, A., Lloyd, G., Malhi, Y., Dezeo, N., Luizão, F. J., Santos, A. J. B., Schmerler, J., Arroyo, L., Silveira, M., Priante Filho, N., ... Ramírez, H. (2009). Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-3993-2009>

Qu'est-ce qu'une réserve de biosphère? — UNESCO. (s. d.). Consulté 16 août 2025, à l'adresse <https://www.unesco.org/fr/mab/wnbr/about>

Reis, C. R., Jackson, T. D., Gorgens, E. B., Dalagnol, R., Jucker, T., Nunes, M. H., Ometto, J. P., Aragão, L. E. O. C., Rodriguez, L. C. E., & Coomes, D. A. (2022). Forest disturbance and growth processes are reflected in the geographical distribution of large canopy gaps across the Brazilian Amazon. *Journal of Ecology*, 110(12), 2971-2983. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14003>

Riley, S. J., DeGloria, S. D., & Elliot, R. (1999). A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5(1-4), 23-27.

- Roussel, J.-R., & Auty, D. (2016). *lidR : Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications* (p. 4.2.1) [Jeu de données]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.lidR>
- Runkle, J. (1985). Comparison of Methods for Determining Fraction of Land Area in Treefall Gaps. *Forest Science*, 31(1), 15-19. <https://doi.org/10.1093/forestscience/31.1.15>
- Runkle, J. R. (1982). Patterns of Disturbance in Some Old-Growth Mesic Forests of Eastern North America. *Ecology*, 63(5), 1533-1546. <https://doi.org/10.2307/1938878>
- Runkle, J. R. (1992). Guidelines and Sample Protocol for Sampling Forest Gaps. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Schliemann, S. A., & Bockheim, J. G. (2011). Methods for studying treefall gaps : A review. *Forest Ecology and Management*, 261(7), 1143-1151. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.011>
- Shephard, S., Muhindo, J., Nyumu, J., Mbangale, E., Nziavake, S., Cerutti, P., & van Vliet, N. (2023). Uneven transmission of traditional knowledge and skills in a changing wildmeat system : Yangambi, Democratic Republic of Congo. *Frontiers in Conservation Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fcosc.2023.1278699>
- Slope, Aspect, and Hillshade — GEOG 480 : Exploring Imagery and Elevation Data in GIS Applications. (s. d.). Consulté 16 août 2025, à l'adresse <https://www.e-education.psu.edu/geog480/node/490>
- Smith, J. M. B. (1977). Vegetation and Microclimate of East- and West-Facing Slopes in the Grasslands of MT Wilhelm, Papua New Guinea. *Journal of Ecology*, 65(1), 39-53. <https://doi.org/10.2307/2259061>
- Song, Y., Imanishi, J., Sasaki, T., Ioki, K., & Morimoto, Y. (2016). Estimation of broad-leaved canopy growth in the urban forested area using multi-temporal airborne LiDAR datasets. *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.007>
- Sterck, F. J., & Bongers, F. (2001). Crown development in tropical rain forest trees : Patterns with tree height and light availability. *Journal of Ecology*, 89(1), 1-13. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2001.00525.x>
- The *lidR* package. (s. d.). Consulté 8 août 2025, à l'adresse <https://r-lidar.github.io/lidRbook/>
- Treitz, P., Lim, K., Woods, M., Pitt, D., Nesbitt, D., & Etheridge, D. (2012). LiDAR Sampling Density for Forest Resource Inventories in Ontario, Canada. *Remote Sensing*, 4(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/rs4040830>
- Trimble, G. R., & Tryon, E. H. (1966). Crown Encroachment into Openings Cut in Appalachian Hardwood Stands. *Journal of Forestry*, 64(2), 104-108. <https://doi.org/10.1093/jof/64.2.104>
- Tudose, N. C., Petritan, I. C., Toiu, F. L., Petritan, A.-M., & Marin, M. (2023). Relation between Topography and Gap Characteristics in a Mixed Sessile Oak–Beech Old-Growth Forest. *Forests*, 14(2), 188. <https://doi.org/10.3390/f14020188>
- van Dam, O. van. (2001, mai 14). Forest filled with gaps : Effects of gap size on water and nutrient cycling in tropical rain forest : a study in Guyana [Dissertation]. <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/532>
- Vepakomma, U., St-Onge, B., & Kneeshaw, D. (2011). Response of a boreal forest to canopy opening : Assessing vertical and lateral tree growth with multi-temporal lidar data. *Ecological Applications*, 21(1), 99-121. <https://doi.org/10.1890/09-0896.1>

Werner, F. A., & Homeier, J. (2015). Is tropical montane forest heterogeneity promoted by a resource-driven feedback cycle? Evidence from nutrient relations, herbivory and litter decomposition along a topographical gradient. *Functional Ecology*, 29(3), 430-440. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12351>

What are characteristics of rainforests? (s. d.). WorldRainforests.com. Consulté 12 août 2025, à l'adresse <https://worldrainforests.com/02-what-are-characteristics-of-rainforests.html>

Whitmore, T. C. (1989). Canopy Gaps and the Two Major Groups of Forest Trees. *Ecology*, 70(3), 536-538. <https://doi.org/10.2307/1940195>

Winstanley, P., Dalagnol, R., Mendiratta, S., Braga, D., Galvão, L. S., & Bispo, P. D. C. (2024). Post-Logging Canopy Gap Dynamics and Forest Regeneration Assessed Using Airborne LiDAR Time Series in the Brazilian Amazon with Attribution to Gap Types and Origins. *Remote Sensing*, 16(13), 2319. <https://doi.org/10.3390/rs16132319>

Xu, L., Saatchi, S. S., Shapiro, A., Meyer, V., Ferraz, A., Yang, Y., Bastin, J.-F., Banks, N., Boeckx, P., Verbeeck, H., Lewis, S. L., Muanza, E. T., Bongwele, E., Kayembe, F., Mbenza, D., Kalau, L., Mukendi, F., Ilunga, F., & Ebuta, D. (2017). Spatial Distribution of Carbon Stored in Forests of the Democratic Republic of Congo. *Scientific Reports*, 7(1), 15030. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15050-z>

Zhang, T., Yan, Q., Wang, J., & Zhu, J. (2018). Restoring temperate secondary forests by promoting sprout regeneration : Effects of gap size and within-gap position on the photosynthesis and growth of stump sprouts with contrasting shade tolerance. *Forest Ecology and Management*, 429, 267-277. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.025>

Chapitre 8

Annexes

8.1 Annexe 1 : DTM de la zone d'étude en 2014

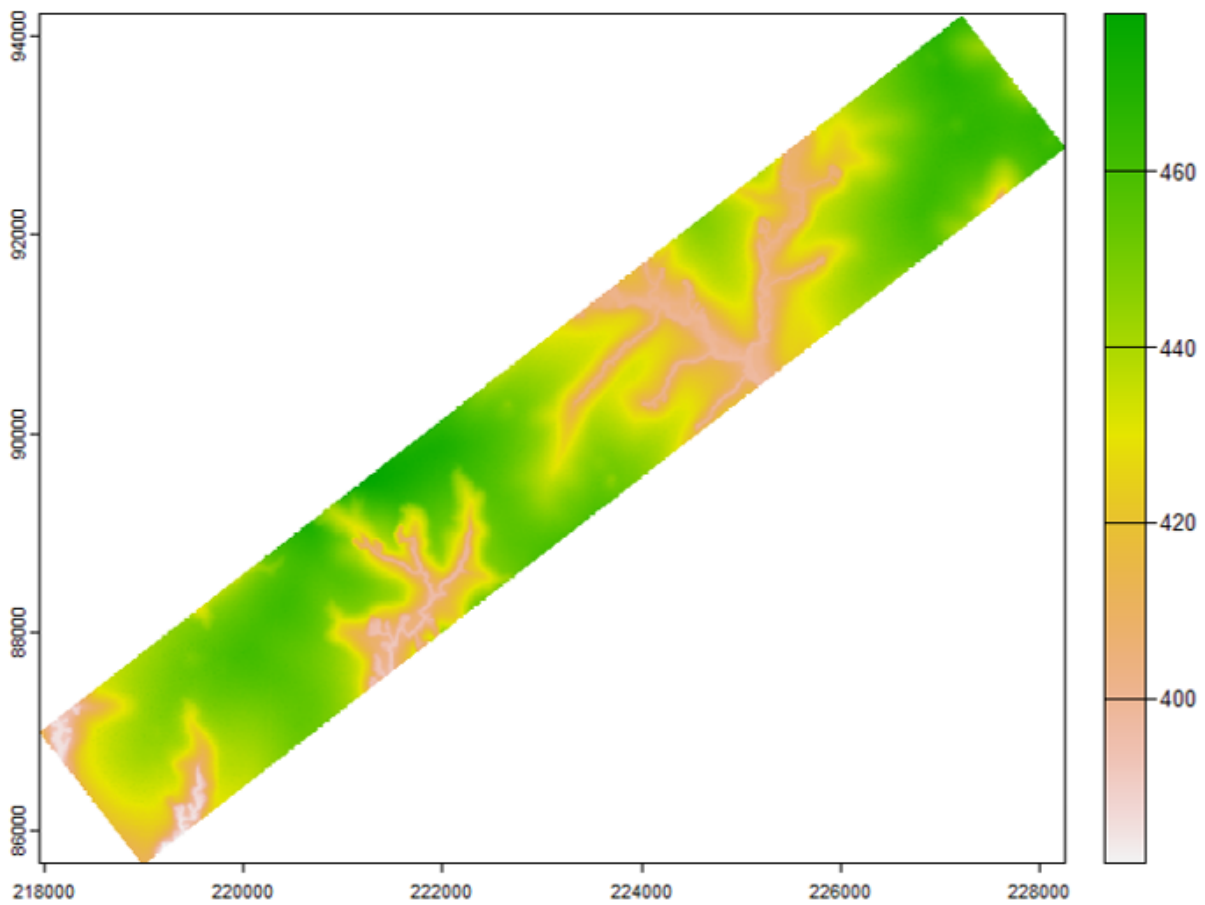


FIGURE 8.1 – *Modèle Numérique de Terrain (DTM) en 2014 (EPSG : 32365).*

8.2 Annexe 2 : CHM de la zone d'étude en 2014

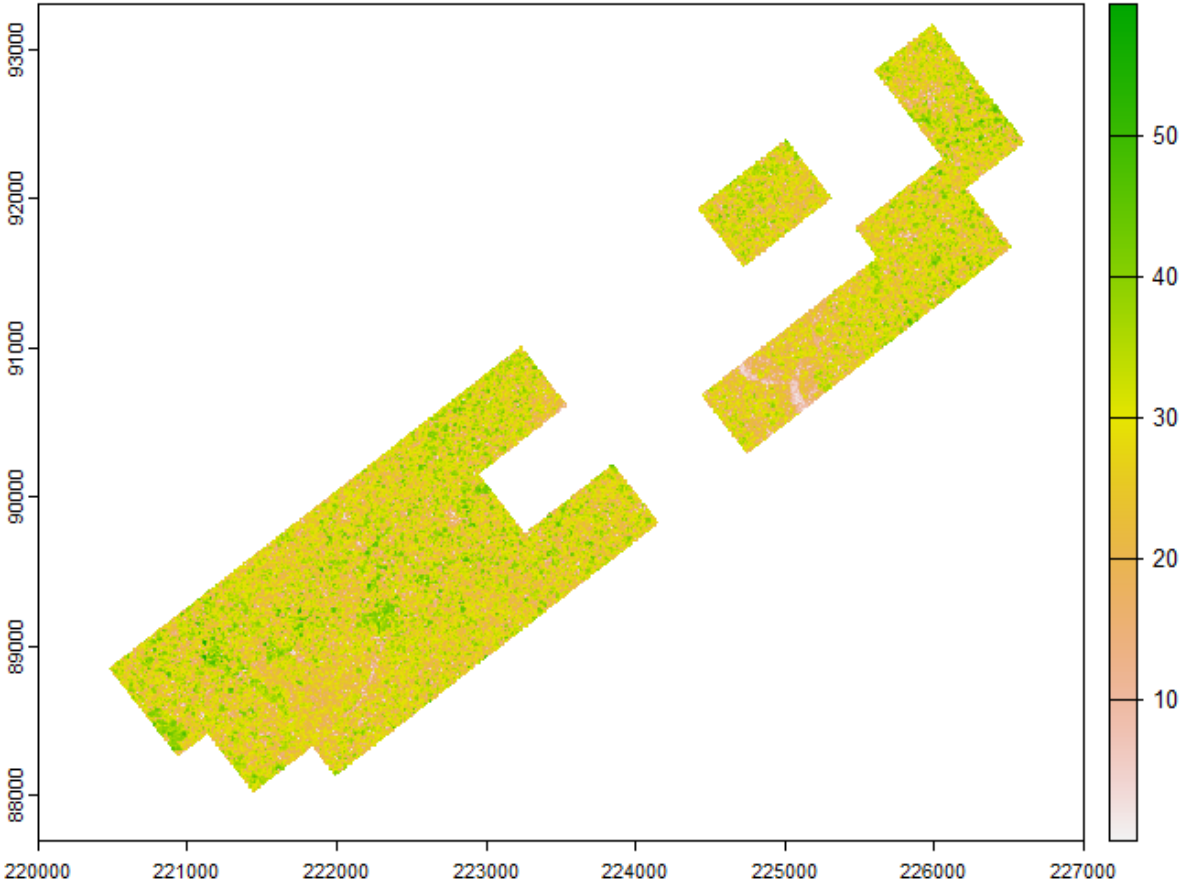


FIGURE 8.2 – *Modèle Numérique de Canopée (CHM) en 2014 (EPSG : 32635).*

8.3 Annexe 3 : CHM de la zone d'étude en 2023

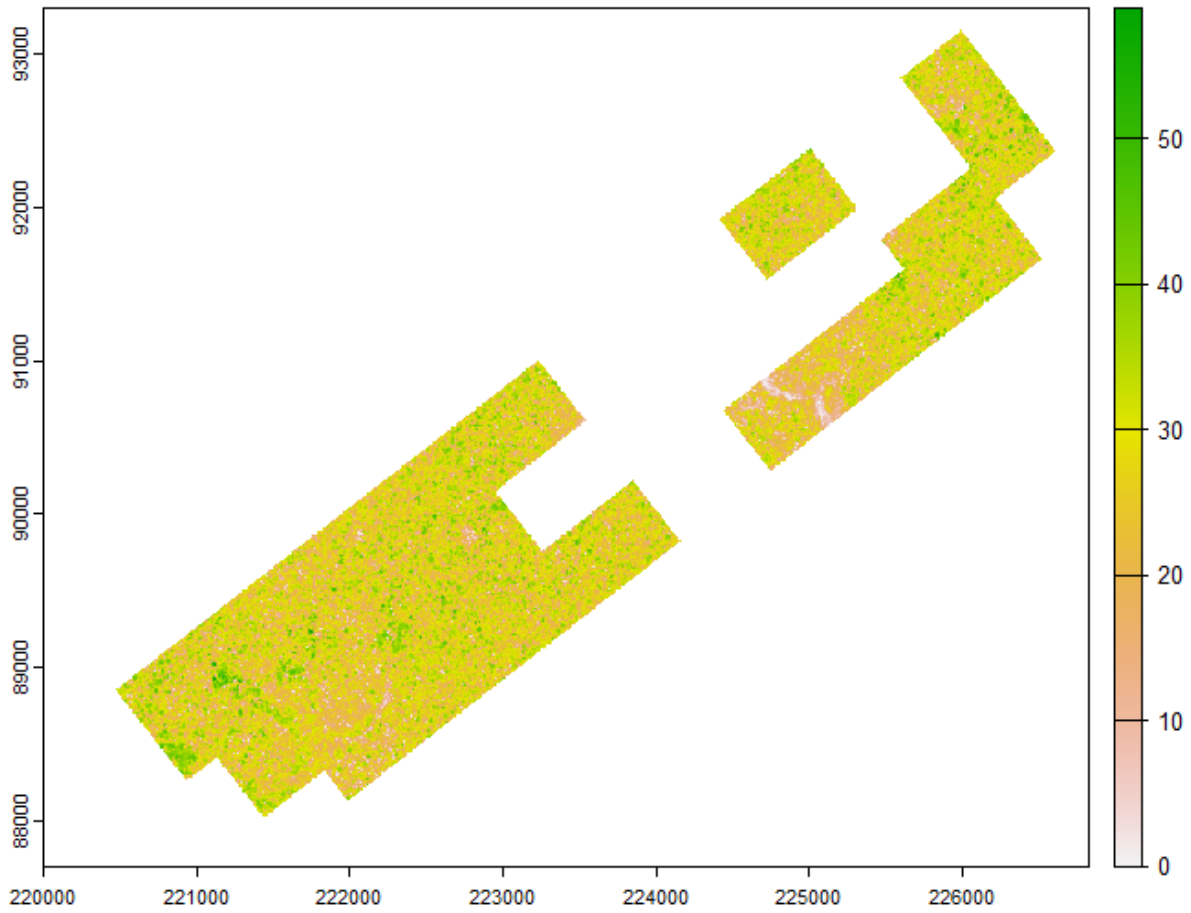


FIGURE 8.3 – *Modèle Numérique de Canopée (CHM) en 2023 (EPSG :32635).*

8.4 Annexe 4 : Distribution des surfaces des trouées inférieures à 200 m^2 en 2014

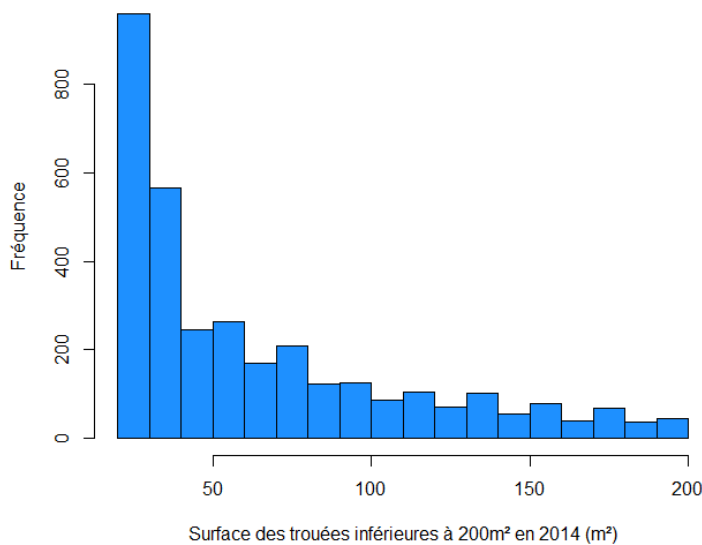


FIGURE 8.4 – Distribution des surfaces des trouées en 2014.

8.5 Annexe 5 : Distribution des surfaces des trouées inférieures à 200 m^2 en 2023

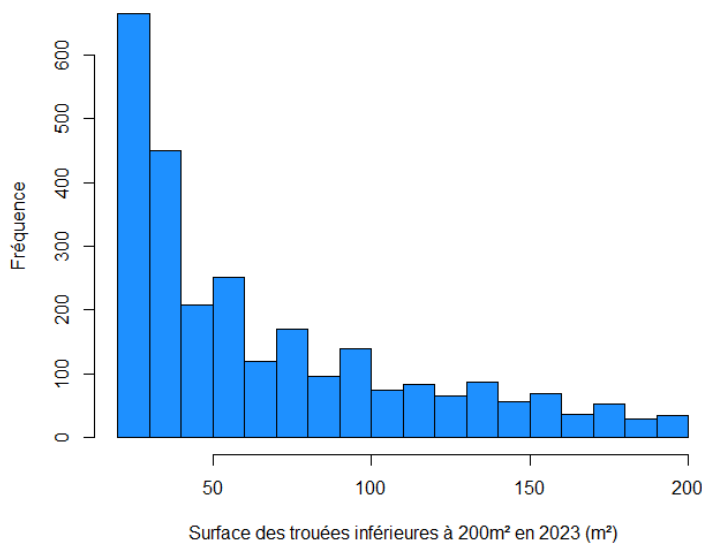


FIGURE 8.5 – Distribution des surfaces des trouées en 2023.