Université de Toulouse

Master 2 Géomatique

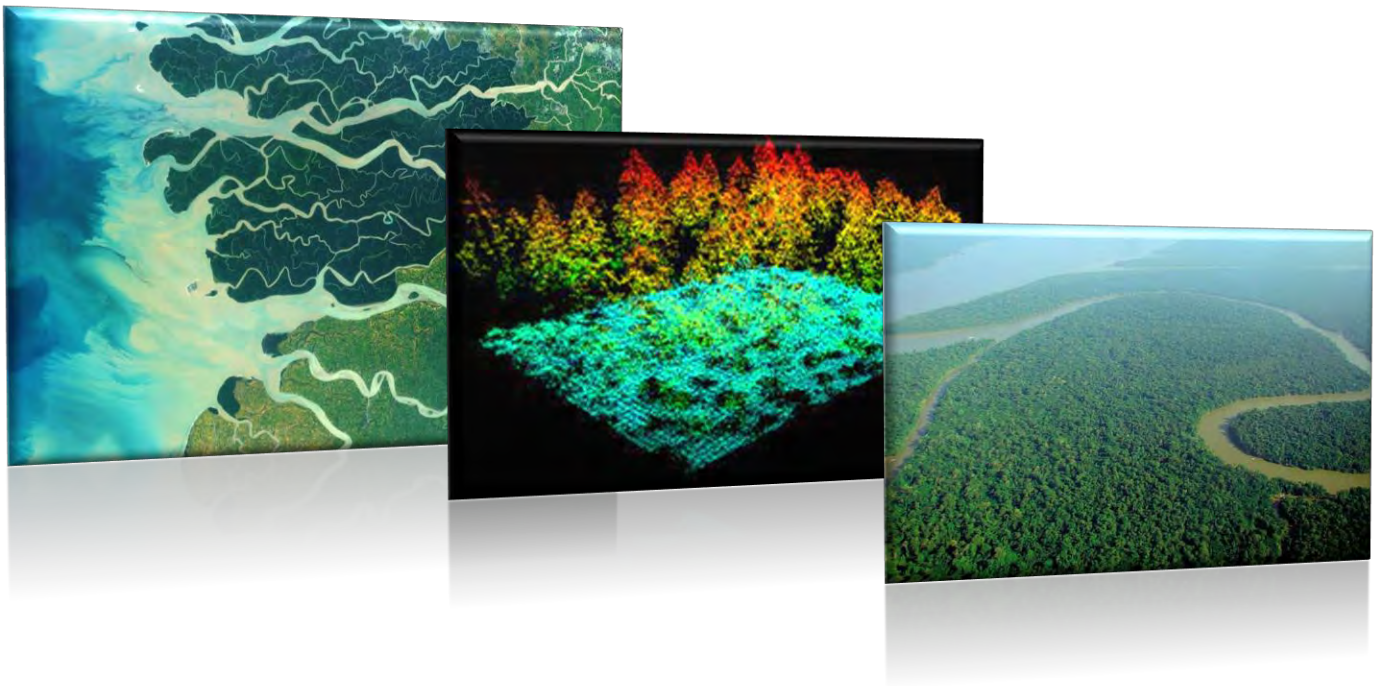
« ScIences Géomatiques en environneMent et Aménagement » (SIGMA)

http://sigma.univ-toulouse.fr

Mémoire de recherche

Vers une procédure universelle pour une typologie cohérente de la forêt

Définir la forêt en prenant en compte le milieu écologique et la structure



Samantha CHANEL

Maîtres de stage : Sylvie GOURLET-FLEURY, Pierre COUTERON, Julie BETDEBER et Guillaume CORNU

Enseignant référent : Marc LANG

Mars/Septembre 2021

cirad
La recherche agronomique pour le développement

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier Sylvie GOURLET-FLEURY, Pierre COUTERON, Julie BETDEBER et Guillaume CORNU pour leur encadrement exemplaire. C'est grâce à leurs conseils, à leur aide et au suivi régulier qu'ils ont tenus durant toute la période de stage que j'ai pu effectuer mon travail et ceci malgré les conditions de télétravail et la période estivale. Je remercie particulièrement Sylvie GOURLET-FLEURY pour m'avoir permis de participer au Colloque « Zéro déforestation importée » organisé par le GIP Ecofor le 5 juillet 2021 à Montpellier.

Je remercie l'équipe de l'unité Forêts et Sociétés du Cirad pour leur appui et leur bonne compagnie. Je remercie Marie-Jo Darcq pour son l'accueil au sein de l'unité et son accompagnement administratif. Je remercie Lilian BLANC, Camille PIPONIOT-LAROCHE et Fabrice BENEDET pour m'avoir fourni des informations et un soutien technique qui m'ont permis d'avancer dans mon travail.

Je remercie mon enseignant référent Marc LANG pour avoir veillé au bon déroulement du stage et pour son suivi régulier.

Je remercie toute l'équipe pédagogique de SIGMA pour leur enseignement de qualité qui m'a permis d'acquérir les compétences nécessaires à mon stage et qui, par la suite, seront un atout pour le monde professionnel.

RESUME

La France s'est engagée (Déclaration d'Amsterdam 2015) à ne plus importer de matières premières qui contribuent à la déforestation, notamment dans les pays tropicaux, d'ici 2030. Pour lutter contre la déforestation, il faut délimiter les zones forestières donc identifier la forêt. Il existe plusieurs définitions de la forêt mais les plus utilisées sont celles fournies par la FAO et la CCNUCC, qui proposent une définition universelle de la forêt. Leurs définitions se basent sur des variables de structure forestière et des critères de surface minimale. La structure des forêts dépend du milieu écologique dans lequel elles se situent. On peut donc remettre en question une définition de la forêt qui ne prenne pas en compte le milieu écologique, qui peut être très variable à l'échelle d'un pays. Il est donc nécessaire de définir une procédure cohérente pour prendre en compte le milieu écologique dans les seuils de variables structurelles forestières sous-tendant la définition de la forêt. Dans cette étude j'ai travaillé sur une première démarche qui consiste à cartographier des typologies structurelles forestières (TSF) à l'intérieur des écozones de la FAO. Ceci en regroupant des typologies phytogéographiques nationales (TPN) et les écorégions du WWF en fonction de la structure des forêts dans deux pays, le Cameroun et le Brésil. Le regroupement s'est effectué à partir de deux variables de structure, le couvert végétal et la hauteur de la canopée, accessibles mondialement en ligne et dérivées des outils de télédétection.

ABSTRACT

France has committed (Amsterdam declaration 2015) to no longer import raw materials that that contribute the deforestation, particulary in tropical countries, by 2030. For fighting deforestation, it's necessary to delineate the forested area and therefore to identify the forest. There are several definitions of forest but the most used are those provided by the FAO and the CCNUCC, which propose a universal definition of forest. Their definitions are based on forest structure variables and minimum area criteria. The structure of forests depends on the ecological environment in which they are located. A definition of forest that does not take into account the ecological environment, which can be variable at the scale of a country, can therefore be questioned. It's necessary to define a consistent approach to take into account the ecological environment in the thresholds of forest structural variables underlying the definition of the forest. In this study, I worked on a first approach that consists in mapping forests structural typologies (FST) within the FAO global ecological zones. This was done by grouping national phytogeographic typologies and WWF ecoregions according to the structure of forests in two countries, Cameroon and Brazil. The clustering was based on two structure variables, tree covert and canopy height, which are globally accessible available online and derived from remote sensing tools.

Table des matières

LEXIQUE 1
1 INTRODUCTION 2
1.1 La structure d'accueil 2
1.2 Organigramme 2
1.3 Contexte de l'étude 4
1.4 Les forêts et le milieu écologique 5
1.5 Objectif et hypothèses 6
2. MATERIEL ET METHODE 7
2.1 Zone d'étude 7
2.2 Données 9
2.2.1 Structure de la forêt 9
2.2.2 Zones écologiques 13
2.2.3 Zones naturelles peu perturbées 23
2.2.4 Zones naturelles dégradées 23
2.3 Score d'inclusion 24
2.4 Etapes du processus de traitement 28
3 RESULTATS 31
3.1 Récupération des valeurs de couvert végétal et de hauteur de la canopée 31
3.1.1 Les zones protégées du Cameroun et du Brésil 31
3.1.2 Les forêts communautaires du Cameroun 32
3.1.3 Les zones forestières autour des villes (ZFV) 33
3.2 Score d'inclusion des TPN et des écorégions du WWF par rapport aux écozones de la FAO 33
3.3 Création des cartes de typologie structurelle forestière (TSF) 35
3.3.1 Les TSF du Cameroun 35
3.3.2 Les TSF du Brésil 37
3.4 Score d'inclusion des TSF par rapport aux écozones de la FAO 39
Valeurs du couvert végétal et de la hauteur de la canopée des TSF issues des TPN 40
3.5.1 Les TSF du Cameroun 40
3.5.2 Les TFS du Brésil 42
3.5.3 Comparaison entre les TSF du Cameroun et les TSF du Brésil 45
3.6 Différences observées entre les zones dégradées et les zones peu perturbées 46
3.6.1 Les forêts communautaires 46
3.6.2 Les zones forestières autour des villes (ZFV 48

4 DISCUSSION 50
4.1 Les zones écologiques permettent de cartographier la structure des forêts à l'échelle d'un pays 51
4.2 La fiabilité des cartes de typologie structurelle forestière (TSF) pour mettre en évidence des catégories structurelles forestières 52
4.3 Les typologies structurelles forestières ont permis de mettre en évidence la différence structurelle des types forestiers entre le Cameroun et le Brésil 53
4.4 Les forêts communautaires et les zones forestières autour des villes (ZFV) peuvent-elles identifier les zones dégradées ? 53
4.5 Les limites des données raster issues des outils de télédétection 54
4.6 Les difficultés rencontrées lors du processus de traitement 54
CONCLUSION 55
BIBLIOGRAPHIE 56
ANNEXES 59
Listes des annexes 59
Annexe 1 : Carte phytogéographique de R.Letouzey 1959 60
Annexe 2 : Carte phytogéographique de R.Letouzey 1985 61
Annexe 3 : Carte phytogéographique du Brésil (IBGE, 2004) 62
Annexe 4 : Ecorégions du WWF au Cameroun 63
Annexe 5 : Ecorégions du WWF au Brésil 64
Annexe 6 : Score d'inclusion. Script du processus 65
Annexe 7 : Résultats CAH et K-means des typologies phytogéographiques nationales au Cameroun 70
Annexe 8 : Résultats CAH et K-means des écorégions du WWF au Cameroun 72
Annexe 9 : Résultats CAH et K-means des typologies structurelles nationales au Brésil 74
Annexe 10 : Résultats CAH et K-means des écorégions du WWF au Brésil 76
Annexe 11: Résultats du test de comparaison multiple avec correction de Bonferroni pour les TSF .. 79
Annexe 12 : Test de comparaison entre les zones protégées et les forêts communautaires au Cameroun 85
Annexe 13 : Test de comparaison multiple entre les distances des zones forestières autours des villes 86
Annexe 14 : Test de comparaison de moyenne entre les zones protégées et les zones forestières de 15 à 20 km de la bordure des villes au Cameroun 90
Annexe 15 : Moyennes de pourcentage de couvert végétal et de hauteur de la canopée en mètres, des TSF issues des TPN au Cameroun. Intervalle de confiance calculée sur la variance des moyennes. 91
Annexe 16 : Moyennes de pourcentage de couvert végétal et de hauteur de la canopée en mètres, des TSF issues des TPN au Brésil. Intervalle de confiance calculée sur la variance des moyennes. 92

Annexe 17 : Moyennes du pourcentage du couvert végétal et de la hauteur de la canopée en mètres, des zones protégées et forêts communautaires des TSF issues des TPN au Cameroun. Intervalle de confiance calculée sur la variance des moyennes..... 93

Annexe 18 : Moyennes du pourcentage du couvert végétal et de la hauteur de la canopée en mètres, des zones protégées, forêts communautaires et des ZFV des TSF issues des TPN au Cameroun. Intervalle de confiance calculée sur la variance des moyennes 94

Annexe 19 : Carte de la typologie structurelle forestière du Cameroun. Issue des typologies phytogéographiques nationales..... 95

Annexe 20 : Carte de la typologie structurelle forestière du Brésil. Issue des typologies phytogéographiques nationales..... 96

LEXIQUE

Ecorégions du WWF : zones biogéographiques qui représentent la biodiversité (D. M. Olson et al., 2001).

Ecozones de la FAO : zones écologiques qui désignent les formations forestières principales en fonction du macroclimat. Par exemple les forêts tropicales humides du macroclimat tropical humide (FAO, 2001).

Forêt : grande étendue de terrain couverte d'arbres (def Larousse).

Milieu écologique : représente les caractéristiques de l'environnement (climat, substrats, végétation, etc).

Structure des forêts, structure ou variables de structure : le couvert végétal et la hauteur de la canopée.

Type de végétation : constitue la végétation principale. Par exemple les forêts saisonnières sempervirentes.

Typologie phytogéographique nationale (TPN) : ensemble des types de végétation décrits à l'échelle d'un pays. Par exemple les forêts saisonnières sempervirentes et les savanes sahéliennes.

Typologie Structurelle Forestière (TSF) : ensemble de types de forêts similaires en terme de structure (couvert végétal et hauteur de la canopée).

Zone écologique : zone qui représente un facteur environnemental. Par exemple le macroclimat.

1 INTRODUCTION

1.1 La structure d'accueil

L'intégralité du stage s'est effectué au CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) dans une unité de recherche située au campus international de Baillarguet à Montpellier. Le CIRAD est une institution de recherche essentiellement orientée vers l'agriculture et agissant dans les pays tropicaux et les régions méditerranéennes. Cette institution s'est fondée en 1984 suite à la fusion de plusieurs organisations agricoles et forestières en milieu tropical. Aujourd'hui le CIRAD emploie environ 1650 personnes dont 800 chercheurs et chercheuses. Il est composé de 29 unités de recherches distribuées dans trois départements :

1. BIOS (Systèmes biologiques) : département scientifique orienté sur le vivant.
2. Persyst (Performances des systèmes de production et de transformation tropicaux) : département scientifique orienté vers la production agricole en milieu tropical.
3. ES (Environnements et Sociétés) : département scientifique orienté vers les relations entre l'agriculture, l'environnement et les sociétés humaines.

Ce stage s'est déroulé au sein de l'unité Forêts et Sociétés du département ES. Cette unité de recherche a pour objectif de préserver les forêts tropicales tout en optimisant leur exploitation que ce soit pour la gestion des ressources naturelles ou l'agroforesterie au profit des sociétés humaines. L'encadrement a été réalisé par Sylvie GOURLET-FLEURY, chercheuse dans l'unité Forêts et Sociétés, Pierre COUTERON, directeur de recherche à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), Julie BETDEBER et Guillaume CORNU, chercheuse et informaticien dans l'unité Forêts et Sociétés. Le stage s'est déroulé sur une période d'environ 6 mois (15 mars au 12 septembre).

1.2 Organigramme

Le stage s'est déroulé en quatre parties. J'ai commencé par de la recherche bibliographique, puis suite à une phase exploratoire, j'ai mis en place et lancé les traitements puis j'ai analysé les résultats. Ensuite j'ai dédié un temps à la rédaction du rapport (fig 1). Durant toute la période de stage, au moins une réunion hebdomadaire a été tenue avec les encadrants pour une mise au point de l'avancée du travail.

Quelques dates particulières à noter :

- 10 avril : présentation du sujet de stage à l'unité.
- 5 juillet : présentation des premiers résultats obtenus durant le Colloque « Zéro déforestation importée » organisé par le GIP Ecofor le 5 juillet 2021 à Montpellier.
- 20 août : finalisation du rapport de stage
- 9 septembre : soutenance de stage.

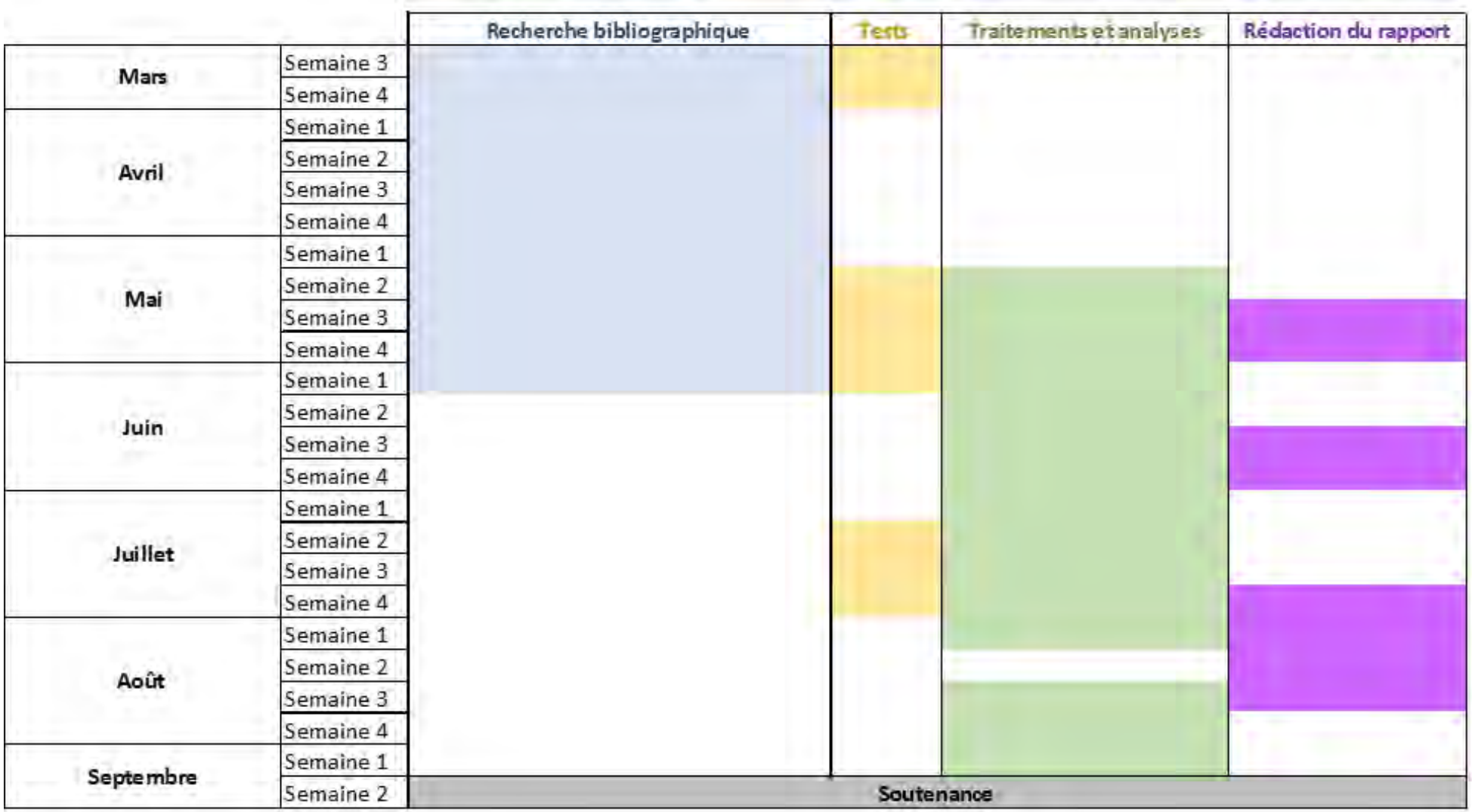


Figure 1 *Organigramme du stage. Diagramme de Gantt*

1.3 Contexte de l'étude

Les écosystèmes forestiers sont d'une importance capitale pour le maintien des conditions à la fois environnementales, sociales et économiques. Ils détiennent 75% de la biodiversité terrestre dans le monde et ils contribuent à l'atténuation du changement climatique en absorbant le dioxyde de carbone. D'un point de vue social et économique ils constituent une ressource nécessaire à la subsistance des populations humaines. En 2016, on compte environ 1,6 milliard d'individus qui dépendent directement des forêts pour subvenir à leurs besoins (FAO, 2016). Les forêts contribuent également au maintien et à la protection des sols ainsi qu'à la fourniture en eau douce. Ces écosystèmes sont fortement menacés par le système économique actuel qui pousse à une exploitation sévère des forêts pouvant mener à leur disparition, autrement dit, à la déforestation(SNDI, 2018).

La FAO (Food and Agriculture Organization) estime qu'environ 420 millions d'hectares de forêts ont disparu depuis 1990. Même si durant ces trois dernières décennies il y a eu un ralentissement du taux de déforestation, le rythme de celui-ci reste préoccupant. Le développement de l'agriculture et de l'élevage est actuellement le facteur principal de la déforestation dans le monde. Il s'agit en particulier de la culture du palmier à huile, de la culture du soja et de l'élevage de bovins. En milieu tropical, l'agriculture contribue à 40% de la déforestation(FAO, 2020).

Pour lutter contre la perte des forêts des mesures ont été prises à l'échelle internationale depuis 1992 lors de la déclaration de Rio où plusieurs acteurs se sont mobilisés pour la préservation des forêts. Suite à la déclaration de New York en 2014, un engagement a été pris pour lutter contre la déforestation causée par l'agriculture. C'est en 2015 avec la déclaration d'Amsterdam que plusieurs pays, dont la France, se sont engagés à ne plus importer de produits issus d'activités contribuant à la déforestation. Afin de respecter ses engagements la France a mis en place la Stratégie Nationale de lutte contre la Déforestation Importée (SNDI) pour la période 2018-2030. Le terme de déforestation importée fait référence à la matière première importée depuis des pays étrangers dont la production favorise la déforestation. Pour lutter contre ce phénomène il est nécessaire d'identifier les zones où il y a de la déforestation afin d'éviter la demande d'importation de matières premières. Pour cela il faut dans un premier temps identifier les forêts. Pour pouvoir les identifier il est nécessaire de les définir (SNDI, 2018).

Il existe une multitude de définitions de la forêt. Presque chaque pays et chaque organisation liée aux forêts possèdent sa propre définition(Lund, 1999). Ces définitions varient en fonction de l'aspect administratif, de l'usage du sol et de la structure des formations forestières basée sur la composition végétale (Helms et al, 2002). Actuellement, les définitions les plus utilisées pour définir la forêt ou comme base de définition de la forêt sont celles fournies par la FAO et la CCNUCC (Convention Cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques). Ces deux définitions utilisent des valeurs de variable minimales de structure pour définir la forêt, c'est-à-dire, le pourcentage de couvert végétal, la hauteur de la canopée, la surface occupée et la largeur de cette surface. La différence entre ces deux définitions est que la FAO a attribué des

valeurs minimales uniques aux variables qui définissent la forêt alors que la CCNUCC utilise un intervalle de valeurs (Eba'a Atyi et al, 2021):

- « Terres occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 mètres et un couvert arboré de plus de 10 pour cent, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ*. Sont exclues les terres à vocation agricole ou urbaine prédominante » (FAO, 2010)
- « Une forêt est une surface minimale de 0,05 à 1 hectare avec un couvert arboré (ou un niveau de peuplement équivalent) de plus de 10 à 30 pour cent d'arbres ayant le potentiel d'atteindre une hauteur minimale de 2 à 5 mètres à maturité *in situ*. » (UNFCCC, 2002)

Face à la diversité des définitions existantes, il est compliqué d'établir une évaluation juste de la déforestation à l'échelle internationale. Afin de pouvoir être identifiées de façon homogène, les forêts doivent être décrites partout selon les mêmes règles.

1.4 Les forêts et le milieu écologique

Depuis 1946 la FAO a effectué régulièrement des évaluations des milieux forestiers dans le monde afin de maintenir à jour sa description des forêts et leur évolution (FAO, 2020). Cependant une étude technique rapportée par le consortium CIFOR-CIRAD-IDDRI a affirmé qu'une définition unique des forêts pouvait avoir des limites (Eba'a Atyi et al, 2021). Lors d'une étude sur la définition des forêts et leur dégradation selon l'approche HCS (High Carbon Stock), il a été montré que les valeurs des variables qui caractérisent la structure des forêts varient au sein d'un même pays (Ahoutou, 2021). Cela est dû au fait que la structure des forêts dépend du milieu écologique dans lequel elles se situent (FAO, 2012). On peut donc remettre en question l'existence d'une définition basée sur des valeurs uniques des variables de structure des forêts tant à l'échelle internationale qu'à l'échelle nationale car ce type de définition ne prend pas en compte la variabilité des conditions écologiques.

Bien que la FAO ait défini des zones écologiques, nommées écozones, dans l'objectif de classer les grands types de formations forestières dans le monde, elle ne considère pas le milieu écologique dans sa définition de la forêt. Les écozones de la FAO sont construites à partir de critères climatiques, topologiques et floristiques. Elles représentent une formation végétale homogène en fonction d'un type de climat donné, comme par exemple la zone tropicale humide. Ces zones ne mettent pas en évidence les variabilités que l'on peut retrouver au sein même des forêts (FAO, 2001). Il existe donc une hétérogénéité importante de la structure des forêts au sein même des écozones de la FAO, en particulier entre les continents (Ahoutou, 2021). Cela signifie que les valeurs des variables structurelles, comme les valeurs moyennes du couvert végétal et de la hauteur de la canopée, qui servent à décrire la forêt ne peuvent pas être appliquées pour une même écozone.

Pour mettre en évidence la variabilité structurelle des forêts, il est nécessaire d'avoir accès à des données spatialisées des forêts du territoire qui serviront de référence. Pour ces données il existe des cartes de végétation. Ces cartes doivent impérativement être construites avec des données issues d'inventaires ou de reconnaissances directement effectués sur le terrain afin de pouvoir refléter au mieux la réalité. Les cartes de végétations réalisées uniquement à partir d'images satellites ne peuvent pas fournir des informations précises sur la composition forestière. Cela est dû au fait qu'elles sont réalisées à partir d'un indice de végétation, tel que le NDVI (Normalized Difference Vegetation) qui se base sur la capacité de la végétation à réfléchir les ondes proches infrarouge.

Les cartes de typologies phytogéographiques nationales (TPN) ne sont pas disponibles pour tous les pays. En cas d'absence de celles-ci, il est nécessaire de se retourner vers des informations pouvant renseigner sur la distribution géographique des différentes formations forestières à l'échelle nationale. A l'échelle globale, la plupart des classifications écologiques ne se basent que sur des caractéristiques climatiques et le type de végétation à l'images des écozones de la FAO. Parmi les plus connues on peut citer les zones biogéographiques d'Udvardy, 1975 qui renseignent sur les macro écosystèmes et les écorégions par continents de Bailey, 1998 qui renseignent sur les biomes par continents (Duffey, 1993). Il existe cependant une classification plus précise qui prend en compte l'histoire évolutive du milieu et la faune, en plus du climat et de la végétation. Il s'agit des écorégions du WWF (World Wild Fund for nature) définies par D.Olson et E.Dinerstein (Olson et al, 2001) Cette classification a été construite dans le but d'améliorer les stratégies de conservation de la biodiversité. En plus des données biophysiques et de végétation, des données sur les caractéristiques de la faune, sur la biodiversité et les phénomènes évolutifs ont été rajoutées. C'est grâce à ces principes que les écorégions du WWF offrent une classification du milieu écologique beaucoup plus précise en comparaison de la plupart des autres classifications qui se basent essentiellement sur les paramètres physiques du milieu et la végétation (Olson & Dinerstein, 1998). Cependant du fait de la complexité de ces écorégions, il est possible que des forêts présentant une structure et une composition floristique similaires soient néanmoins classées dans des écorégions différentes.

1.5 Objectif et hypothèses

Comme cité précédemment, la variabilité écologique remet en cause l'existence d'une seule définition de la forêt constituée par des variables qui caractérisent la forêt avec des valeurs fixes. L'idée serait de proposer un protocole permettant d'aboutir à la définition de la forêt en prenant en compte le milieu écologique. Dans le cadre de ce stage, j'ai testé une première démarche qui consiste à définir la forêt en prenant en compte le milieu écologique et la structure des forêts. L'objectif de ce travail est d'aboutir à une carte de typologie structurelle forestière (TSF) qui représente les formations forestières en fonction du milieu écologique et de la structure des forêts à l'échelle d'un pays. A partir de cette carte j'ai vérifié s'il est possible de définir des valeurs seuils de structures en comparant des forêts identifiées comme peu

perturbées et des forêts identifiées comme dégradées avec la méthode que j'ai développé sous l'encadrement de mes maîtres de stage.

La vérification des hypothèses suivantes a permis de tester (i) s'il est possible de s'appuyer sur les TPN, les écozones de la FAO et les écorégions du WWF pour rassembler les forêts en fonction de la structure (ii) s'il est possible de détecter la dégradation des zones forestières :

- H1 : Les TPN reflètent la diversité structurelle des forêts au sein des écozones FAO.
- H2 : Les écorégions du WWF peuvent remplacer les TPN.
- H3 : Il est possible de rassembler les forêts selon leur structure en se basant sur le milieu écologique.
- H4 : Il est possible de discerner les forêts peu perturbées et les forêts dégradées en se basant sur la structure.

Cette étude a nécessité non seulement une bonne maîtrise des outils de géomatique mais également des connaissances en écologie forestière. Ma double formation en géomatique et en écologie m'a permis de développer une méthode adéquate, avec les données et les outils à disposition, pour pouvoir vérifier les hypothèses et discuter les résultats obtenus.

2. MATERIEL ET METHODE

La méthode que j'ai employé dans cette étude a pour objectif de :

1. Produire une carte de typologie structurelle forestière (TSF). Les TSF représentent les formations forestières ayant des structures similaires.
2. Vérifier si les TSF produites sont, d'un point de vue écologique, correctes.
3. Etablir une valeur seuil de couvert végétal et de hauteur de la canopée pour chacune des TSF obtenues.

2.1 Zone d'étude

La zone d'étude se situe en milieu tropical où la diversité des forêts est la plus élevée. Il était prévu initialement que les tests soient effectués sur 12 pays tropicaux différents répartis sur l'ensemble des continents. Cependant, dû à la complexité des analyses et à la période de temps à disposition, les tests n'ont été effectués que sur 2 pays : le Cameroun et le Brésil. Ces pays serviront de référence méthodologique pour les futurs pays à tester ultérieurement dans une autre étude.

Le Cameroun et le Brésil ont été choisis car tous deux possèdent une grande hétérogénéité forestière structurée par plusieurs climats tropicaux différents. Ils se situent également sur des continents différents, ce qui permet de prendre en compte un plus grand nombre de forêts et ainsi d'optimiser les tests et les analyses. La végétation et généralement les écosystèmes sont bien documentés, notamment par d'importantes données issues du terrain pour la végétation. Pour le Cameroun il existe des cartes phytogéographiques construites à partir de données directement issues du terrain. Pour le Brésil il existe des données

géographiques sur la végétation issues d'inventaires de terrain et des outils de la télédétection. Ces cartes seront présentées plus en détail dans la partie 2.2.2.3.

2.2 Données

2.2.1 Structure de la forêt

Les variables de couvert végétal et de hauteur de la canopée ont été extraites de produits de type raster dérivés des outils de télédétection. Ces données couvrent la totalité de la surface terrestre et elles sont divisées en plusieurs tuiles.

2.2.1.1 Le couvert végétal

Les données rasters sur le couvert végétal proviennent de Hansen et de ses co-auteurs, et sont accessibles sur le lien suivant : https://storage.googleapis.com/earthenginepartners-hansen/GFC-2020-v1.8/download.html. Le raster est d'une résolution de 30m et il exprime le couvert végétal en pourcentage avec des données datant de 2000. Le Global Forest Watch propose quant à lui des données sur le couvert végétal datant de 2010. Ces dernières n'ont pas été prises en compte car elles représentent les gains et les pertes de couvert végétal issues des données de 2000 et ne constituent pas une mise à jours globale des données.

Hansen et se co-auteurs ont estimé le pourcentage de couvert végétal à partir d'images satellites issues de données optiques Landsat à 57 m de résolution. En région tropicale les images satellites optiques peuvent avoir des altérations à cause de phénomènes atmosphériques liés aux nuages et aux aérosols et ainsi générer des erreurs lors de l'estimation du pourcentage du couvert végétal. Afin de réduire ces erreurs, les données Landsat ont été combinées avec des images de moyenne résolution issues de données optiques MODIS à 250 m de résolution. Les données MODIS ont une fréquence temporelle plus élevée que les données Landsat. Cela permet d'avoir de l'information supplémentaire pour combler les informations manquantes sur les données Landsat à cause des altérations sur les images. Les données MODIS ont permis de faire un masque forêt/non forêt qui a été appliqué sur une série temporelle de données Landsat par l'intermédiaire d'une classification en arborescence. Le seuil de couvert végétal utilisé pour définir le masque forêt est de 60%. Les pixels ayant un taux de couvert végétal inférieur à 60% sont donc classés non-forêt. Ce masque a permis de rééchantillonner les données Landsat et ainsi de réduire au maximum les erreurs causées par les altérations sur les images. La valeur seuil de 60% a été définie par l'intermédiaire d'un modèle de classification sur une série temporelle de données MODIS à partir d'un indice de végétation, le NDVI (fig 2)(Hansen et al, 2008). Dans le cadre du stage, nous travaillons avec des forêts ayant naturellement un couvert végétal inférieur à 60%. Par exemple les savanes où le couvert végétal se situe autour des 40%. Cela pourrait engendrer des erreurs de classification où des pixels pouvant représenter une forêt seront classés en non-forêt. Ce détail est à prendre en considération car il se peut qu'il y ait des estimations de couvert végétal erronées pour les forêts ayant naturellement un couvert végétal inférieur à 60%

Les auteurs reprendront la même technique ; présentée précédemment, pour étudier les cas de déforestation dans le monde. Ils ont effectué une carte globale des pertes et des gains du couvert végétal entre les années 2000 et 2012 (Hansen et al, 2013).

Ces données présentent l'inconvénient d'avoir été construites à partir d'une méthode qui mesure un indice de végétation, le NDVI, qui reflète l'activité photosynthétique de la végétation. La mesure du couvert végétal ne fait donc pas de distinction entre la canopée et le reste de la végétation en-dessous de la canopée (Hansen et al, 2008). Pour pouvoir détecter la présence d'arbres il faut combiner ces données avec celles de la hauteur de la canopée.

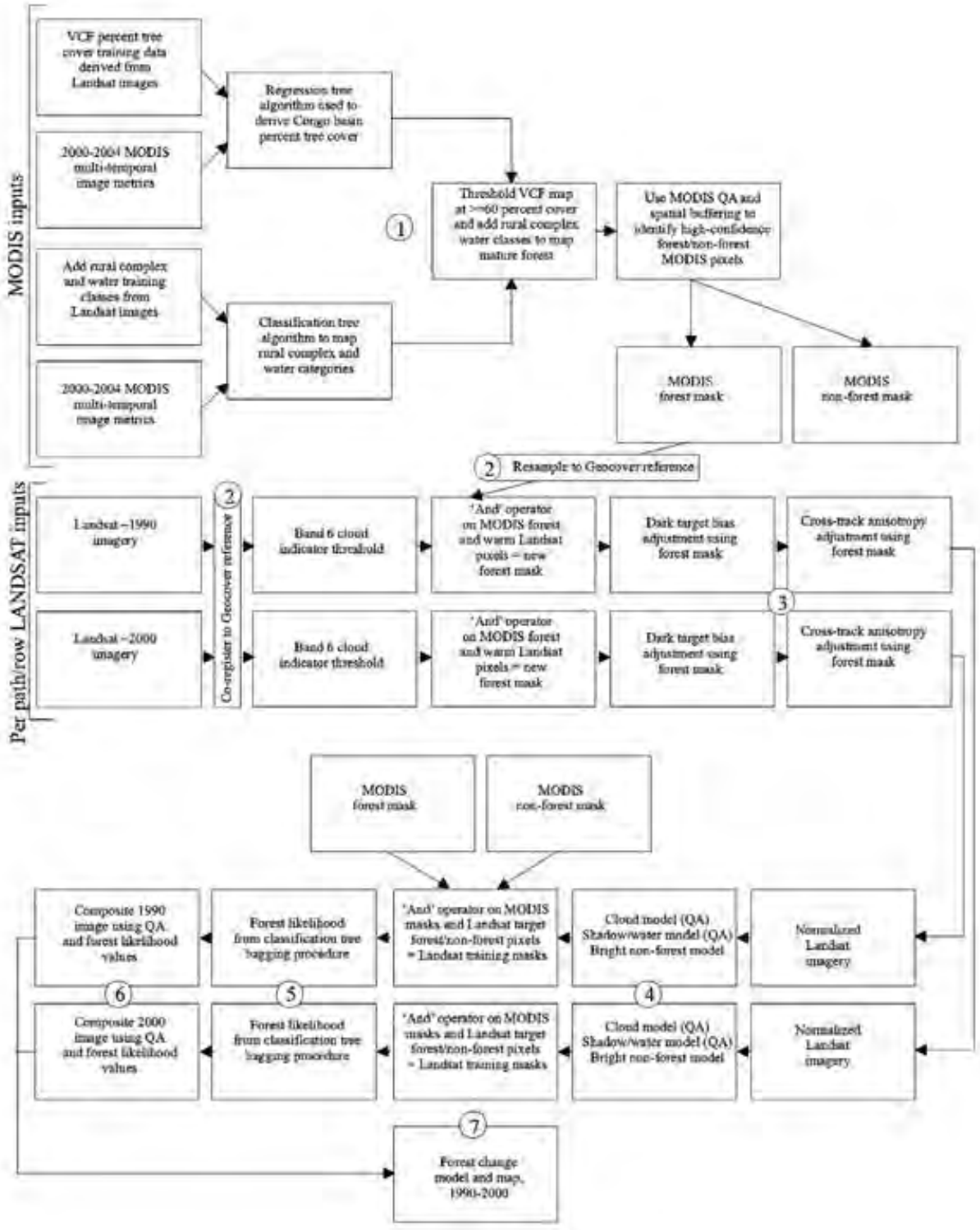


Fig. 2. Flow diagram of multi-resolution forest cover mapping and change detection methodology where the following text sub-headings from the Methods section are highlighted: 1) *Generate regional MODIS 250 m forest non-forest cover map forest non-forest cover map*, 2) *Georectification/resampling of satellite data*, 3) *Landsat normalization*, 4) *Landsat cloud and shadow flagging*, 5) *Landsat decision tree forest mapping procedure*, 6) *Landsat compositing*, 7) *Landsat forest change mapping*.

Figure 2 *Diagramme de flow de la cartographie multi-résolution du couvert forestier avec la méthode de détection de changement indiquée par les sous-titres suivants : 1) Generate regional MODIS 250 m carte de couverture forêt/non-forêt, 2) Géorectification/rééchantillonage des données satellites, 3) Normalisation des données Landsat, 4) Signalisation des nuages et des ombres sur les données Landsat, 5) Procédure de décision de la cartographie des forêts sur les données Landsat, 6) Série de données Landsat, 7) Cartographie des changements du couvert forestier sur les données Landsat. (Hansen et al, 2008)*

2.2.1.2 La hauteur de la canopée

Les données raster sur la hauteur de la canopée proviennent de Potapov et de ses co-auteurs, et sont accessibles sur le lien suivant : https://glad.umd.edu/dataset/gedi/. Le raster est d'une résolution de 30 m et il exprime la hauteur de la canopée en mètres avec des données datant de 2019.

Les auteurs ont estimé la hauteur de la canopée à partir de la combinaison de données satellites optiques Landsat 30m et MODIS 250m. Aux données optiques ont été rajoutées des données du satellite Lidar ISS GEDI spécialement conçu pour estimer la structure de la végétation, et des données Lidar en aéroporté (ou ALS). Comme pour les données satellites optiques, les données satellites Lidar peuvent avoir des altérations à cause des phénomènes atmosphériques en milieu tropical. Afin de réduire les erreurs sur les données GEDI, celles-ci ont donc été recalibrées avec des données ALS. Les techniques ALS permettent d'avoir des mesures fiables à très fine résolution spatiale (de 1m à 2m). Les mesures ont été effectuées au Mexique, aux Etats-Unis, en République démocratique du Congo et en Australie. Ces pays ont été choisis car ils possèdent une grande diversité d'écosystèmes forestiers, avec des données ALS déjà disponibles. Le choix de ces pays a permis de prendre en compte un grand nombre de formations forestières ayant des structures différentes.
Une des limites des données Lidar est qu'elles sont limitées pour recouvrir de très grandes surfaces. Cela est principalement dû à l'altitude limitant la fauchée et à la densité des points collectés. C'est pour cette raison que des données optiques complémentaires ont été utilisées car elles peuvent prendre en compte de très grandes surfaces et assurer une cartographie exhaustive des territoires. Ainsi les données Landsat ont été utilisées pour effectuer une interpolation des hauteurs estimées à partir des données GEDI recalibrées avec les données ALS. Cependant avant cela, les données Landsat ont été préalablement traitées avec les données MODIS afin de réduire la perte d'information causée par les altérations dues aux phénomènes atmosphériques comme cela a été cité précédemment (cf Hansen et al.2013).

Sur le produit final, l'estimation de la hauteur en-dessous de 10m et au-dessus de 30m est peu fiable. La figure 3 indique la densité des points entre les données ALS et les données Landsat en fonction de la hauteur. La diagonale représente la corrélation entre les données ALS et les données Landsat. Avant 10m la densité de points est plus élevées vers les données Landsat alors qu'après 30m la densité de points est plus élevée vers les données ALS. Cela signifie qu'en dessous de 10m la hauteur est surestimée, alors qu'au- dessus de 30m la hauteur est sous-estimée (Potapov et al, 2020).

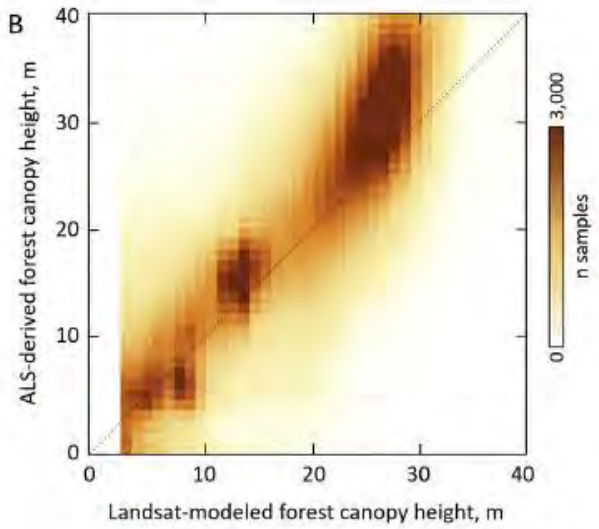


Fig. 6. B. Comparison of the ALS-based reference forest canopy height with Landsat-modeled forest canopy height product. The ALS data are collected in the USA, Mexico, DRC, and Australia; $n = 1000{,}909$.

***Figure 3** : Comparaison des données de référence ALS-based sur la hauteur de la canopée avec le produit Landsat-modeled de la hauteur de la canopée. Les données ALS ont été collectées aux USA, au Mexique, en RDC et en Australie. n = 1 000 909. (Potapov et al, 2020)*

2.2.2 Zones écologiques

Les zones écologiques ont servi à représenter le milieu écologique pour rassembler les formations forestières en fonction de la structure.

2.2.2.1 Ecozones de la FAO

Pour définir ces écozones, la FAO s'est servi des conditions environnementales et de la distribution spatiale de la végétation dominante. Elle a effectué sa classification selon les étapes suivantes :

- Une première délimitation a été effectuée à l'échelle globale en se basant sur la classification climatique de Köppen-Trewartha (fig 4). Cette classification basée sur des données climatiques, consiste à identifier les différents types de climat à l'échelle mondiale. Ce travail a été effectué par Köppen en 1931 et retravaillé ensuite par Trewartha en 1968 (ref Köppen 1931, Trewartha 1968). Comme les conditions climatiques influencent les grandes caractéristiques de la végétation, la FAO a décidé de se baser sur cette classification afin de pouvoir identifier les grandes formations forestières de façon homogène.

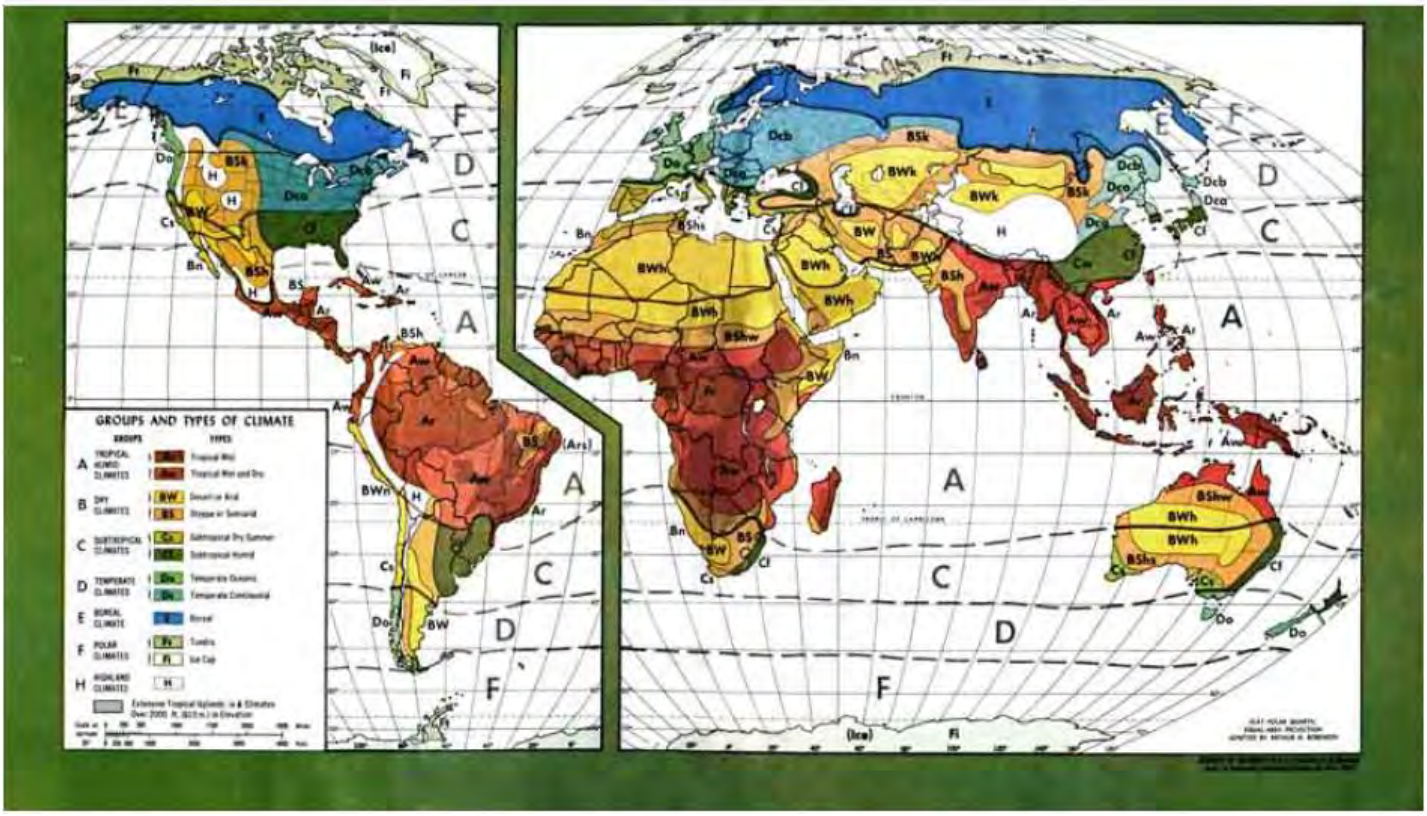


***Figure 4** : Classification climatique de Köppen-Trewartha 1968.*

- A l'échelle régionale ou nationale, selon leur disponibilité, des données sur la végétation ont été utilisées pour délimiter les écozones en fonction des conditions climatiques et de la végétation dominante. Les caractéristiques de l'environnement comme la température, les précipitations et le relief ont, par la suite, permis d'identifier les zones de transition qui ont servi à délimiter les frontières des écozones. Dans certains cas il a fallu apporter quelques modifications dans la façon de délimiter les zones à cause des particularités de l'environnement :
    - Dans les zones tropicales, subtropicales, tempérées et boréales, la végétation a été délimitée en fonction de l'altitude.
    - La zone boréale a été séparée en deux catégories (variable ayant servi à la décision non précisée) : une zone boisée septentrionale correspondant à la toundra et une zone de forêts de conifères similaire à la taïga au sud.
    - En zone tropicale saisonnière, le type climat sec à saisonnalité a été divisé en fonction de la durée de la saison sèche et de celle de la saison des pluies. Dans les endroits où la saison sèche est longue, les zones ont été classées en forêts sèches décidues ou autres zones boisées. Dans les endroits où la saison sèche est courte, les zones ont été classées en forêts humides décidues.

Les écozones de la FAO représentent une formation végétale unique en fonction du climat. Ainsi ces zones ne mettent pas en évidence les variabilités que l'on peut retrouver au sein même des forêts comme par exemple, les mangroves des forêts tropicales humides (FOA, 2001). Cette classification en écozones a été effectuée en 2001 et révisée en 2010 avec des outils de télédétection plus performants. Cette révision a pris en compte les possibles changements des conditions climatiques et du couvert végétal qui auraient pu avoir lieu entre l'an 2000 et l'an 2010 (FAO, 2012). Comme indiqué en introduction, les écozones de la FAO ne prennent en compte que les grandes formations forestières dominantes sans représenter la variabilité structurelle des forêts qui existe au sein de ces zones forestières (Ahoutou, 2021). Ainsi il est nécessaire d'avoir des zones plus précises si l'on souhaite discerner les formations forestières en fonction de leur structure.

2.2.2.2 Ecorégions du WWF

Comme indiqué en introduction, les écorégions du WWF mettent en évidence la biodiversité. Plusieurs versions de ces écorégions existent (Olson & Dinerstein, 1998) (Olson et al., 2001) mais la dernière date de 2017 et compte 846 écorégions terrestres (Dinerstein et al., 2017) (fig 5).

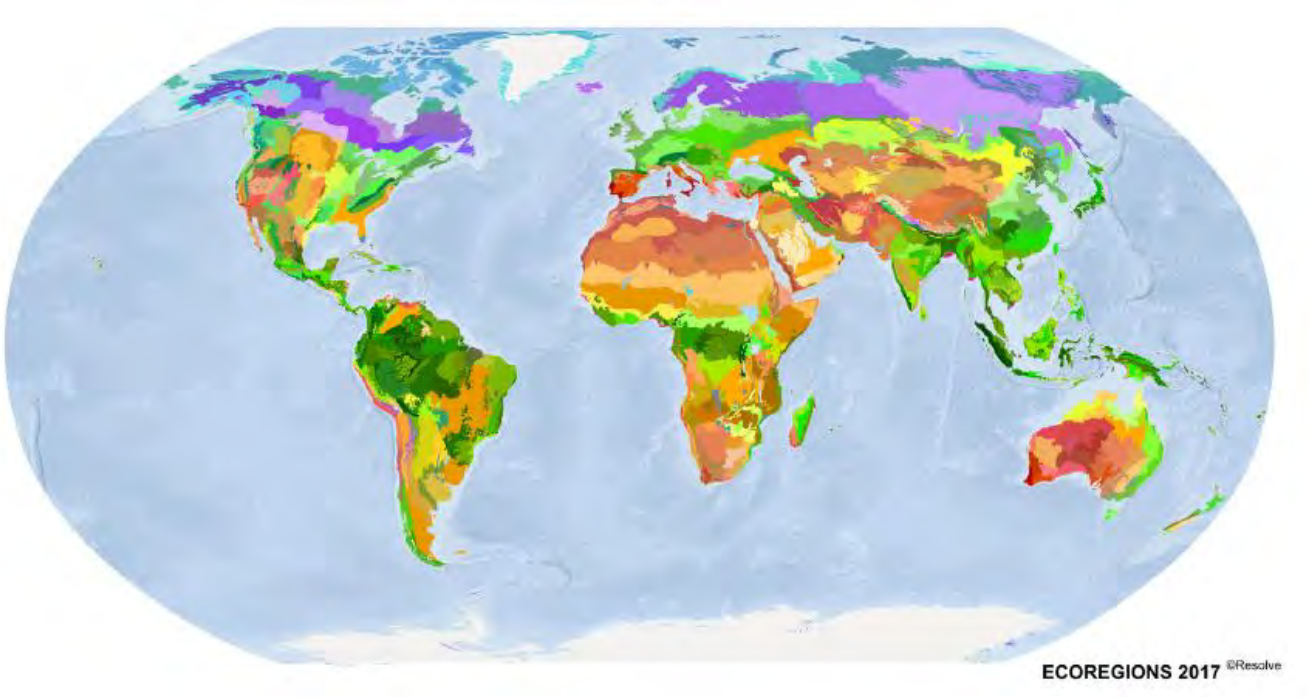


***Figure 5** : Ecorégions du WWF* (Dinerstein et al., 2017)

Ces écorégions ont été délimitées selon les étapes suivantes :

- Le globe terrestre a été divisé en 14 biomes basés sur les critères qui ont servi à délimiter les MHT (Major Habitat Type) qui représentent les aires écologiques ayant des caractéristiques communes. Ces critères prennent en compte la structure de l'habitat, le régime climatique et la distribution des espèces animales et végétales en fonction des similitudes entre guildes écologiques (Dinerstein et al, 1995).
- Les biomes ont été répartis en 8 royaumes biogéographiques (fig 6). Ces royaumes sont issus des travaux de d'Udvardy, 1975 qui consistaient à représenter la distribution biotique du monde par zones biogéographiques pour l'UICN. Les zones biogéographiques sont délimitées en fonction des facteurs écologiques du milieu :
    - Le rassemblement des espèces animales et végétales appartenant au même taxon.
    - Les interactions intraspécifiques et interspécifiques dans un écosystème donné.
    - La phylogénie afin de retracer l'histoire évolutive des espèces animales et végétales en passant par les ancêtres communs.
    - La répartition spatiale des espèces animales et végétales.

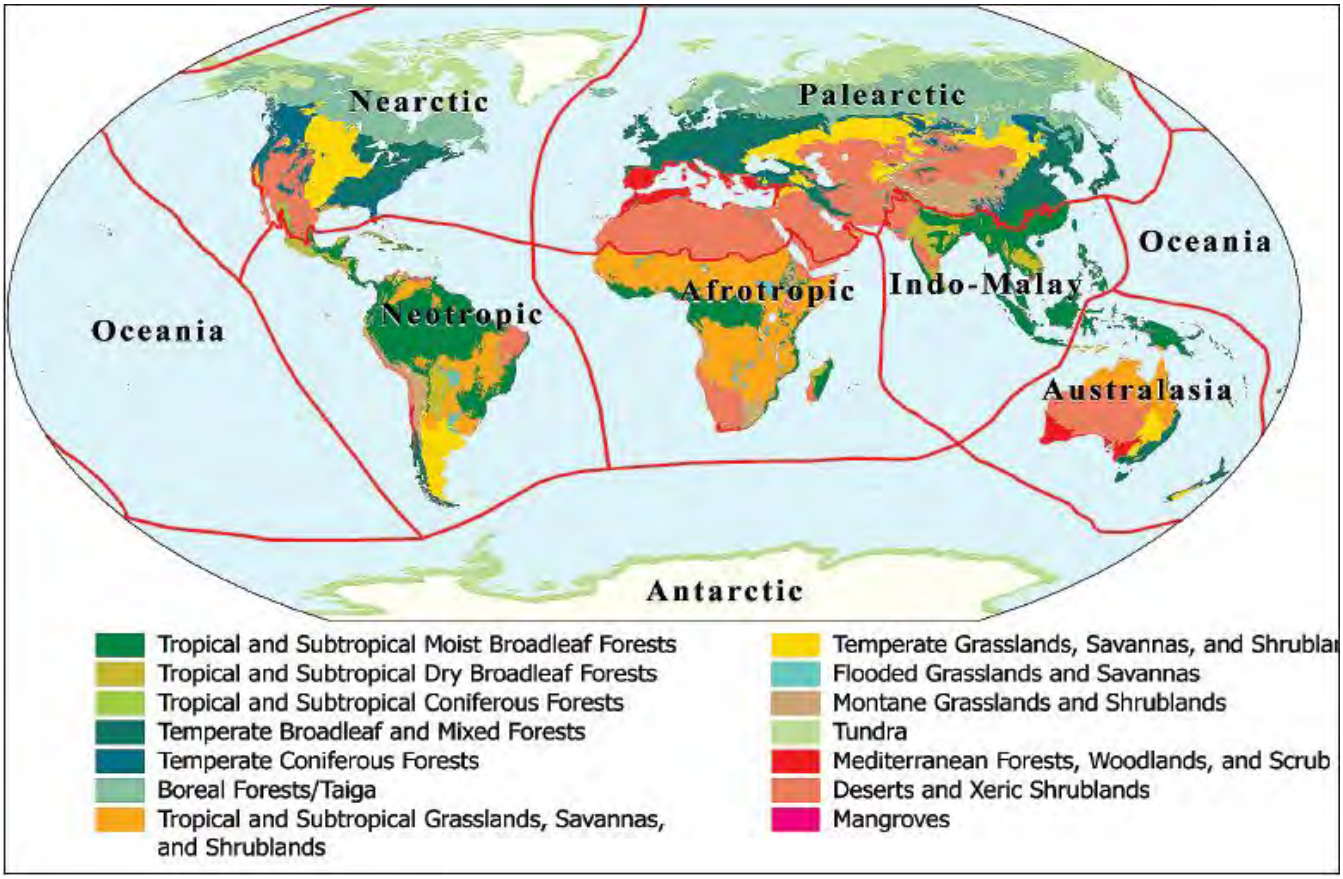


***Figure 6** : Biomes et royaumes biogéographiques* (Olson et al, 2001)

- A partir des royaumes biogéographiques, les écorégions ont été délimitées en fonction des provinces biotiques et des facteurs écologiques. Les provinces biotiques ont été définies en fonction du climat, de l'écoclimat, du type de sol, de la physiographie, du type de végétation et des espèces animales et végétales. Les facteurs écologiques qui ont servi à établir les frontières des écorégions sont basés sur des connaissances d'experts de l'écologie tels que la richesse spécifique, les espèces endémiques, les migrations, les types d'interaction entre les différentes espèces et le système d'adaptation des espèces.

En tout 867 écorégions terrestres ont été définies sur la version de 2001 (Olson et al, 2001). Cette carte a été révisée en 2017, avec la suppression des biomes anthropiques afin de se concentrer uniquement sur des zones natives et intactes. Les écorégions forestières ont été révisées à partir de données sur le couvert végétal (origine des données non précisée) provenant des outils de télédétection (Dinerstein et al, 2017), laissant finalement subsister 846 écorégions.

2.2.2.3 Typologie phytogéographique nationale (TPN)

Nous utiliserons dans ce rapport le terme « typologie phytogéographique nationale » ou TPN pour désigner des cartes phytogéographiques construites à partir de données, et plus généralement d'observations d'experts, récoltées directement sur le terrain. Les cartes phytogéographiques diffèrent en fonction des pays, des auteurs et des structures qui les produisent. Leur production diffère en terme de critères de zonation, d'outils et de type de données. Les experts qui contribuent à la production de ces cartes sont majoritairement des botanistes et des naturalistes.

- <u>Le cas du Cameroun</u>

  Le botaniste R.Letouzey a effectué une cartographie complète de la végétation du Cameroun en se basant sur des données d'inventaires floristiques et forestiers, ainsi que sur des données climatiques et topologiques pour définir les différentes régions de végétation du pays. R.Letouzey a réalisé plusieurs cartes en fonction de l'échelle et du type de données à représenter. Pour ce projet j'ai utilisé une carte qui représente les formations forestières principales du pays (annexe 1). Cette carte a été choisie car elle correspond à ce que l'on souhaite produire : une carte qui représente les formations forestières en fonction de la structure. N'étant disponible qu'en format papier, j'ai numérisé cette carte afin d'en obtenir une version sous format vectoriel. Il faut noter que la carte en question date de 1959. Durant cette période la frontière avec le Nigeria était différente de celle d'aujourd'hui à cause des guerres du Cameroun de l'époque (fig 7).

Ainsi sur la carte de 1959 il manquait de l'information au niveau de la frontière avec le Nigeria. Afin de combler ce manque une autre carte de R.Letouzey a été utilisée. Cette carte date de 1985 et elle met en évidence la végétation sous un format plus détaillé. Je n'ai pas retenu cette carte pour l'ensemble du pays car elle est trop complexe et il est difficile d'y discerner les forêts principales (annexe2).

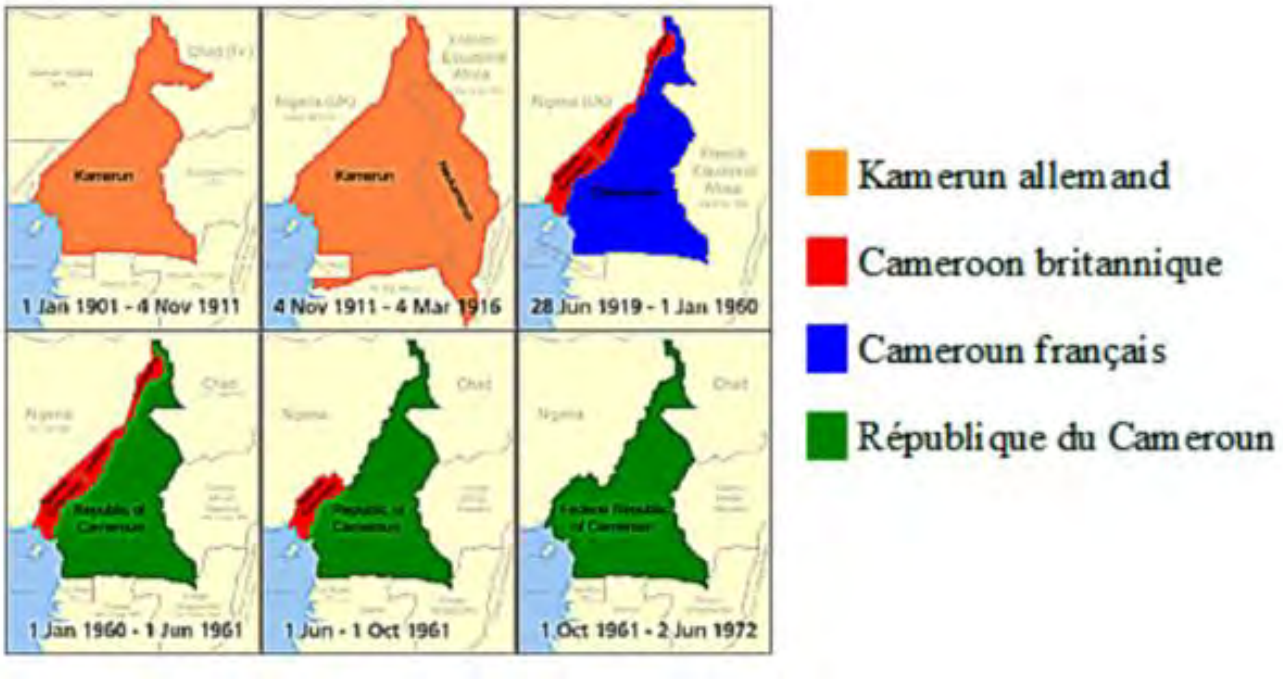


***Figure 7** : Evolution des frontières suites aux grandes guerres du Cameroun.*

La distribution des types de végétation du Cameroun suit un gradient Nord-Sud allant d'un climat sec à un climat humide. Au nord du pays se situent les steppes suivies des grandes zones de savanes boisées et arbustives. Au sud du pays se situent les forêts caducifoliées et les forêts sempervirentes. Vers la côte Atlantique, on retrouve les mangroves, les forêts côtières ainsi que des forêts en zone de montagnes qui vont rejoindre les savanes plus au nord (fig 8).

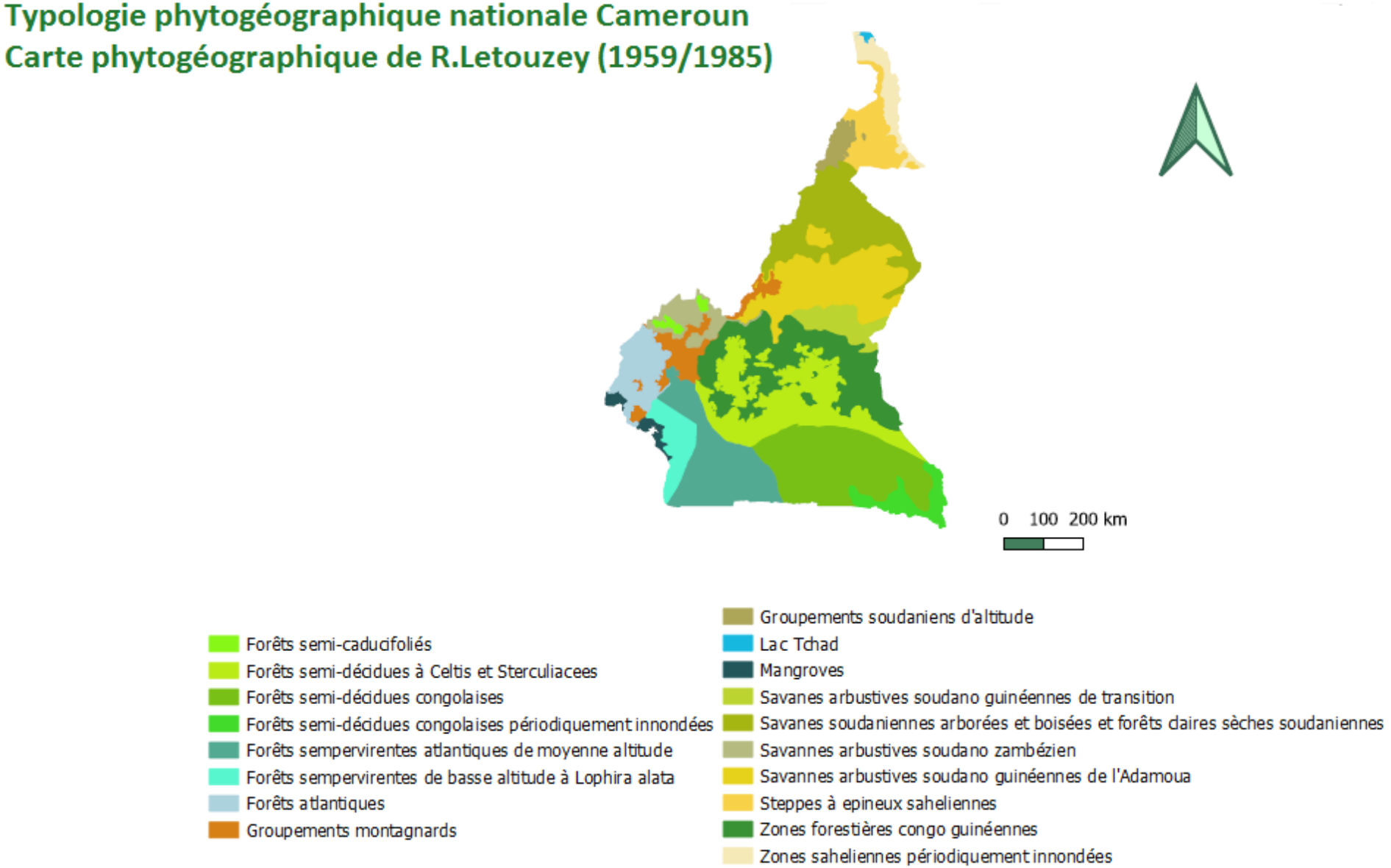


Figure 8 *: Typologie phytogéographique nationale du Cameroun. Carte numérisée à partir des cartes phytogéographiques de R.Letouzey 1959/1985*

- Le cas du Brésil

  La carte de végétation du Brésil a été effectuée par l'IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) dont le rôle consiste à répertorier des données statistiques, géographiques et environnementales sur le Brésil. En 1970 le gouvernement brésilien a mis en place le projet Radam Brasil dans le but d'améliorer la gestion des ressources naturelles et la protection du milieu naturel. Dans le cadre de ce projet, des manuels techniques ont été élaborés afin d'inventorier la végétation et la cartographier (http://www.cprm.gov.br/). La carte de végétation a été construite à partir de données récoltées sur le terrain et d'imagerie satellite. La plupart des données de terrain proviennent du nord du pays et de la partie centrale où se situent les forêts denses et les savanes (fig.9).

Figure 9 *:Localisation des zones d'inventaire sur la végétation. IBGE (https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa220976)*

Dans la partie nord du pays on retrouve les forêts ombrophiles qui sont des forêts tropicales humides soumises à des précipitations fréquentes tout le long de l'année. On retrouve aussi des forêts ombrophiles au sud du pays sur la côte Atlantique. Aux alentours de la région d'Amazonie, au nord du pays, le climat varie entre le tropical humide et le saisonnier. Dans cette zone se situent des forêts saisonnières qui correspondent à des forêts subcaducifoliées et caducifoliées. Il s'agit de forêts composées d'arbres qui perdent leurs feuilles durant une période de l'année. Dans la partie centrale du pays se situent essentiellement les savanes et, en se rapprochant de la côte Atlantique, des savanes-steppes. Ces savanes sont entourées par des forêts saisonnières qui font office de zone de transition. Tout au sud du pays sont situées les steppes. Pour finir il existe un type de végétation nommé « Formation pionnière » situé en bordure des côtes atlantiques qui représente les premiers végétaux à pousser à partir d'un sol nu (fig 10)

J'ai récupéré les données sous format vectoriel sur le portail cartographique de l'IBGE à l'adresse suivante : https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage.

Le fichier vectoriel offre des données détaillées sur la végétation. Afin de ne récupérer que les grandes formations végétales, je l'ai retravaillé à partir d'une carte simplifiée des régions de végétation du Brésil fournie par l'IBGE (annexe 3). Le fichier vectoriel était de faible qualité et cela a grandement ralenti le traitement de la carte. Il a fallu :

- Diviser le pays en 11 parties parce que la couche vectorielle était trop complexe pour être traitée en une seule fois.
- Corriger les erreurs et réorganiser les attributs.
- Corriger les erreurs de géométrie et de topologie.
- Supprimer les polygones trop complexes et mal découpés.

Malgré les modifications apportées pour faciliter le traitement, le temps de découpage et de regroupement des entités fut très long (quelques heures pour une partie du pays). En tout, retravailler la carte de végétation du Brésil a demandé environ 3 semaines.

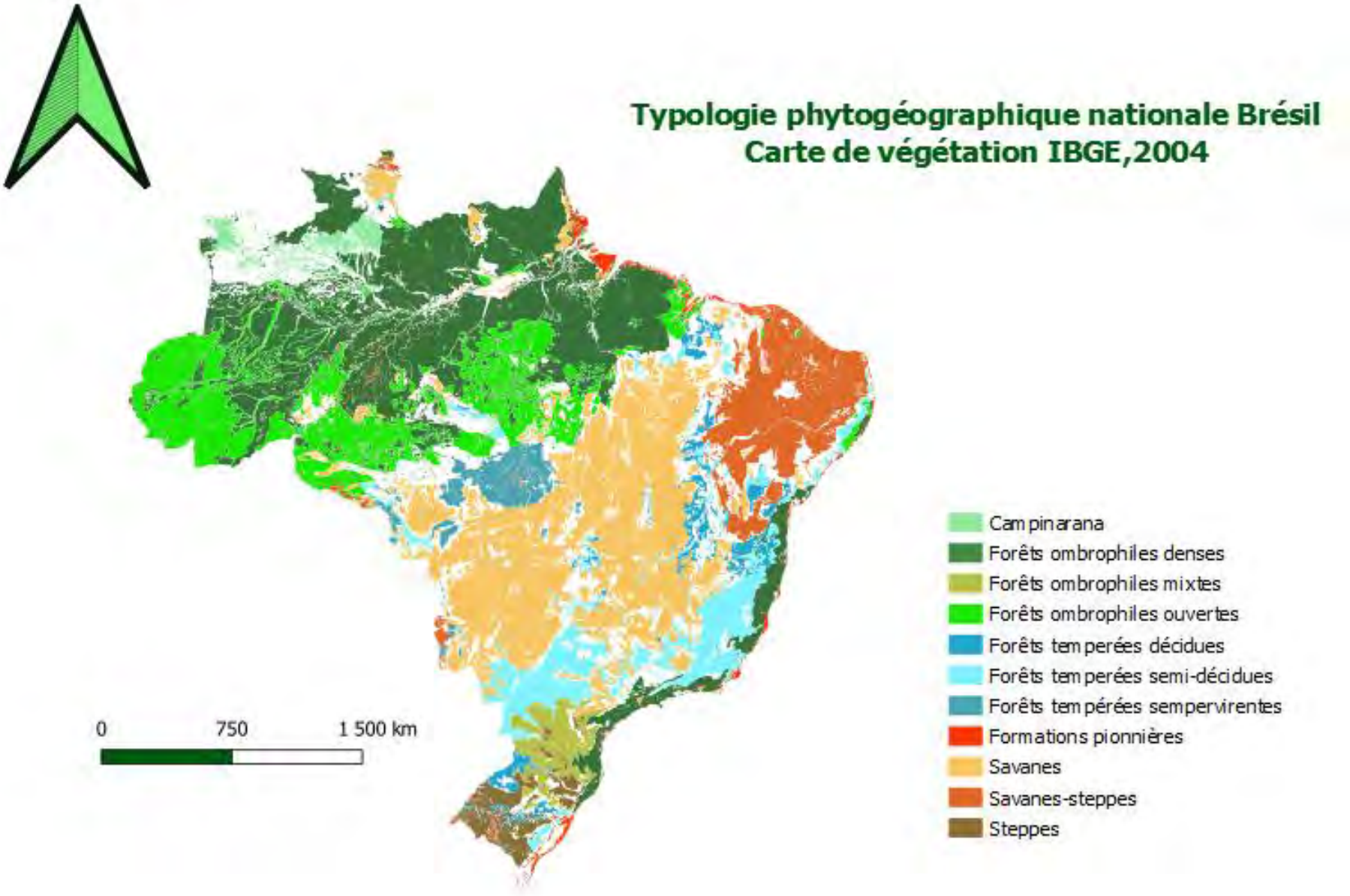


Figure 10 *: Carte phytogéographique nationale du Brésil. Carte de végétation de l'IBGE,2004*

2.2.3 Zones naturelles peu perturbées

Pour reclasser les formations forestières naturelles en fonction de leur structure il est nécessaire de travailler sur des forêts intactes ou peu perturbées. Pour le Cameroun et le Brésil il existe plusieurs zones pouvant abriter de telles forêts :

- Les IFL (« Intact Forest Landscapes »)

  Il s'agit de forêts étendues sur un minimum de 500 km2 où aucune activité humaine n'est significativement visible. En milieu tropical leur cartographie concerne essentiellement des forêts denses humides (Potapov et al., 2008).

- Les zones protégées

  Il s'agit de zones naturelles classées comme protégées, tous types de végétation confondus. Ces zones vont des parcs nationaux aux sanctuaires forestiers. Bien que protégées, elles ne correspondent pas forcément à des zones naturelles intactes. Il s'agit plutôt de zones naturelles peu dégradées. Leur niveau de protection et leur classement dépendent de la manière dont le pays gère ses zones protégées.

Pour cette étude, ce sont les zones protégées qui ont été retenues. La raison est que ces données prennent en compte tous les types de forêts. Ce n'est pas le cas des IFL qui ne prennent en compte que les forêts denses humides. Les données sont disponibles à l'adresse suivante : https://www.protectedplanet.net.

2.2.4 Zones naturelles dégradées

Les zones naturelles dégradées ont servi à rechercher un seuil de dégradation structurel des forêts. Deux types de zones naturelles dégradées ont été choisis :

- Les forêts communautaires : il s'agit de forêts gérées par les populations locales. Elles sont, en théorie, régulièrement exploitées.

- Les zones forestières autour des villes (ZFV) : en bordure des villes la végétation est fortement dégradée à cause des activités humaines. Pour récupérer ces zones, j'ai travaillé à partir d'une couche vectorielle ponctuelle qui représente les villes principales. A partir de la bordure des villes, représentée par la zone tampon, un rayon de 20 km a été sélectionné puis divisé en 4 parties de 5km. La distance de 20 km a été choisie afin de sélectionner des zones forestières naturelles mais impactées par les activités humaines. Pour récupérer les ZFV à partir d'une couche vectorielle ponctuelle, j'ai effectué les étapes suivantes :

- Délimiter la bordure des villes en effectuant une zone tampon depuis le centroïde. Le choix de la distance du tampon a été fait à partir d'une mesure sur un échantillon d'une dizaine de villes sélectionnées aléatoirement. Pour chaque ville sélectionnée, la distance entre le centroïde et la bordure de la ville a été mesurée à l'aide d'un fond de carte satellite Google Map. La moyenne de cette mesure a été évaluée à 5 km. Ainsi la distance du tampon qui a servi à délimiter la bordure des villes a été fixé à 5 km excepté pour deux villes, la capitale administrative du pays, Yaoundé, et la capitale économique, Douala. Pour ces deux villes la distance du tampon fut respectivement de 25 km et 12 km.

- Sélectionner les zones en périphérie des villes sur un rayon de 20km en partant de la bordure des zones tampons préalablement effectuées. Afin de diviser le rayon en 4 parties de 5km, un tampon multiple a été effectué.

L'inconvénient de cette méthode est que les routes ne sont pas prises en compte et que parmi les zones sélectionnées il est fort probable qu'il y ait des traces de zones urbaines. Il aurait été préférable faire un traitement plus fin mais le temps à disposition ne l'a pas permis.

2.3 Score d'inclusion

Dans cette étude le score d'inclusion a servi à vérifier si les TPN, les écorégions et les TSF sont incluses dans les écozones de la FAO. Il permet d'évaluer le degré d'inclusion d'une zone par rapport à une autre. Ce score est basé sur une mesure de pourcentage de surface commune entre deux couches vectorielles polygonales (fig 11) :

A et B sont deux couches vectorielles polygonales représentant les classifications à comparer dont les éléments sont décrits par un attribut marquant leur appartenance à une classe .
A partir d'une couche vectorielle A et d'une couche vectorielle B :

- Calcul de l'intersection géométrique entre les deux couches A et B produisant des éléments disjoints décrits par deux attributs marquant leur appartenance aux classification A et B.
- Calcul des surfaces en km2 des éléments.
- Suppression des entités dont la surface est inférieure à 1 km2 pour éviter les artéfacts issus de l'intersection.
- Agrégation (somme) des surfaces par combinaison de classe de A et B

- Récupération des valeurs de surface sur les entités pour effectuer :
    - Un tableau croisé des surfaces entre les entités de A et de B.
    - Calcul de rapport de surface :
        - De A en fonction de B.
        - De B en fonction de A.

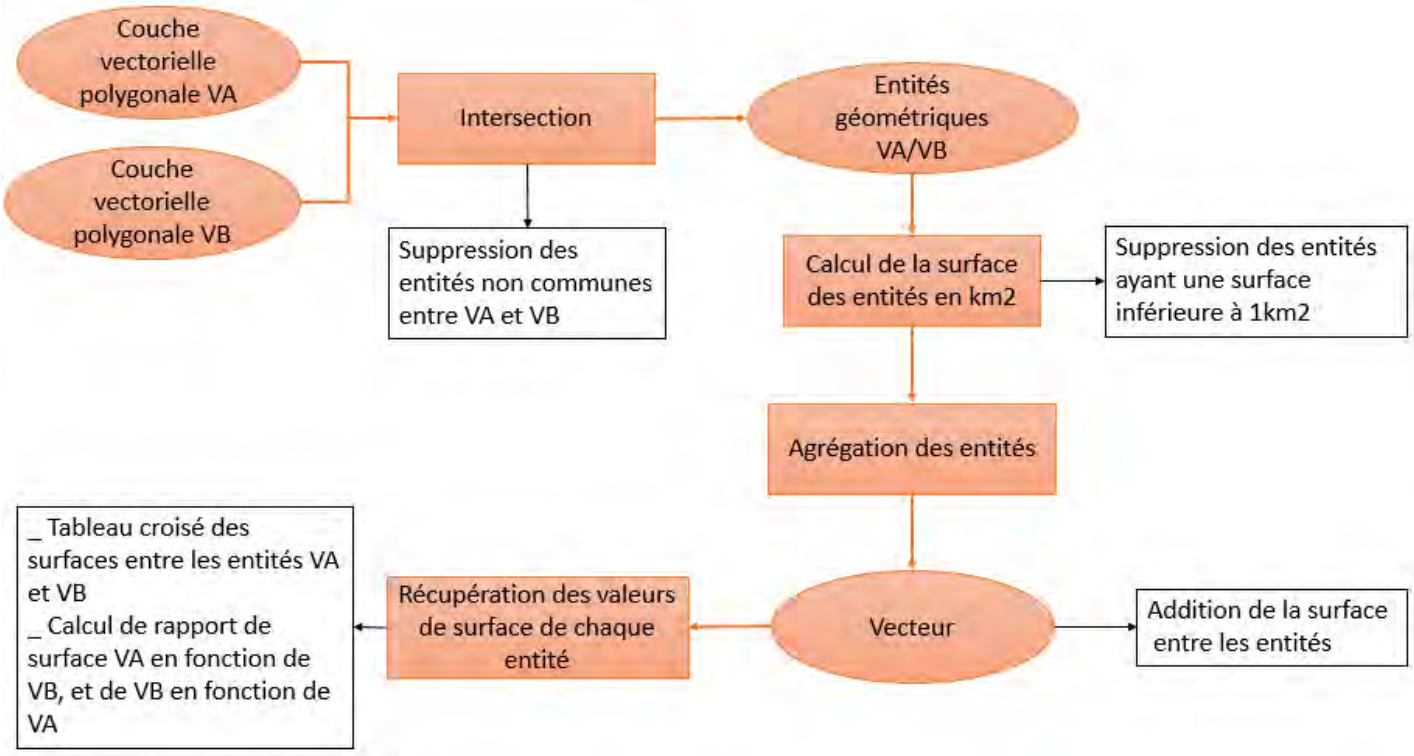


***Figure 11** : Mesure du pourcentage de surface d'une zone par rapport à une autre. Processus de traitement sur des données vectorielles. Traitement effectué sous R. Script disponible en annexe 6.*

***Figure 12** : Exemple d'évaluation de l'inclusion d'une zone par rapport à une autre. A et B sont des couches vectorielles. A1 et A2 sont les entités de la couche A. B1 et B2 sont les entités de la couche B. B1 est incluse dans une seule entité de la couche A. Elle a 100% de sa surface incluse dans A1. B2 est incluse dans deux entités de la couche A. Elle a 70% de sa surface incluse dans A1 et 30% de sa surface incluse dans A2. L'entité B1 a un score d'inclusion plus élevé que B2 parce qu'elle a 100% de sa surface incluse dans une seule entité de la couche A.*

Le score d'inclusion a été évalué en fonction du pourcentage de surface des entités d'une couche vectorielle A inclus dans la surface des entités d'une couche vectorielle B. Un exemple est présenté dans la figure 12. A et B sont deux couches vectorielles différentes. La couche A est composée des entités A1 et A2, et la couche B est composée des entités B1 et B2. L'entité B1 de la couche B est incluse dans une seule entité de la couche A. Elle a 100% de sa surface incluse dans l'entité A1 de la couche A. L'entité B2 de la couche B est incluse dans deux entités de la couche A. Elle a 70% de sa surface incluse dans l'entité A1 et 30% de sa surface incluse dans l'entité A2 de la couche A. L'entité B1 aura un score d'inclusion plus élevé que l'entité B2 parce qu'elle a 100% de sa surface incluse dans une seule entité de la couche A.

Le score d'inclusion a été déterminé à partir du nombre d'entités présentes et du pourcentage de surface d'une entité par rapport à une autre (fig 13). Les scores sont les suivants :

- Intègre : l'entité est totalement incluse.
- Bon : l'entité est fortement incluse.
- Moyen : l'entité est à moitié incluse.
- Mauvais : l'entité n'est pas incluse.

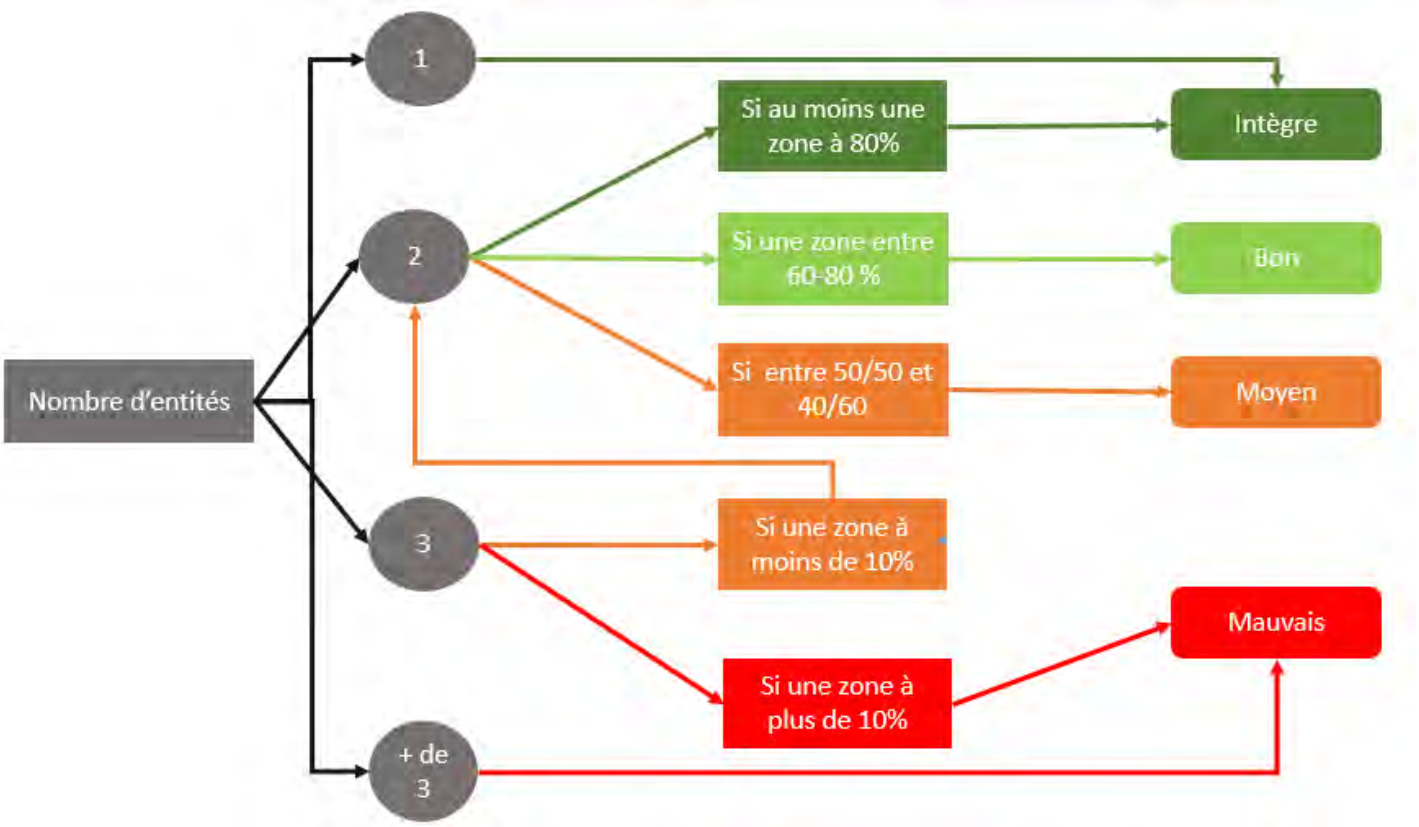


***Figure 13** : Critères d'évaluation du score d'inclusion*

2.4 Etapes du processus de traitement

Les étapes citées ci-dessous représentent la démarche que j'ai adoptée pour tester les hypothèses et pour construire les cartes de typologie structurelle forestière (fig 14). Le texte suivant explique en détail le traitement effectué pour chaque étape.

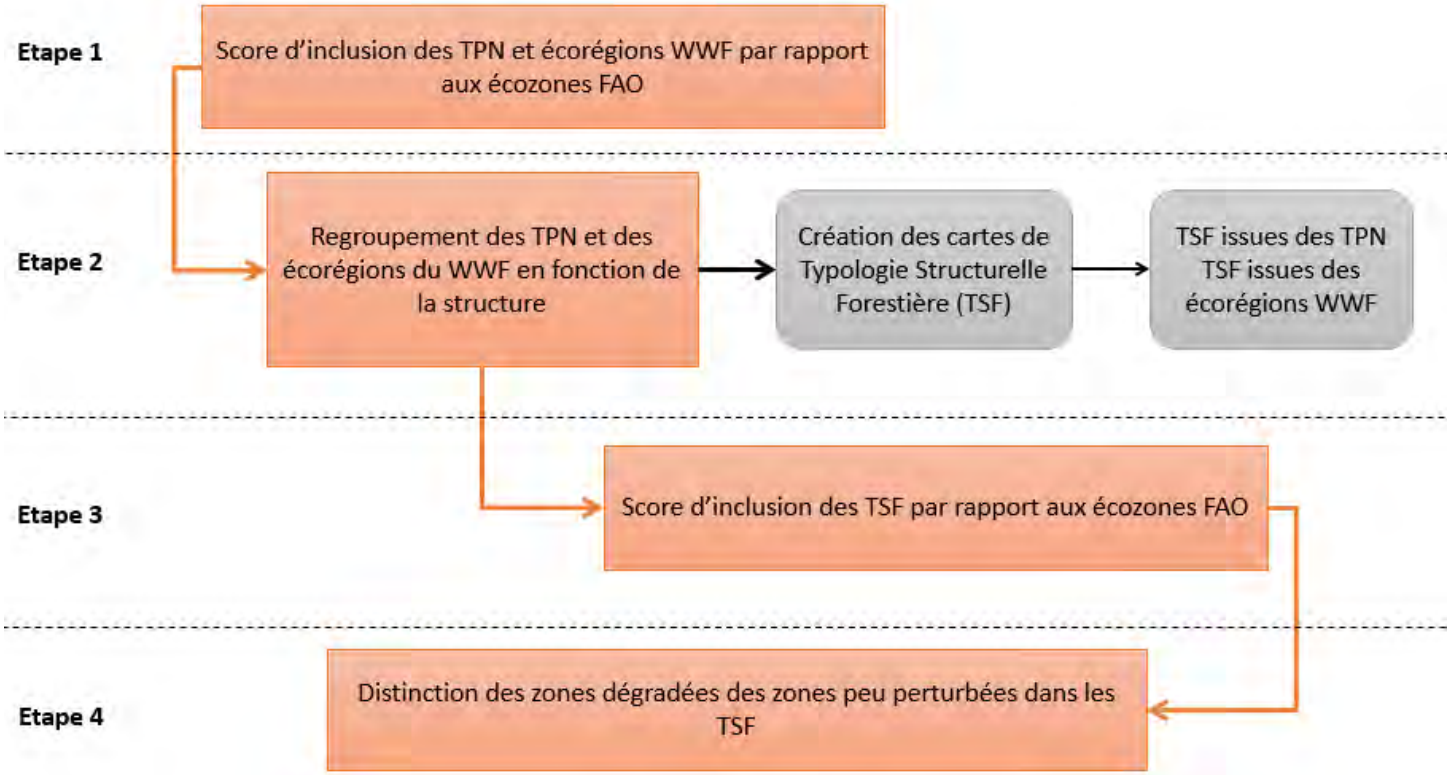


***Figure 14** : Etapes du processus de traitement ayant permis de vérifier les hypothèses et de construire de les cartes de typologie structurelle forestière (TSF). Etape 1 : Score d'inclusion des TPN et des écorégions du WWF par rapport aux écozones de la FAO. Etape 2 : Regroupement des TPN et des écorégions du WWF en fonction de la structure. Etape 3 : Score d'inclusion des TSF par rapport aux écozones de la FAO. Etape 4 : Distinction des zones dégradées des zones peu perturbées dans les TSF.*

1. **Vérification de l'inclusion des TPN et des écorégions du WWF dans les écozones de la FAO.**

   Les écozones de la FAO servent de base pour identifier les formations forestières principales. Vérifier si les TPN et les écorégions du WWF sont incluses dans ces écozones permet de savoir si ces zones écologiques peuvent être une version plus précise des écozones de la FAO. L'évaluation de l'inclusion dépendra du score du pourcentage de surface des TPN et des écorégions du WWF au sein des écozones de la FAO.

2. Regroupement des TPN et des écorégions du WWF en fonction de la structure des forêts

Le regroupement des TPN et des écorégions du WWF a permis de mettre en évidence les formations forestières qui ont des structures similaires. **Les cartes obtenues à partir de ces regroupements sont des cartes de Typologie Structurelle Forestière (TSF).**

Le regroupement a été effectué avec les moyennes de pourcentage de couvert végétal et de hauteur de la canopée calculées sur les zones protégées. La récupération des valeurs sur les données raster s'est effectuée par l'intermédiaire d'un quadrillage carré où chaque maille occupe une surface de 5 km2. Cette valeur de 5 km2 résulte d'un compromis entre temps et calcul qui a été possible d'effectuer avec le support informatique à disposition. Les zones protégées occupent une très grande surface. Il est donc difficile d'effectuer un quadrillage avec des mailles dont la surface n'est que de quelques hectares. Pour le Brésil j'ai dû diviser la couche vectorielle des zones protégées en 11 parties. Dans chaque partie les zones protégées ont été échantillonnées en supprimant les polygones trop petits et trop complexes. Effectuer le quadrillage sur les zones protégées et récupérer les données sur les fichiers raster a demandé plus d'une heure pour chaque partie. En tout il a fallu un peu plus d'une semaine pour récupérer les données sur les zones protégées.

La récupération des valeurs par l'intermédiaire d'un quadrillage permet d'obtenir des statistiques pour chacune des mailles qui composent le quadrillage. C'est sur la base des moyennes de couvert végétal et de hauteur de la canopée que les TPN et les écorégions du WWF ont été regroupées.

Le regroupement a été effectué à l'aide d'une classification automatique de type ascendante hiérarchique (CAH) suivie de l'algorithme K-means. La CAH a servi de base pour regrouper les différentes zones. Le K-means a servi à vérifier le regroupement du CAH. Le choix du nombre de groupes a été effectué à l'aide de l'évolution de la proportion d'inertie et de l'indice de Calinski Harabasz qui accompagnent le K-means.

Un test statistique de comparaison multiple (t.test) avec correction de Bonferroni a été effectué sur les TSF afin de vérifier si elles sont significativement différentes en matière de couvert végétal et de hauteur de la canopée.

3. Vérification de l'inclusion des TSF issues des TPN et des écorégions du WWF dans les écozones de la FAO.

Vérifier si les TSF sont incluses dans les écozones de la FAO permet de vérifier si les TPN et les écorégions du WWF sont des données solides pour mettre en évidence la variabilité structurelle des formations forestières au sein de ces écozones. L'évaluation de l'inclusion dépendra du score du pourcentage de surface des TSF dans les écozones de la FAO.

4. Distinction des forêts peu perturbées et des forêts dégradées dans les TSF.

A partir de cette étape, les analyses ont été effectuées uniquement sur les TSF issues des TPN au Cameroun. Le Brésil exige un temps de traitement informatique assez long et le recours à des moyens de calcul plus puissants. Le temps à disposition n'a pas permis de finaliser les analyses sur ce pays.

Le processus de récupération des variables de couvert végétal et de hauteur de la canopée sur les forêts communautaires a été le même que pour les zones protégées.
Le niveau de dégradation de ces forêts est inconnu. Leur exploitation est très variable et il n'y a pas d'historique d'exploitation à disposition. C'est pour cette raison qu'en plus des forêts communautaires, les zones autours des villes ont été choisies. Le processus de récupération des valeurs de couvert végétal et de hauteur de la canopée a été le même que pour les zones protégées et les forêts communautaires à la différence qu'il a été possible cette fois de réduire la surface de la maille à 0,5 km2.

Afin de vérifier si le pourcentage de couvert végétal et la hauteur de la canopée sont significativement différents entre les ZFV, les forêts communautaires et les zones protégées, des tests de comparaisons de moyennes ont été effectués :

- Test ANOVA suivi d'une comparaison multiple (t.test) avec une correction de Bonferroni : méthode utilisée pour vérifier s'il y a une différence significative du couvert végétal et de la hauteur de la canopée entre les différentes distances des zones autours des villes.
- Test de comparaison deux à deux (t.test) : méthode utilisée pour vérifier s'il y a une différence significative du couvert végétal et de la hauteur de la canopée entre :
    - Les zones protégées et les forêts communautaires.
    - Les zones protégées et les ZFV.
    - Les forêts communautaires et les ZFV.

Avant d'établir la méthode présentée ci-dessus, j'en ai préalablement testé plusieurs, ce qui m'a permis d'aboutir à celle que j'ai employée dans ce travail. J'ai principalement travaillé avec le logiciel SIG QGIS (version 3.16.9) et la programmation R sur Rstudio (version 4.0.4). Sous le logiciel QGIS, le système de coordonnées de référence pour travailler sur le Cameroun était le World_Mercator (ESRI : 54004) et sur le Brésil, le SIRGAS 2000 / Brazil Polyconic (EPSG : 5880).

3 RESULTATS

3.1 Récupération des valeurs de couvert végétal et de hauteur de la canopée

3.1.1 Les zones protégées du Cameroun et du Brésil

Les zones protégées sont distribuées de façon hétérogène sur les deux pays. La plupart des données se situent dans les zones de forêts denses humides, notamment au Brésil (fig 15).

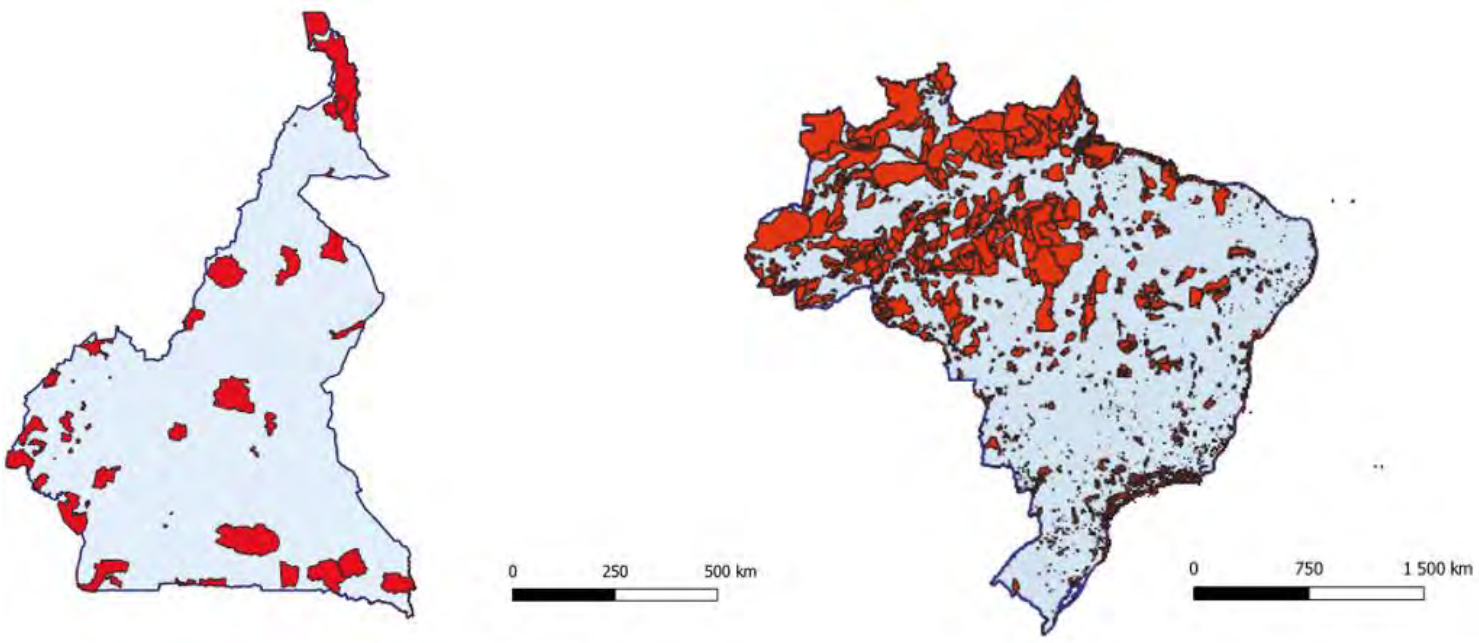


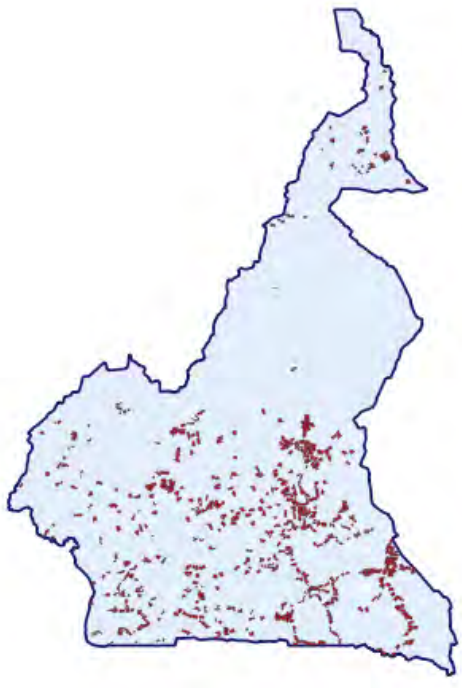
***Figure 15** : Localisation des zones protégées. Gauche : Cameroun; Droite : Brésil.*

Au Cameroun la densité des zones protégées est moins importante qu'au Brésil. Les zones protégées privilégient les endroits représentant des écosystèmes et une biodiversité particulière telle que la région du Lac Tchad à l'extrême nord du pays et les mangroves au sud-est du pays sur la côte atlantique. Au Brésil la densité des zones protégées est plus élevée mais la plupart des zones protégées sont concentrées dans le biome amazonien au nord-ouest du pays. L'inégalité de la répartition des zones protégées provoque une inégalité du volume de données disponibles pour les différentes zones écologiques étudiées (TPN, écorégions WWF et TSF).

Au total, pour les zones protégées, le nombre de mailles est de 14 226 au Cameroun et de 219 298 au Brésil.

3.1.2 Les forêts communautaires du Cameroun

Les forêts communautaires ont servi à faire la distinction entre les zones supposées dégradées et les zones protégées. Le temps à disposition n'a pas permis de finaliser les analyses de distinction des zones dégradées et des zones protégées au Brésil. C'est la raison pour laquelle seules les forêts communautaires du Cameroun seront présentées.
A l'image des zones protégées, la distribution des forêts communautaires sur l'ensemble du pays n'est pas homogène (fig 16)



La plupart des données sont regroupées dans la partie sud du pays. Il y a néanmoins quelques données dans le nord mais pratiquement pas de données dans la partie centre. Au total le nombre de mailles est de 10 976 pour les forêts communautaires au Cameroun.

***Figure 16** : Localisation des forêts communautaires du Cameroun*

3.1.3 Les zones forestières autour des villes (ZFV)

Les résultats suivants présentent les ZFV uniquement au Cameroun pour les mêmes raisons que pour les forêts communautaires.

La distribution des villes étudiées est plus homogène que celle des forêts communautaires et des zones protégées (fig 17). On observe quand même que la concentration des villes est plus importante dans la partie sud-ouest du pays.

Au total le nombre de mailles est de 311 314 pour les ZFV au Cameroun.

***Figure 17** : Localisation des zones forestières situées à 20km de la bordure des grandes villes du Cameroun*

3.2 Score d'inclusion des TPN et des écorégions du WWF par rapport aux écozones de la FAO

Autant pour le Cameroun que pour le Brésil, le score d'inclusion indique que les TPN et les écorégions du WWF sont incluses dans les écozones de la FAO (fig 18). Pour les TPN le pourcentage de surface bien classé est de :

_ 90% pour le Cameroun
_ 85% pour le Brésil

Pour les écorégions du WWF le pourcentage de surface bien classé est de :

_ 80% pour le Cameroun
_ 89% pour le Brésil

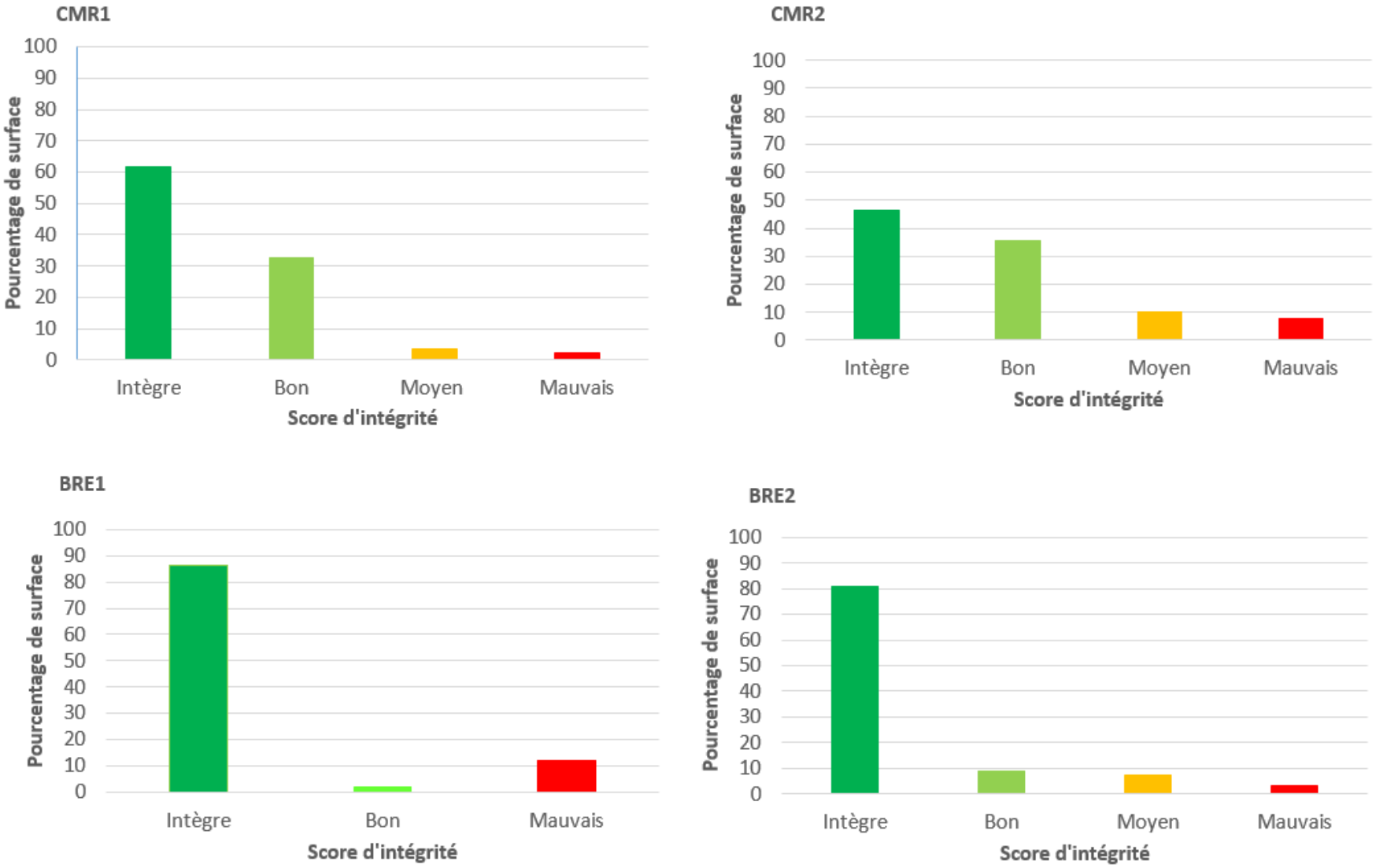


Figure 18 *: Score d'inclusion des TPN et des écorégions du WWF par rapport aux écozones de la FAO. CMR : Cameroun; BRE : Brésil. 1 : TPN; 2 : Ecorégions WWF*

Pour les deux pays, la différence de pourcentage de surfaces bien classé entre les TPN et les écorégions du WWF est faible. Pour le Cameroun il y a 10% de différence et pour le Brésil 4% de différence. Au Brésil le score d'inclusion est considéré identique entre les TPN et les écorégions du WWF. Au Cameroun le score d'inclusion des TPN est légèrement plus élevé que celui des écorégions du WWF.

3.3 Création des cartes de typologie structurelle forestière (TSF)

Les TSF ont été produites à partir du regroupement des TPN et des écorégions du WWF. Le regroupement a été effectué avec les données du couvert végétal et de hauteur de la canopée des zones protégées. Les méthodes employées pour effectuer le regroupement sont le CAH et K-means. Les résultats détaillés des analyses CAH et K-means sont disponibles en annexe 7, 8, 9 et 10. La nomination des différentes zones de TSF s'est basée sur le type de végétation que renferment ces zones et leur localisation géographique.

3.3.1 Les TSF du Cameroun

Au Cameroun, le regroupement a donné 6 groupes pour les TSF issues des TPN et des écorégions du WWF (fig 19) :

- <u>TSF issues des TPN :</u>
  - « Nord Cameroun » : regroupe les steppes et les savanes sahéliennes au nord du pays.
  - « Savanes boisées » : prend en compte uniquement les savanes soudaniennes arborées et boisées.
  - « Savanes arbustives » : prend en compte uniquement les savanes arbustives soudano guinéennes de l'Amadou.
  - « Montagnes Mangroves et Savanes de transition » : regroupe les zones de montagnes, les mangroves et les savanes de transition avec les forêts du sud.
  - « Cameroun Centre et Atlantique » : regroupe les forêts situées au centre du pays et celles vers la côte atlantique.
  - « Cameroun Sud et Sud-est » : regroupe les forêts situées au sud du pays.

- <u>TSF issues des écorégions du WWF :</u>
  - « Nord Cameroun » : regroupe les zones à l'extrême nord du Cameroun.
  - « Savanes Est » : prend en compte uniquement les savanes soudaniennes Est.
  - « Ouest et Centre Cameroun » : regroupe les forêts et les savanes congolaises.
  - « Montagnes Cameroun » : regroupe toutes les zones de montagnes.
  - « Mangroves » : prend uniquement en compte les mangroves.
  - « Sud Cameroun » : regroupe les forêts au sud du pays.

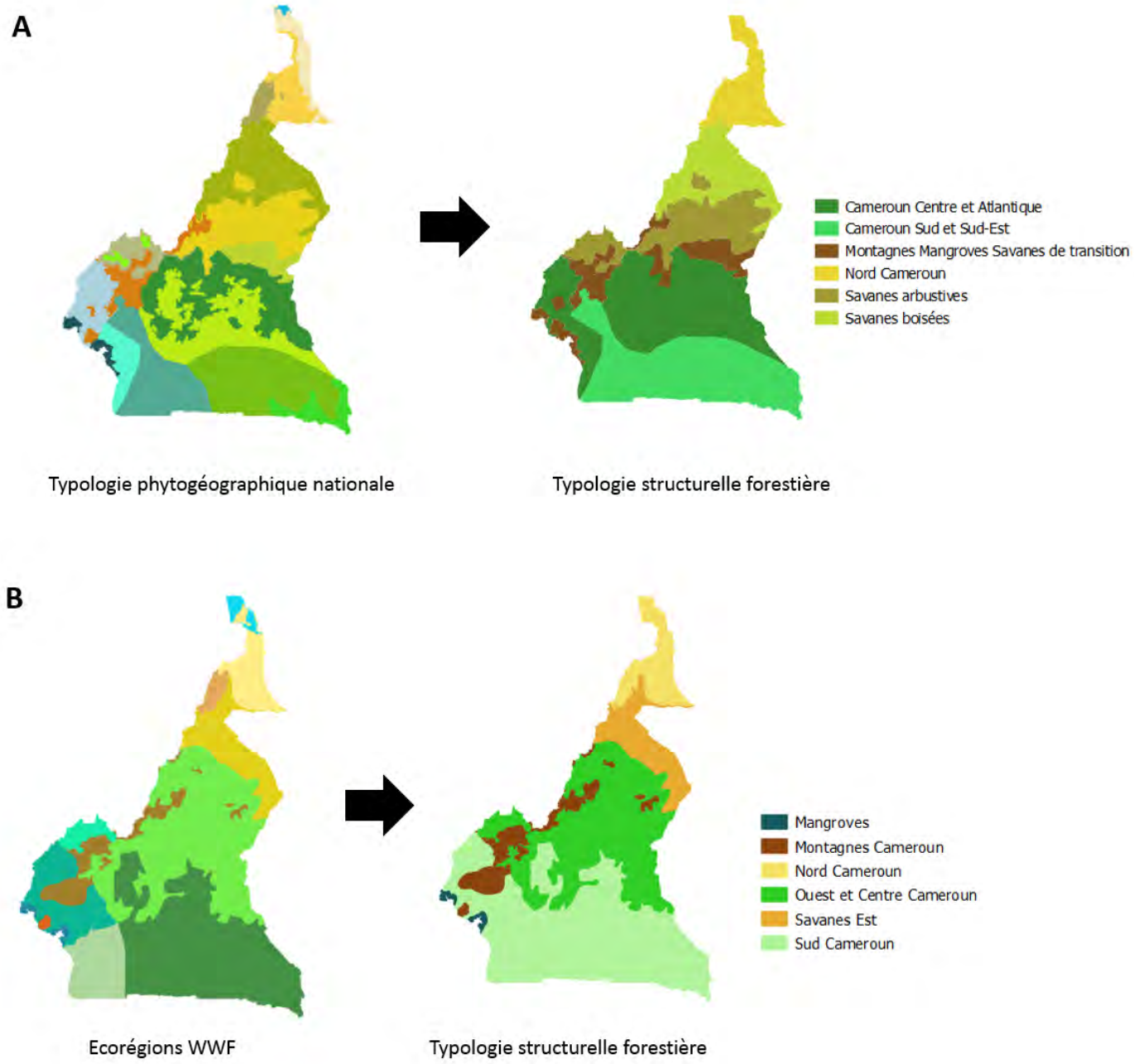


***Figure 19** : Carte de typologie structurelle forestière (TSF) Cameroun. A : TSF issues des TPN. B : TSF issues des écorégions du WWF. La dénomination des TSF s'est basée sur le type de végétation qu'elles renferment et leur localisation géographique.(Carte des TSF disponibles en annexe X)*

Les TSF issues des TPN et des écorégions du WWF suivent la même logique. Elles regroupent les zones au nord du Cameroun, elles séparent les savanes et elles mettent à part les zones de montagnes et les mangroves. Cette distinction des différents types de végétation montre que les TSF sont correctes d'un point de vue écologique. Les tests statistiques de comparaison multiple (cf matériel et méthodes 2.4) indiquent qu'il y a une différence significative pour le couvert végétal et la hauteur de la canopée entre les différentes unités de TSF (annexe 11). Les unités TSF ont donc des structures forestières différentes entre elles.

3.3.2 Les TSF du Brésil

Au Brésil les analyses ont donné naissance à 7 groupes pour les TSF issues des TPN, et à 8 groupes pour celles issues des écorégions du WWF (fig 20) :

- TSF issues des TPN :
  - « Forêts Ombrophiles OuvertDense » : regroupe les forêts ombrophiles denses et les forêts ombrophiles ouvertes.
  - « Forêts Ombrophiles Mixtes : prend uniquement en compte les forêts ombrophiles mixtes.
  - « Campinarana & Forêts sempervirentes » : regroupe la zone Campinarana et les forêts saisonnières sempervirentes.
  - « Forêts Décidues Semi-décidues » : regroupe les forêts saisonnières décidues et semi-décidues.
  - « Formations Pionnières » : prend uniquement en compte les formations pionnières.
  - « Savanes » : regroupes les savanes au centre du pays et les savanes-steppes situées vers la côte atlantique.
  - « Steppes » : prend uniquement en compte les steppes au sud du pays.

- TSF issues des écorégions du WWF :
  - « Forêts Denses Amazonie » : regroupe une partie des forêts ombrophiles denses dans le biome amazonien.
  - « Forêts Ouvertes Amazonie » : regroupe principalement les forêts ombrophiles ouvertes dans le biome amazonien.
  - « Campinarana » : prend uniquement en compte la zone Campinarana.
  - « Forêts Décidues Semi-décidues » : regroupe les forêts saisonnières décidues et semi-décidues.
  - « Savanes et Steppes » : regroupe les savanes, les savanes-steppes et les steppes.
  - « Transition forêts-savanes » : regroupe les zones faisant office de transition entre les forêts et les savanes.
  - « Côte Nord Atlantique » : regroupe les zones situées vers la côte atlantique au nord du pays.
  - « Côte Sud Atlantique » : regroupe les zones situées vers la côte atlantique au sud du pays.

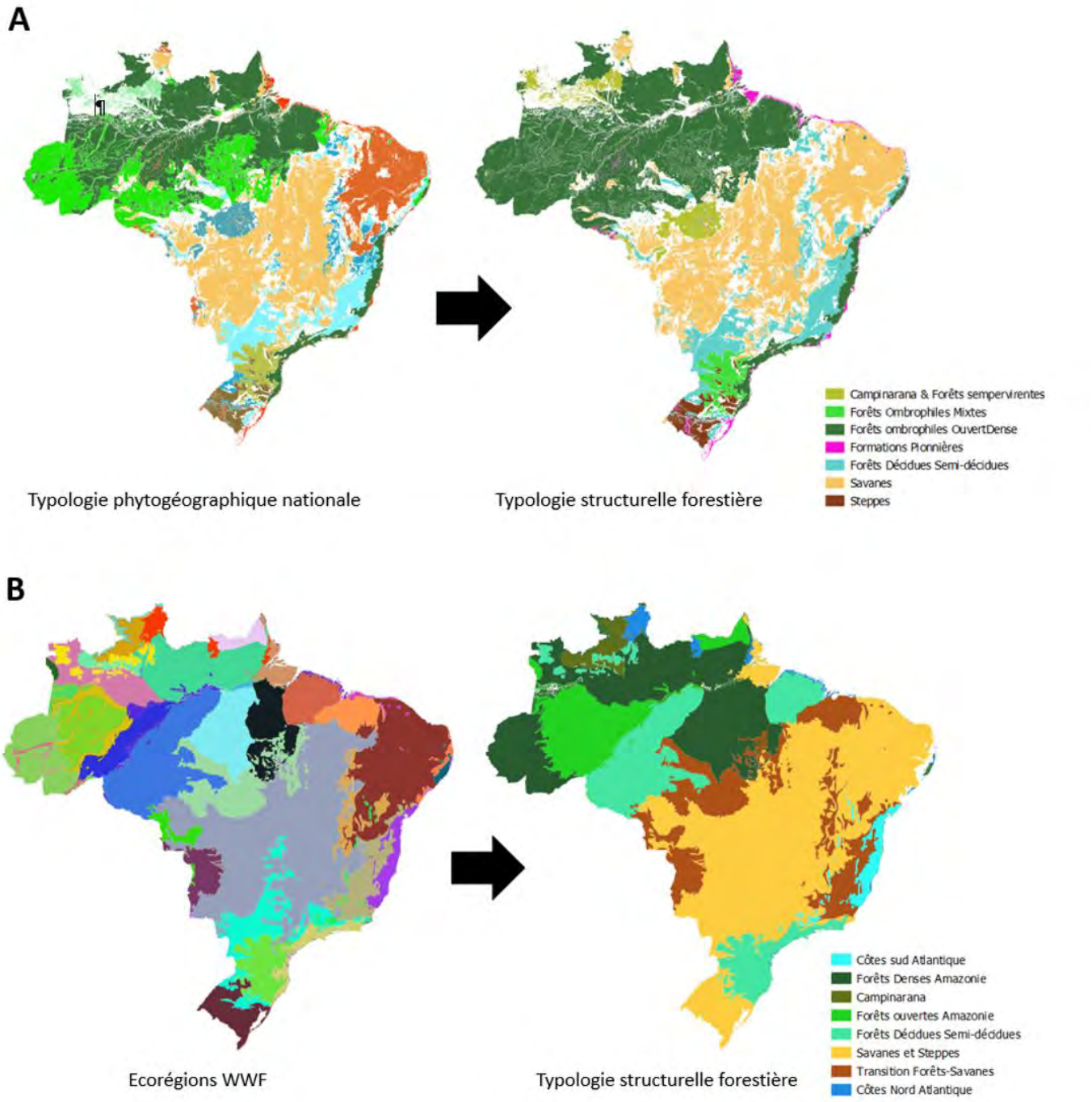


Figure 20 *: Cartes des TSF du Brésil. A : TSF issues des TPN. B : TSF issues des écorégions du WWF. La dénomination des formations TSF s'est basée sur le type de végétation qu'elles renferment et leur localisation géographique.*

Les TSF issues des écorégions du WWF ne suivent pas la même logique que les TSF issues des TPN. Dans le biome amazonien, les TSF issues des écorégions du WWF distinguent 4 groupes alors que les TSF issues des TPN distinguent 2 groupes. Il n'y a pas de distinction entre les savanes et les steppes pour les TSF issues des écorégions du WWF. Cela peut être dû au fait que la délimitation des écorégions du WWF ne se base pas sur les mêmes critères que ceux qui délimitent les TPN. Les critères de délimitation des TPN prennent en compte la végétation et les facteurs environnementaux qui la caractérisent. Les critères qui délimitent les

écorégions du WWF prennent en compte la faune et l'histoire évolutive du milieu en plus de la végétation.

Dans l'ensemble les TSF sont cohérentes. Les forêts sont bien séparées des savanes. Les tests statistiques de comparaison multiple (cf matériel et méthodes 2.4) indiquent qu'il y a une différence significative des valeurs de couvert végétal et de hauteur de la canopée entre les différentes unités de TSF (annexe 11). Les unités de TSF ont donc des structures forestières différentes entre elles.

3.4 Score d'inclusion des TSF par rapport aux écozones de la FAO

Le score d'inclusion indique que toutes les TSF, excepté les TSF issues du WWF au Brésil, sont incluses dans les écozones de la FAO (fig 21).

Pour les TSF issues des TPN, le pourcentage de surface bien classé est de :

_ 80% au Cameroun.

_ 75% au Brésil.

Pour les TSF issues des écorégions du WWF, le pourcentage de surface bien classé est de :

_ 85% au Cameroun.

_ 45% au Brésil.

Au Cameroun, la différence de pourcentage de surface bien classé entre les TSF est de 5%. Au Brésil seul les TSF issues des TPN ont un bon score d'inclusion. Le score d'inclusion des TSF issues des écorégions du WWF est en dessous de 50%, elles ne sont donc pas incluses dans les écozones de la FAO.

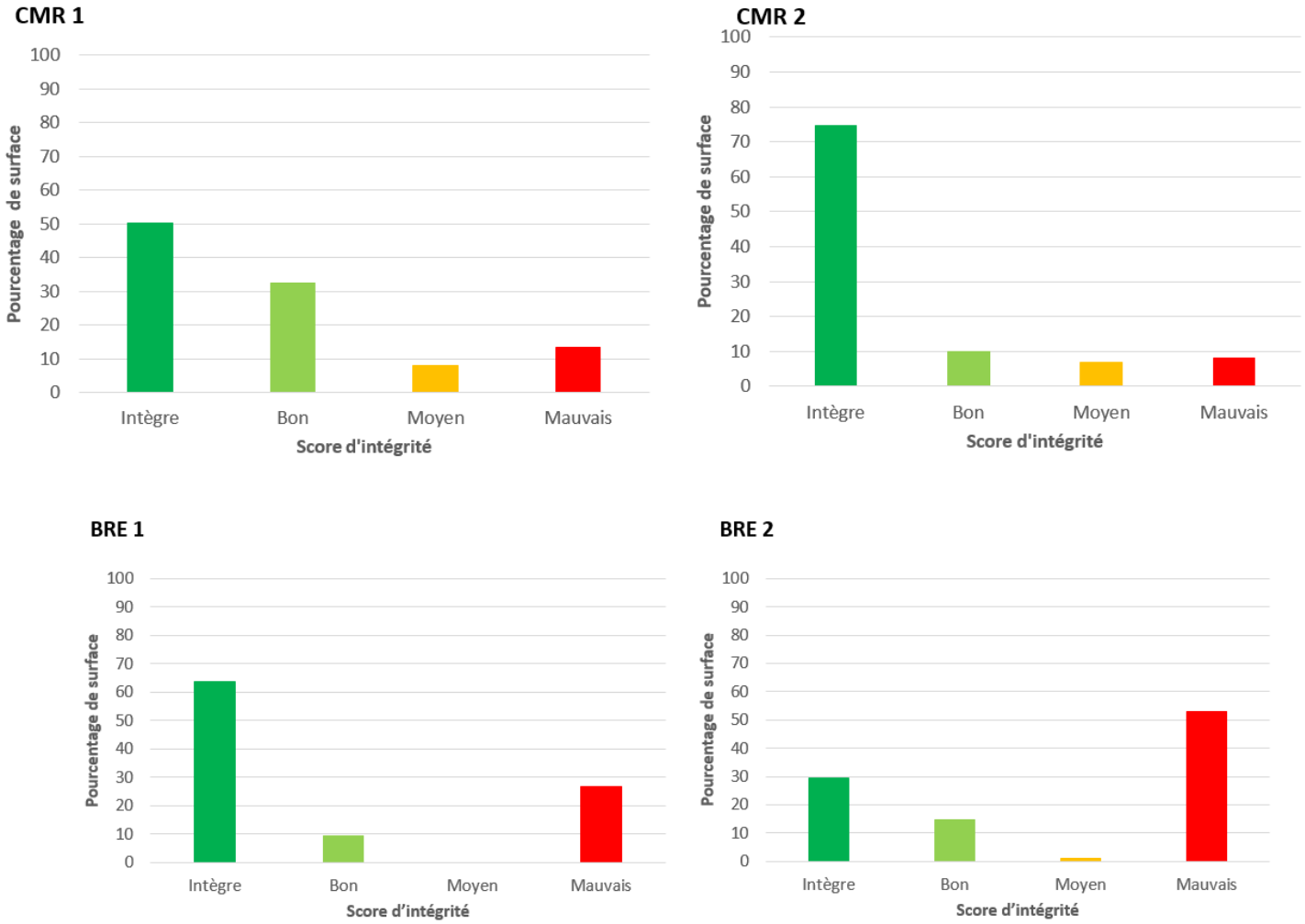


***Figure 21** : Score d'inclusion des TSF par rapport aux écozones de la FAO. CMR : Cameroun, BRE : Brésil. 1 : TSF issues des TPN. 2 TSF issues des écorégions du WWF.*

Valeurs du couvert végétal et de la hauteur de la canopée des TSF issues des TPN

3.5.1 Les TSF du Cameroun

Au Cameroun, le couvert végétal et la hauteur de la canopée augmentent au fur à mesure que l'on se dirige vers le sud (fig 22).

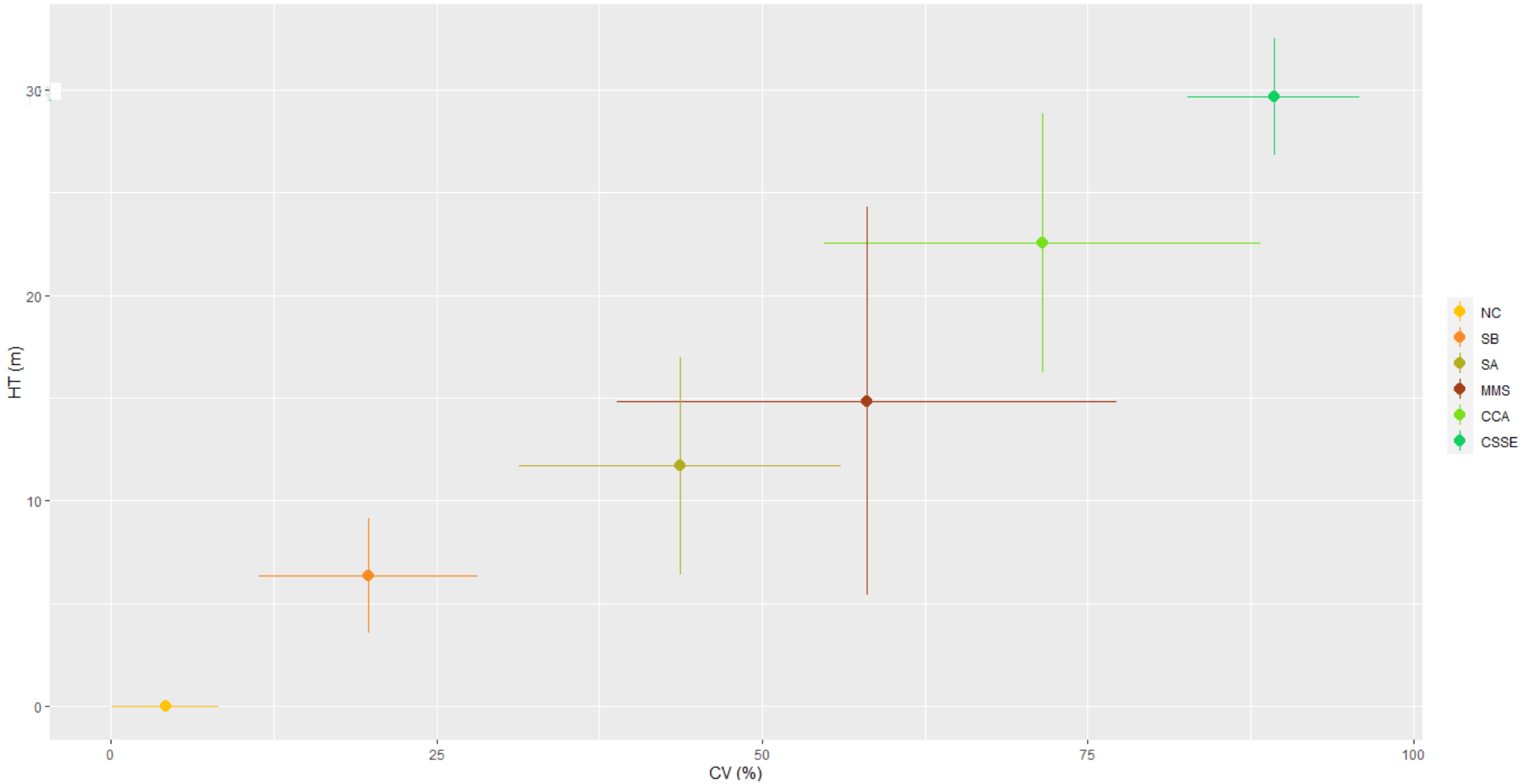


***Figure 22** : Moyennes du pourcentage du couvert végétal et de la hauteur de la canopée avec les écarts-types des TSF issues des TPN au Cameroun. Axe x : (CV) moyenne du pourcentage de couvert végétal. Axe y :(HT) moyenne de la hauteur de la canopée en mètres. NC : Nord Cameroun ; SB : Savanes boisées, SA : Savanes arbustives ; MMS : Montagnes Mangroves Savanes de transition ; CCA : Cameroun Centre et Atlantique ; CSSE : Cameroun Sud et Sud-Est.*

On observe que les valeurs des variables de structure des « Savanes boisées » sont inférieures à celles des « Savanes arbustives » alors que logiquement on s'attendrait à des résultats inverses. Il est possible d'expliquer cela avec la localisation des zones protégées (fig 23). Dans la zone « Savanes arbustives » les zones protégées sont localisées au niveau des frontières avec les savanes boisées et au niveau de la frontière avec le Nigeria. Il est possible que vers ces zones de frontières la végétation corresponde davantage à des forêts ou à des savanes boisées plutôt qu'à des savanes arbustives. De plus il y a très peu de surfaces protégées localisées dans la classe des « Savanes arbustives » (le nombre de données est de seulement 474 mailles). Il est donc possible que les résultats ne soient pas représentatifs du paysage. Il faut également noter que pour les « Savanes boisées » et les « Savanes arbustives » la moyenne des hauteurs est à peine inférieure à 10m, hauteurs dont la précision d'évaluation par la méthode de Potapov et al, 2020 est reconnue comme très incertaine (cf. 2.2.1.2).

***Figure 23** : Localisation des zones protégées, représentées en rouge, dans la zone "Savanes arbustives"au Cameroun*

3.5.2 Les TFS du Brésil

Pour le Brésil les valeurs des variables de structure augmentent en partant du sud vers le nord (fig 24).

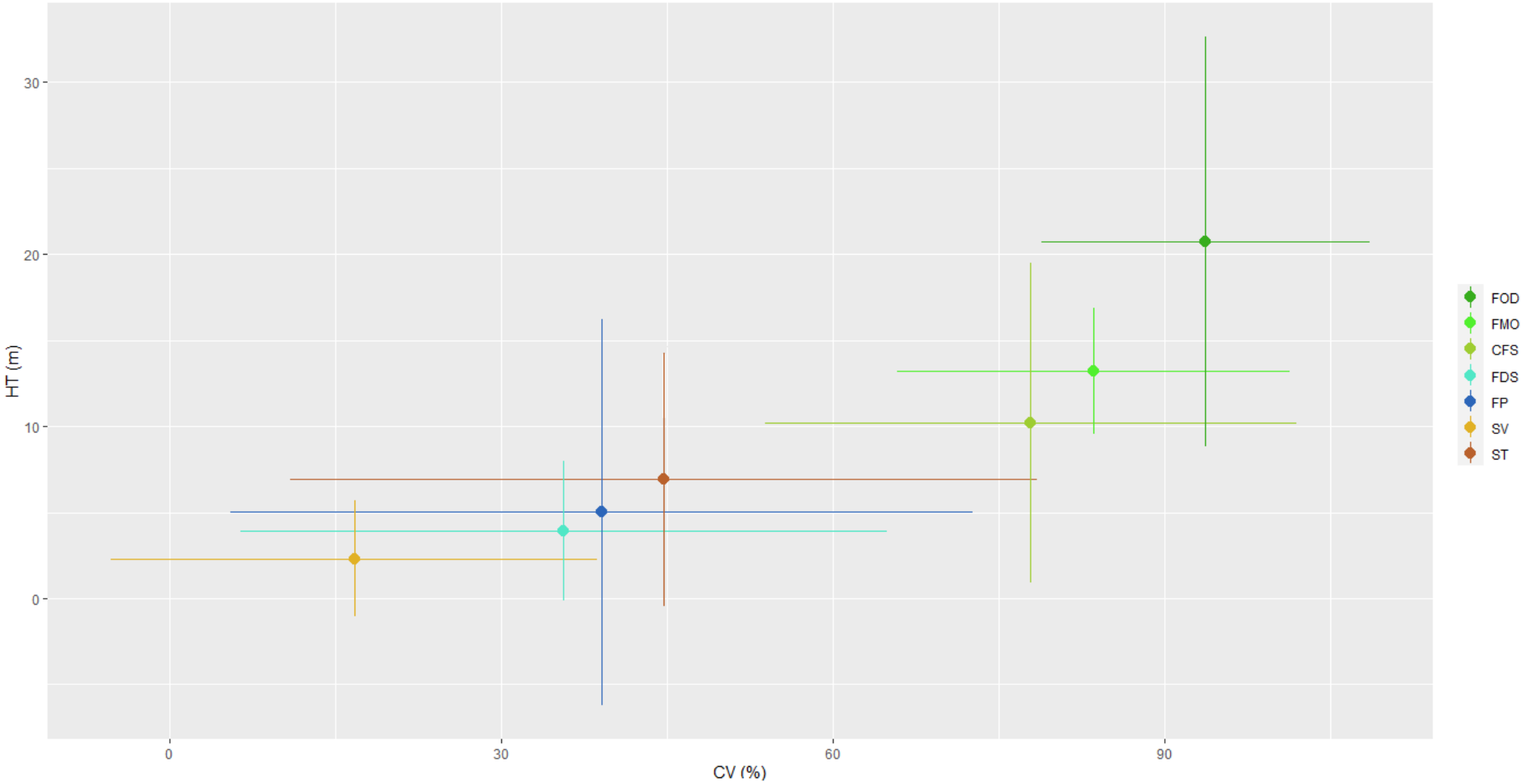


Figure 24 *: Moyennes du pourcentage de couvert végétal et de la hauteur de la canopée avec les écarts-types des TSF du Brésil. Axe x :(CV) moyenne du pourcentage de couvert végétal. Axe y : (HT) moyenne de la hauteur de la canopée en mètres. FOD : « Forêts Ombrophiles OuvertDense », FMO : « Forêts Ombrophiles Mixtes », CFS : « Campinarana & Forêts Sempervirentes, FDS : « Forêts Décidues Semi-décidues », FP : « Formations pionnières », SV : « Savanes », ST : « Steppes »*

Les « Steppes » ont des valeurs plus élevées que celles des « Formations Pionnières », des « Forêts décidues et semi-décidues » et des « Savanes ». Logiquement on s'attendrait à ce que les « Steppes » aient les valeurs les plus faibles. De plus, les valeurs des « Forêts Décidues et Semi-décidues » sont inférieures à celles des « Formations Pionnières ». On s'attendrait à ce que les valeurs des « Forêts Décidues et Semi-décidues » soient supérieures à celles des « Formations Pionnières » mais aussi à celles des « Steppes ». Le résultat peut être expliqué par la localisation géographique des zones protégées (fig 25) :

- « Steppes » : la grande majorité des zones protégées sont situées à l'extrême sud du pays. Si on se réfère à la version détaillée de la carte de végétation du Brésil fournie par l'IBGE (https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa805), il s'agit de zones forestières.
- « Forêts Décidues et Semi-décidues » : cette zone occupe la partie centre et sud du pays. La majorité des zones protégées étudiées se situent dans la partie sud. Si on se réfère à la version détaillée de la carte de végétation du Brésil, il y a beaucoup d'activités agricoles dans cette partie du pays. Même s'il s'agit de zones protégées, il est possible qu'elles soient touchées par les activités agricoles.

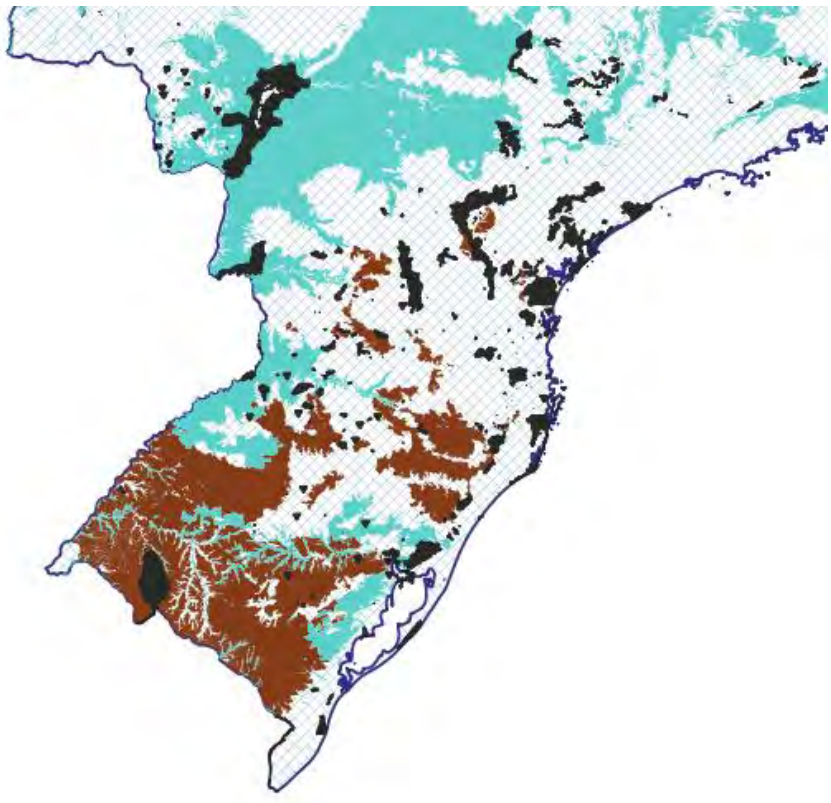


***Figure 25** : Zones protégées étudiées dans l'extrême sud du Brésil. Marron : "Steppes", Bleu : "Forêts Sempervirentes"*

3.5.3 Comparaison entre les TSF du Cameroun et les TSF du Brésil

En comparant les deux pays, on remarque que les valeurs du pourcentage du couvert végétal sont similaires pour chaque unité des TSF. En revanche on remarque également que les valeurs de la hauteur de la canopée du Cameroun sont supérieures à celles du Brésil pour l'ensemble des unités des TSF (fig 26).

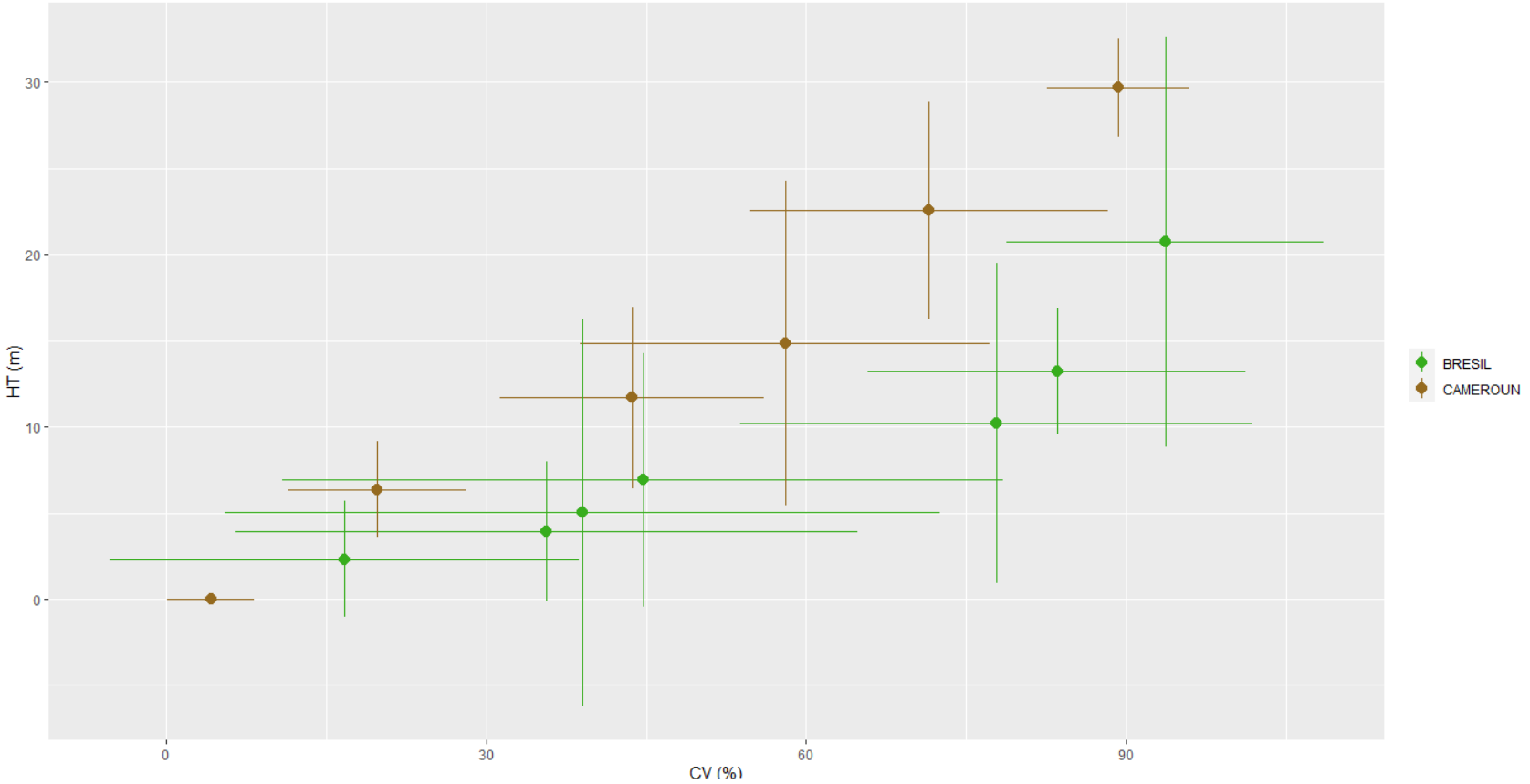


***Figure 26** : Moyennes du pourcentage de couvert végétal et de hauteur de la canopée avec les écarts-types des TSF du Cameroun (vert) et du Brésil (marron). Axe x : (CV) moyenne du pourcentage de couvert végétal. Axe y (HT) moyenne de la hauteur de la canopée en mètres*

3.6 Différences observées entre les zones dégradées et les zones peu perturbées

Cette partie des résultats ne concernera que le cas des TSF issues des TPN au Cameroun.

3.6.1 Les forêts communautaires

Pour la zone « Montagnes Mangroves Savanes de transition » et la zone « Cameroun Centre et Atlantique », les valeurs des variables de structure sont supérieures pour les forêts communautaires. Pour le reste des unités des TSF, ce sont les valeurs des zones protégées qui sont supérieures (fig 27). Dans l'ensemble, les écarts des valeurs entre les zones protégées et les forêts communautaires sont faibles. L'écart entre les hauteurs ne dépasse pas 4 m et l'écart entre les pourcentages de couvert végétal ne dépasse pas 10% à l'exception de la zone « Savanes arbustives » pour laquelle on observe un écart de 20%.

Dans la zone « Nord Cameroun » les valeurs de hauteurs sont nulles. Pour rappel, en dessous de 10m de hauteur, les données de Potapov et al, 2020 fournissent des estimations peu fiables. Il se peut également qu'il n'y ait pas assez de zones boisées pour distinguer la hauteur à partir d'un raster de 30 m de résolution. Il est donc normal de trouver des valeurs nulles dans cette zone sachant qu'il s'agit de steppes et de savanes sahéliennes où les arbres sont le plus souvent très bas et très dispersés.

Malgré le faible écart entre les valeurs, les tests statistiques indiquent que dans l'ensemble il y a une différence significative du pourcentage de couvert et de la hauteur de la canopée entre les zones protégées et les forêts communautaires à l'exception du « Nord Cameroun » (annexe 12).

Les forêts communautaires montrent des niveaux de dégradation variables mais probablement insuffisants pour faire apparaître une différence nette de la structure des forêts avec les zones protégées. Ces résultats nous ont incités à rechercher d'autres types de zones dégradées, à proximité des villes.

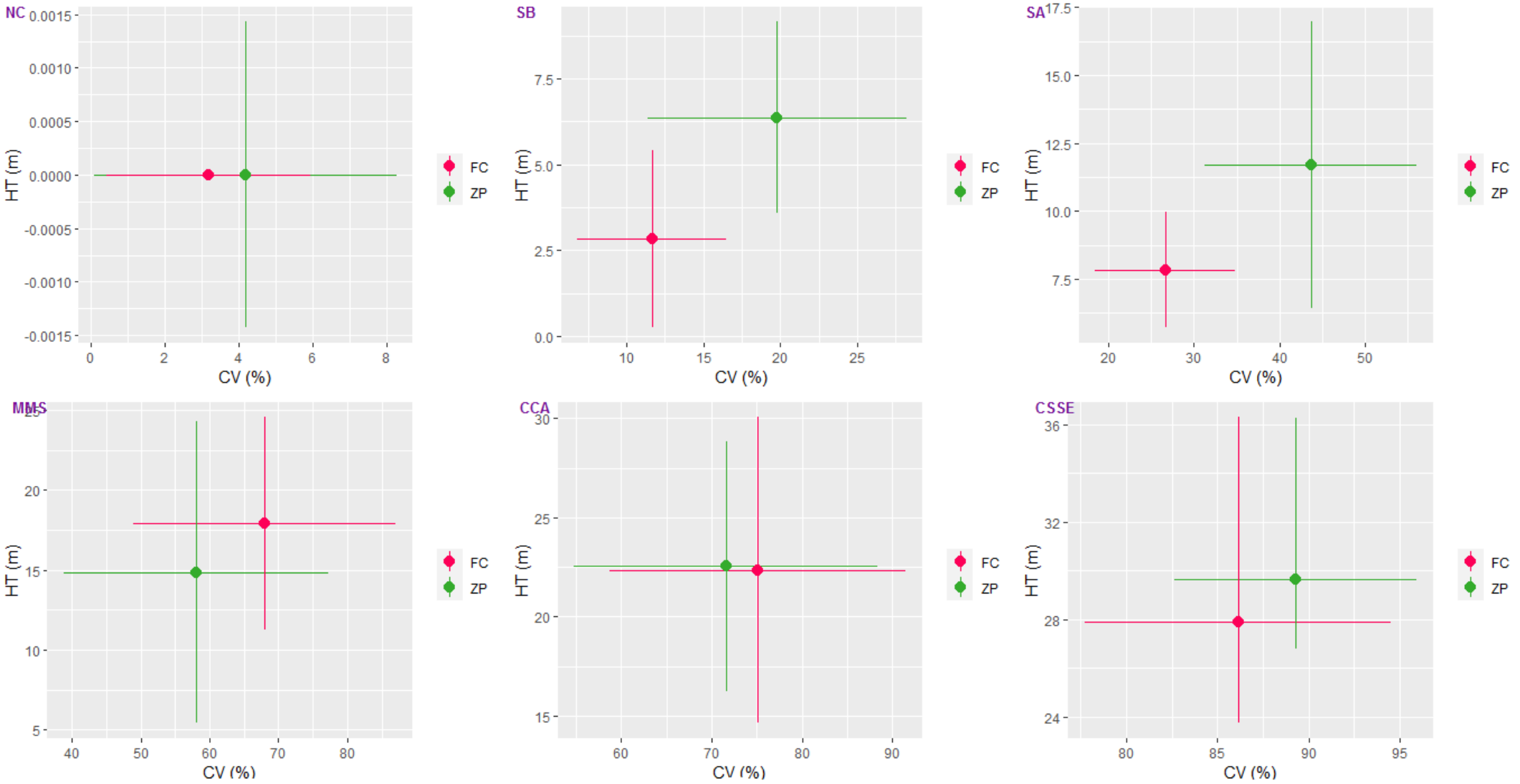


Figure 27 *: Moyennes du couvert végétal et de la hauteur de la canopée avec les écarts-types des zones protégées (ZP) et des forêts communautaires (FC) des TSF issues des TPN au Cameroun. NC : Nord Cameroun, SB : Savanes boisées, SA : Savanes arbustives, MMS : Montagnes Mangroves et Savanes de transition, CCA : Centre Cameroun et Atlantique, CSSE : Cameroun Sud et Sud-Est. Axe y (HT) : moyenne de la hauteur de la canopée en mètres. Axe x (CV) : moyenne du pourcentage du couvert végétal.*

3.6.2 Les zones forestières autour des villes (ZFV)

La figure 28 affiche les mêmes résultats que ceux de la figure 27 à la différence que les valeurs des ZFV ont été rajoutées. Ces zones occupent un rayon de 20km à partir de la bordure des villes. Ce rayon a été divisé en 4 partie de 5 km (cf. matériel et méthodes 2.2.4). Les résultats représentent les valeurs de couvert végétal et de hauteur de la canopée des différentes distances. Ces distances correspondent à 0 à 5 km, 5 à 10 km, 10 à 15 km et 15 à 20 km à partir de la bordure des villes.

Dans l'ensemble, les valeurs des variables de structure des ZFV augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de leur bordure. Les tests de comparaisons multiples indiquent qu'il y a une différence significative entre les distances à l'exception de quelques cas :

- Pourcentage de couvert végétal :
    - « Nord Cameroun » : aucune différence entre 0 et 10 km.
    - « Savanes arbustives » : aucune différence entre 10 et 20 km.
    - « Cameroun Sud et Sud-Est » : aucune différence entre 10 et 20 km.
- Hauteur de la canopée :
    - « Nord Cameroun » : aucune différence entre 0 et 15 km.
    - « Savanes arbustives » : aucune différence entre 10 et 20 km.
    - « Montagnes Mangroves Savanes de transition » : aucune différence entre 0 et 10 km.

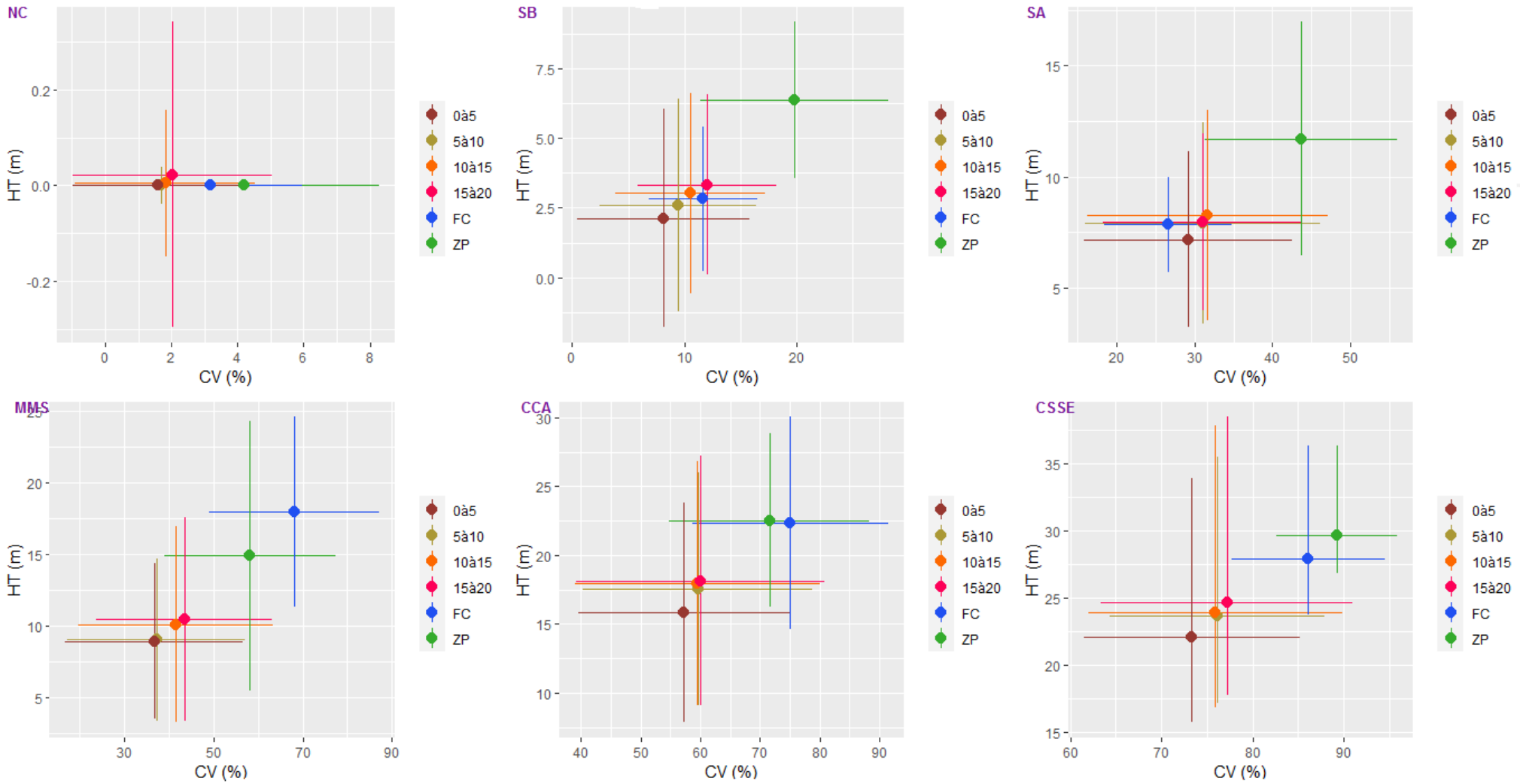


Figure 28 *: Moyennes du pourcentage du couvert végétal et de la hauteur de la canopée des zones protégées (ZP), des forêts communautaires (FC) et des ZFV dans un rayon de 20km (0à5, 10à15,15à20 à partir de la bordure des villes : distances indiquées en kilomètres) des TSF issues des TPN au Cameroun. NC : Nord Cameroun, SB : Savanes boisées, SA : Savanes arbustives, MMS : Montagnes Mangroves Savanes de transition, CCA : Cameroun Centre Atlantique, CSSE : Cameroun Sud et Sud-Est. Axe x : (HT)Moyenne de la hauteur de la canopée en mètres. Axe y : (CV)Moyenne du pourcentage du couvert végétal*

Dans les zones « Savanes boisées » et « Savanes arbustives » les valeurs des variables de structure des forêts communautaires sont au même niveau que celles des ZFV. Cependant les tests statistiques indiquent une différence significative entre ces deux types de données. Dans l'ensemble les valeurs des ZFV restent toutes inférieures aux zones protégées, avec des différences également significatives.

Pour mesurer l'écart des valeurs qu'il y a entre les zones protégées et les zones autour des villes, on ne prend en compte que les distances de 15 à 20 km de leur bordure. Afin de diminuer le risque de prendre en compte des zones urbaines. Pour les zones « Cameroun Centre et Atlantique », « Cameroun Sud et Sud-Est » et « Montagnes Mangroves et Savanes de transition » l'écart est d'environ 15% pour le couvert végétal et de 5 m pour la hauteur de la canopée entre les ZFV et les zones protégées. Pour les zones restantes, qui représentent la partie nord du pays où sont localisées les savanes et les steppes, l'écart est de 20% pour le couvert végétal et de 5 à 7m pour la hauteur de la canopée. La zone « Nord Cameroun » fait exception avec des écarts qui sont négligeables autant pour le couvert végétal que pour la hauteur de la canopée.

4 DISCUSSION

Les résultats obtenus indiquent que le milieu écologique permet de rassembler les forêts en fonction de leur structure. Ce travail de regroupement sur les cartes de typologie phytogéographique nationale (TPN) reflète la variabilité structurelle des forêts au sein des écozones de la FAO. Elles sont les unités écologiques les plus pertinentes pour représenter le milieu écologique à condition qu'elles soient construites à partir de connaissances d'experts issues du terrain. Les écorégions du WWF peuvent remplacer les TPN, lorsqu'elles n'existent pas ou ne sont pas accessibles, à condition d'être retravaillées. Bien que ces écorégions soient incluses au sein des écozones de la FAO, elles visent à représenter la biodiversité et non la variabilité structurelle des forêts. Les données rasters dérivées des images satellites permettent de distinguer structurellement des formations forestières en fonction des grands ensembles écologiques.

4.1 Les zones écologiques permettent de cartographier la structure des forêts à l'échelle d'un pays

Il est possible de constituer des formations forestières homogènes en regroupant les forêts en se basant que sur la structure. Les TPN sont une base solide pour regrouper les forêts en fonction de la structure parce qu'elles mettent en évidence le type de formation forestière. Les TSF issues des écorégions du WWF au Brésil, ont permis de constater que les écorégions du WWF ne mettent pas en évidence les formations forestières (*cf* résultats 3.4). Ces écorégions ont été conçues pour représenter la biodiversité (*c*f Olson et al. 2001). Il est donc possible qu'elles soient hétérogènes en terme de structure forestière. Cependant, quand on observe les TSF au nord du pays en région amazonienne, on constate que les TSF issues des écorégions du WWF distinguent plus de groupes que les TSF issues des TPN. Il est donc possible que mettre en évidence la biodiversité peut également permettre de mieux distinguer les formations forestières en fonction de la structure.

Une perspective serait de vérifier le taux d'hétérogénéité structurelle des forêts au sein même des écorégions du WWF. Si ces écorégions sont fortement hétérogènes il faudrait les retravailler pour qu'elles mettent en évidence des structures forestières homogènes. Il serait possible de le faire en utilisant comme base les écozones de la FAO et des données spatiales représentant des facteurs environnementaux qui caractérisent la végétation. Les écozones de la FAO permettront de délimiter les formations forestières principales. Pour représenter les facteurs de l'environnement il est possible de se baser sur les classifications écologiques qui ont servi à délimiter les écorégions du WWF (*cf* Olson & Dinerstein, 1998 ; Olson et al 2001 et Duffey, 1993) :

- Les biomes de Dinerstein et al, 1995.
- Les zones biogéographiques d'Udvardy, 1975.
- Les provinces floristiques globales de Gleason et Cronquist (ref The Natural Geography of Plants, 1964).

Il existe également des données cartographiques qui délimitent les différents types de milieu écologique par l'intermédiaire d'une approche de stratification écophysiographique (Sayre & Survey, 2014). Ces données ont été construites à partir des différentes strates qui constituent un écosystème[1], combinées avec les caractéristiques climatiques allant du macroclimat à l'écoclimat. On peut aussi y trouver les caractéristiques physiques du sol, liées à la topographie et au substrat géologique. Ces données mettent en évidence les facteurs environnementaux qui caractérisent la végétation et elles sont davantage d'actualité en ce qui concerne les conditions climatiques.

Les données qui représentent les facteurs environnementaux pourront permettre de délimiter des types de formation forestière homogènes en terme de structure.

[1] Correspond au substrat du sol, les eaux souterraines et en surface, le relief, le biote, le topoclimat et le macroclimat (Sayre & Survey, 2014)

4.2 La fiabilité des cartes de typologie structurelle forestière (TSF) pour mettre en évidence des catégories structurelles forestières

Les TSF regroupent des types de végétation qui sont similaires en matière de structure. Le fait qu'elles soient incluses dans les écozones de la FAO indique que le regroupement que j'ai effecté est cohérent. Ainsi les TSF répondent à l'objectif fixé de raffiner les écozones de la FAO du point de vue de la structure des forêts. Le fait que les TSF soit cohérentes montre également que les valeurs des variables de structure des zones protégées peuvent bien représenter des zones naturelles peu perturbées. Au Cameroun, les zones protégées mettent bien en évidence les forêts représentatives du milieu naturel (Grantham et al., 2020). C'est également le cas pour le Brésil même s'il faut garder à l'esprit que dans le biome amazonien certaines zones protégées subissent une pression anthropique qui menace la biodiversité (Paiva et al., 2020).

Les TSF ont des valeurs de couvert végétal et de hauteur de la canopée qui sont cohérentes avec les types de végétation qu'elles représentent, en dehors de quelques exceptions (*cf* résultats 3.5.1 et 3.5.2) :

_ Au Cameroun les valeurs des variables de structure des « Savanes arbustives » sont supérieures à celles des « Savanes boisées ». Dans ce cas il est possible que le problème soit lié à la fiabilité des données structurelles dans les formations végétales de savane. Pour la hauteur de la canopée en dessous de 10 m les données sont peu fiables (*cf* Potapov et al, 2020). Pour le couvert végétal il est possible qu'il y ait une mauvaise classification du couvert végétal étant donné que les savanes ne sont pas considérées comme des forêts selon les critères de classification de Hansen et al, 2008 (*cf* matériel et méthode 2.2.1.).

_ Au Brésil les valeurs des variables du couvert végétal et de la hauteur de la canopée des « Steppes » sont supérieures à celles des « Forêts saisonnières Décidues Semi-décidues », des « Formations Pionnières » et des « Savanes ».

La localisation géographique des zones protégées étudiées peut être la cause de ces observations. Il suffit en effet qu'elles soient situées dans des ensembles forestiers isolés pour que les résultats ne concordent pas avec le type de végétation que les zones protégées sont censées représenter. La structure des forêts seule ne suffit pas pour faire une typologie structurelle forestière suffisamment fiable pour une interprétation poussée. Il est nécessaire de relier la structure à un contexte écologique (Mackey et al., 2021). Le contexte écologique peut être constitué :

_ du biome pour associer les caractéristiques de l'environnement avec la végétation.

_ de l'écotone pour identifier les zones de transition entre les différents types de végétation.

Les critères qui caractérisent les classifications écophysiographiques de Sayre & Survey (cf discussion 4.2) peuvent aider à reconstituer le contexte écologique. Une perspective serait de combiner cette classification avec les TSF. Si la combinaison entre les deux est cohérente, on pourrait relier les TSF à un contexte écologique. Cela permettrait aussi d'avoir une base pour interpréter les confusions entre structure et environnement.

4.3 Les typologies structurelles forestières ont permis de mettre en évidence la différence structurelle des types forestiers entre le Cameroun et le Brésil

Pour chaque unité des TSF, les valeurs de couvert végétal sont au même niveau entre le Brésil et le Cameroun. Par contre les valeurs de hauteurs de la canopée sont plus élevées au Cameroun (*cf* résultats 3.5.3). En dépit des limites des données de hauteur de la canopée de Potapov et al, 2020 cette observation semble correspondre à la réalité, les arbres d'Afrique Centrale étant décrits comme plus hauts que ceux des forêts amazoniennes (Feldpausch et al, 2012) (Lewis et al, 2013). Cependant, à notre connaissance, cela n'a été démontré que pour des forêts denses humides et la question reste posée pour les forêts sèches et ouvertes. Nous n'avons pas trouvé dans la documentation une étude qui ait comparé la hauteur des arbres de différents types de végétation entre différents pays. Les TSF ont permis d'obtenir cette information et de détecter une différence, cela pourrait être étendu et approfondi dans le cadre d'une autre étude.

4.4 Les forêts communautaires et les zones forestières autour des villes (ZFV) peuvent-elles identifier les zones dégradées ?

Les forêts communautaires ne sont pas les zones les plus pertinentes pour représenter la dégradation des forêts. J'ai constaté que les valeurs des variables de leur structure pouvaient être plus élevées que celles des zones protégées (*cf* résultats 3.6.1). Bien que ces forêts soient exploitées, cela ne signifie pas que leur structure soit dégradée de façon notable. Les ZFV sont plus pertinentes pour identifier et quantifier la dégradation que les forêts communautaires. Les valeurs des variables de leur structure sont inférieures à celles des zones protégées et tendent à augmenter au fur et à mesure que l'on s'éloigne des villes.

Bien que les tests indiquent une différence significative entre les zones protégées, les forêts communautaires et les ZFV, l'écart entre les valeurs des variables de structure est trop faible pour permettre de cartographier un seuil de dégradation. Le résultat des tests peut s'expliquer par le nombre de mailles qui se situe entre 10 000 et 300 000. Avec un jeu de données de très grande taille la moindre variabilité peut engendrer une différence significative dans les statistiques. Une alternative serait donc de diminuer la taille du jeu de données.
Les intervalles de confiance dans les résultats sont très grands. Il y a donc trop d'incertitude pour classer une maille en une zone peu perturbée ou en une zone dégradée. Il faut donc diminuer ces incertitudes en augmentant la surface des mailles. Il faut également chercher la

dimension la plus juste afin d'obtenir un écart entre les valeurs des variables de structure assez élevé pour cartographier un seuil de dégradation.

4.5 Les limites des données raster issues des outils de télédétection

Les données raster sur la structure des forêts ont permis de construire les TSF et de les distinguer entre eux. Cependant les résultats sur le Cameroun dans la zone TSF « Nord Cameroun » indiquent que l'on peut suspecter des biais dans ces données pour certains types de structures forestières. Les données du couvert végétal sont issues par inversion d'un signal physique qui répond à une activité photosynthétique (NDVI) (Hansen et al, 2008). Il est très connu que de cette mesure naissent des problèmes de saturation du signal. Les données de hauteur de la canopée sont issues d'un modèle de calibration entre des données satellites Lidar GEDI et des données satellites optiques Landsat (Potapov et al, 2020). En dessous de 10 m les données sont peu fiables, ce qui peut expliquer les problèmes rencontrés dans les savanes au Cameroun. Au-dessus de 30 m on a une sous-estimation des hauteurs qui peut s'expliquer par la saturation des mesures NDVI sur les données Landsat.

Les données issues des outils de télédétection sont une représentation indirecte de la réalité mais pas la réalité elle-même. Il est donc essentiel de savoir quelle est leur origine, comment elles ont été générées et quelles sont leurs limites. Cela permettra de mettre en place des analyses adaptées à ces données et d'éviter les erreurs dans l'interprétation des résultats obtenus.

4.6 Les difficultés rencontrées lors du processus de traitement

Le temps, les outils de géomatique et le support informatique à disposition (ordinateur portable fourni par le Cirad et les conditions de télétravail ne donnaient pas accès à des ordinateurs plus performants), n'ont pas permis de finaliser la totalité des analyses, notamment pour le Brésil. Les premiers tests ont été effectués sur le Cameroun qui n'a pas nécessité des fichiers très volumineux et dont le processus de traitement n'a pas rencontré de problèmes particuliers. C'est quand il a fallu effectuer les tests sur le Brésil que les problèmes de traitement des données se sont manifestés. Cela a commencé avec la carte de végétation qu'il a fallu retravailler ce qui a demandé presque un mois de travail. Par la suite il y a eu les traitements pour récupérer les données de couvert végétal et de hauteur de la canopée sur les fichiers raster qui ont demandé plus d'une semaine. Et enfin faire tourner en une fois, le script utilisé pour concevoir le score d'inclusion, a demandé entre 1h30 et 2h.

Traiter des fichiers vectoriels et des fichiers raster volumineux demande une certaine réflexion sur le choix du processus de traitement des données. A l'avenir, il faudrait repenser les méthodes utilisées dans le processus de traitement. Il faudra au préalable bien analyser les données et réfléchir au type de calcul et à l'algorithme à utiliser. Il conviendrait également d'envisager de travailler avec des logiciels SIG beaucoup plus puissants que QGIS comme ArcGis Pro ou FME (pour automatiser le processus de traitement), et sur un ordinateur ayant une plus grande capacité de mémoire.

CONCLUSION

Pour mettre des subdivisions de formations forestières de taille raisonnable dans les écozones de la FAO, j'ai pu rassembler les formations forestières en fonction de leur structure (couvert végétal et hauteur de la canopée) et ainsi créer des cartes de typologie structurelle forestière (TSF) pour le Cameroun et le Brésil. Comme point de départ, je me suis basée sur des cartes de typologie phytogéographique nationale (TPN), construites à partir de données et de connaissances issues du terrain d'une part, et des écorégions du WWF d'autre part. Les TSF obtenues permettent de mettre en évidence les zones forestières qui sont similaires en terme de structure. Au Brésil, les TSF issues des écorégions du WWF, ont permis de constater que ces écorégions pouvaient renfermer des zones forestières hétérogènes dans des zones où la biodiversité est élevée. Pour que les écorégions du WWF puissent remplacer les TPN, si celles-ci ne sont pas accessibles, il est nécessaire de les retravailler afin qu'elles puissent représenter des formations forestières homogènes. Une perspective serait de vérifier s'il est possible de retravailler les écorégions du WWF en se basant sur les écozones de la FAO et sur des données spatiales qui représentent les facteurs environnementaux qui caractérisent la végétation.

Les données sur la structure des forêts issues d'images satellites ont permis de construire les TSF. Cependant il est nécessaire de prendre en considération leurs limites afin de pouvoir identifier les potentielles erreurs dans les valeurs des variables de structure. Dans le cas du couvert végétal, on se base sur un indice qui mesure l'activité photosynthétique de la végétation. Il n'y a donc pas de distinction entre la canopée et le reste de la végétation située sous la canopée. Dans le cas de la hauteur de la canopée, le modèle utilisé pour générer les valeurs engendre une sous-estimation de la hauteur des arbres au-dessus de 30 m, et en dessous de 10 m, qui correspond à la hauteur des arbres de la plupart des savanes, une surestimation de la hauteur.

Pour finir, les résultats au Cameroun montrent qu'il est possible d'étudier des gradients de dégradation dans les zones forestières situées à 20 km de la bordure des villes. Cependant il y a un faible écart des valeurs des variables de structure par rapport aux zones protégées, considérées comme des zones naturelles peu perturbées. Ceci peut être dû aux imprécisions des données de structure et de l'hétérogénéité de la végétation dans les zones étudiées. Pour définir un seuil de dégradation il faudrait travailler avec des données spatiales plus précises pour pouvoir décrire en détail les particularités du terrain.

BIBLIOGRAPHIE

AHOUTOU, C. (2021). *Définitions de la forêt et leurs déclinaisons dans l'approche HCS pour appliquer la Stratégie Nationale de lutte contre la Déforestation Importée*.

Al, A. A. et. (n.d.). *LA DEFORESTATION IMPORTEE RAPPORT D ' ETUDE*. 1–48.

Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N. D., Wikramanayake, E., Hahn, N., Palminteri, S., Hedao, P., Noss, R., Hansen, M., Locke, H., Ellis, E. C., Jones, B., Barber, C. V., Hayes, R., Kormos, C., Martin, V., Crist, E., … Saleem, M. (2017). An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm. *BioScience*, *67*(6), 534–545. https://doi.org/10.1093/biosci/bix014

Duffey, E. (1993). Global biodiversity: Status of the earth's living resources. *Biological Conservation*, *66*(2), 145. https://doi.org/10.1016/0006-3207(93)90147-s

E.Dinerstein et al. (1995). A Conservation Assessment of the Terrestrial Ecoregions of Latin America and the Caribbean. *World Bank*.

FAO. (2016). Situation des forêts du monde 2016 - Forêt et agriculture: défis et possibilités concernant l'utilisation des terres. In *Forêt et agriculture: défis et possibilités concernant l'utilisation des terres*. http://www.fao.org/3/a-i5588f.pdf

FAO. (2020). *Evaluation des ressources forestières mondiales, 2020*.

FAO Département des forêts. (2010). *Evaluation des ressources forestières mondiales 2010 : termes et définitions*. 30 p. http://www.fao.org/docrep/014/am665f/am665f00.pdf

Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Lewis, S. L., Brienen, R. J. W., Gloor, M., Monteagudo Mendoza, A., Lopez-Gonzalez, G., Banin, L., Abu Salim, K., Affum-Baffoe, K., Alexiades, M., Almeida, S., Amaral, I., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo Murakami, A., Arets, E. J. M., Arroyo, L., Aymard C., G. A., … Phillips, O. L. (2012). Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*, *9*(8), 3381–3403. https://doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012

Food and Agriculture Organization [FAO]. (2001). Global Ecological Zoning for the Global Forest Resources Assessment 2000. *Forest Resources Assessment Working Paper*, *56*, 211. ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/ad652e/ad652e00.pdf

Food and Agriculture Organization [FAO]. (2012). Global ecological zones for FAO forest reporting: 2010 Update. *Forest Resources Assessment Working Paper 179*, 42. http://www.fao.org/docrep/017/ap861e/ap861e00.pdf

Grantham, H. S., Shapiro, A., Bonfils, D., Gond, V., Goldman, E., Maisels, F., Plumptre, A. J., Rayden, T., Robinson, J. G., Strindberg, S., Stokes, E., Tulloch, A. I. T. T., Watson, J. E. M., Williams, L., & Rickenbach, O. (2020). Spatial priorities for conserving the most intact biodiverse forests within Central Africa. *Environmental Research Letters*, *15*(9). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9fae

Hansen, M. C., DeFries, R. S., Townshend, J. R. G., Carroll, M., Dimiceli, C., & Sohlberg, R. A. (2003). Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. *Earth Interactions*, *7*(10), 1–15. https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:gptcaa>2.0.co;2

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change.

Science, *342*(6160), 850–853. https://doi.org/10.1126/science.1244693

Hansen, Matthew C., Roy, D. P., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C. O., & Altstatt, A. (2008). A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. *Remote Sensing of Environment*, *112*(5), 2495–2513. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.11.012

Helms M., Prüller, R. (Eds.), J. in K. D. (2002). Forest Terminology: Living Expert Knowledge. How to\rGet Society to Understand Forest Terminology. *Proceedings of the 6.03.02/SilvaVoc Group Session at the IUFRO World Congress 2000, IUFRO Occasional Paper 14*, 3.

Lewis, S. L., Sonké, B., Sunderland, T., Begne, S. K., Lopez-Gonzalez, G., van der Heijden, G. M. F., Phillips, O. L., Affum-Baffoe, K., Baker, T. R., Banin, L., Bastin, J. F., Beeckman, H., Boeckx, P., Bogaert, J., De Cannière, C., Chezeaux, E., Clark, C. J., Collins, M., Djagbletey, G., … Zemagho, L. (2013). Above-ground biomass and structure of 260 African tropical forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *368*(1625). https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0295

Lund, H. G. (1999). A “forest” by any other name... *Environmental Science and Policy*, *2*(2), 125–133. https://doi.org/10.1016/S1462-9011(98)00046-X

Mackey, B., Skinner, E., & Norman, P. (2021). *A Review of Definitions, Data, and Methods for Country-level Assessment and Reporting of Primary Forest A Discussion Paper for the Food and Agriculture Organisation of the United Nations*. *March*, 1–26.

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D’Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *BioScience*, *51*(11), 933–938. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2

Olson, David M., & Dinerstein, E. (1998). The global 200: A representation approach to conserving the earth’s most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology*, *12*(3), 502–515. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1998.012003502.x

Paiva, P. F. P. R., de Lourdes Pinheiro Ruivo, M., da Silva Júnior, O. M., de Nazaré Martins Maciel, M., Braga, T. G. M., de Andrade, M. M. N., dos Santos Junior, P. C., da Rocha, E. S., de Freitas, T. P. M., da Silva Leite, T. V., Gama, L. H. O. M., de Sousa Santos, L., da Silva, M. G., Silva, E. R. R., & Ferreira, B. M. (2020). Deforestation in protect areas in the Amazon: a threat to biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, *29*(1), 19–38. https://doi.org/10.1007/s10531-019-01867-9

Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Silva, C. E., Armston, J., Dubayah, R., Blair, J. B., & Hofton, M. (2020). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, *253*(October 2020), 112165. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165

Potapov, P., Yaroshenko, A., Turubanova, S., Dubinin, M., Laestadius, L., Thies, C., Aksenov, D., Egorov, A., Yesipova, Y., Glushkov, I., Karpachevskiy, M., Kostikova, A., Manisha, A., Tsybikova, E., & Zhuravleva, I. (2008). Mapping the world’s intact forest landscapes by remote sensing. *Ecology and Society*, *13*(2). https://doi.org/10.5751/ES-02670-130251

Sayre, R., & Survey, U. S. G. (2014). A New Map of Global Ecological Land Units — An Ecophysiographic Stratification Approach. *Association of American Geographers*.

SNDI. (2018). *Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée 2018-2030*.

UNFCCC. (2002). *Report of the Conference of the Parties on its seventh session, held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001*. *183*(11), 1–69. https://doi.org/10.1503/cmaj.109-3944

ANNEXES

Listes des annexes

Annexe 1 : Carte phytogéographique de R.Letouzey 1959

Annexe 2 : Carte phytogéographique de R.Letouzey 1985

Annexe 3 : Carte phytogéographique du Brésil (IBGE, 2004)

Annexe 4 : Ecorégions du WWF au Cameroun

Annexe 5 : Ecorégions du WWF au Brésil

Annexe 6 : Score d'inclusion. Script du processus

Annexe 7 : Résultats CAH et K-means des typologies phytogéographiques nationales au Cameroun

Annexe 8 : Résultats CAH et K-means des écorégions du WWF au Cameroun

Annexe 9 : Résultats CAH et K-means des typologies structurelles nationales au Brésil

Annexe 10 : Résultats CAH et K-means des écorégions du WWF au Brésil

Annexe 11 : Résultats du test de comparaison multiple avec correction de Bonferroni pour les TSF

Annexe 12 : Test de comparaison entre les zones protégées et les forêts communautaires au Cameroun

Annexe 13 : Test de comparaison multiple entre les distances des zones forestières autours des villes

Annexe 14 : Test de comparaison de moyenne entre les zones protégées et les zones forestières de 15 à 20 km de la bordure des villes au Cameroun

Annexe 15 : Moyennes de pourcentage de couvert végétal et de hauteur de la canopée en mètres, des TSF issues des TPN au Cameroun. Intervalle de confiance calculée sur la variance des moyennes

Annexe 16 : Moyennes de pourcentage de couvert végétal et de hauteur de la canopée en mètres, des TSF issues des TPN au Brésil. Intervalle de confiance calculée sur la variance des moyennes.

Annexe 17 : Moyennes du pourcentage du couvert végétal et de la hauteur de la canopée en mètres, des zones protégées et forêts communautaires des TSF issues des TPN au Cameroun. Intervalle de confiance

Annexe 18: Moyennes du pourcentage du couvert végétal et de la hauteur de la canopée en mètres, des zones protégées, forêts communautaires et des ZFV des TSF issues des TPN au Cameroun. Intervalle de confiance calculée sur la variance des moyennes

Annexe 19 : Carte de la typologie structurelle forestière du Cameroun. Issue des typologies phytogéographiques nationales

Annexe 20 : Carte de la typologie structurelle forestière du Brésil. Issue des typologies phytogéographiques nationales