

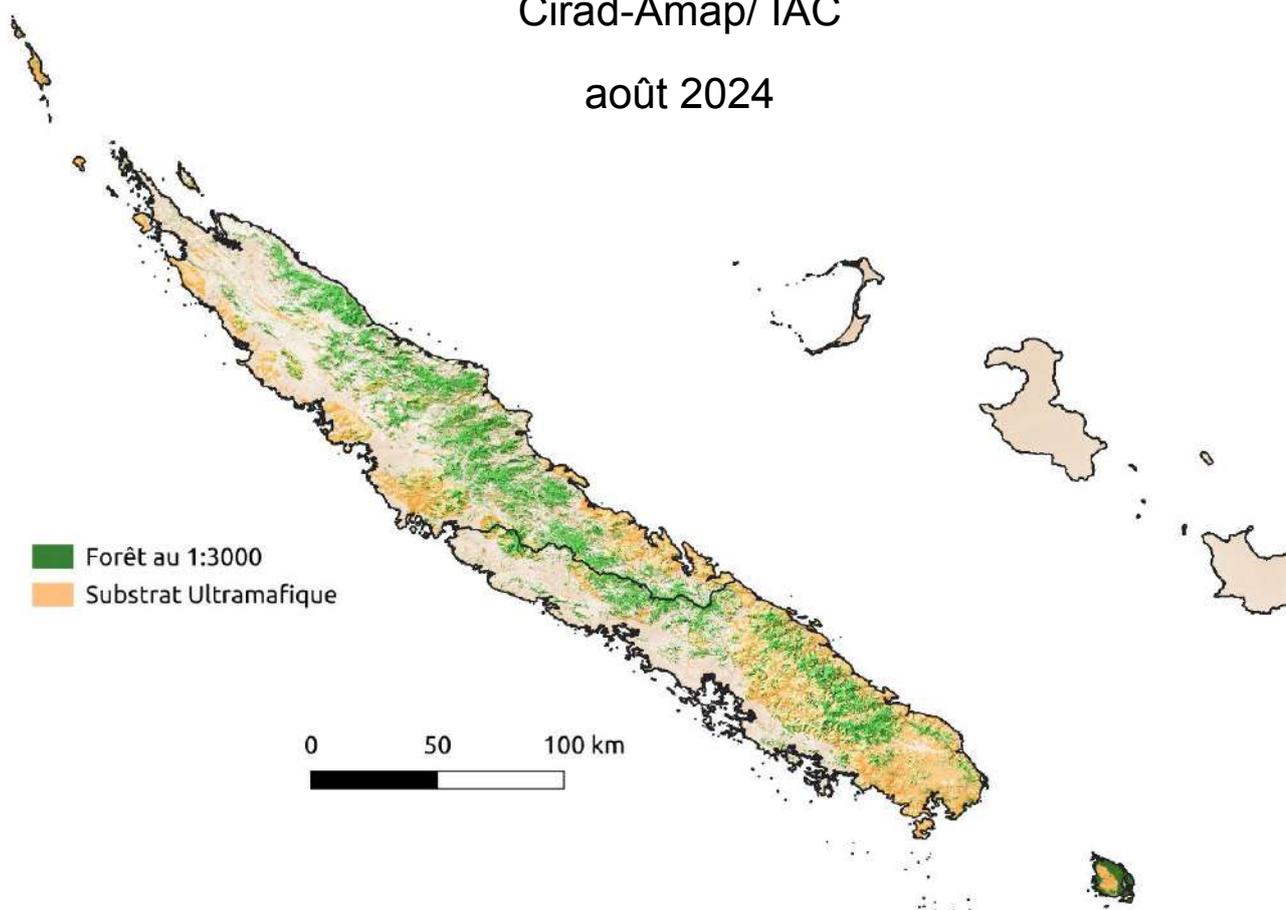
ARTENSIS

Elaboration d'outils cARTographique de gEstion des forêts NaturelleS en provInce Sud

par Philippe Birnbaum

Cirad-Amap/ IAC

août 2024



Contexte

Cette convention ARTENSIS financée par la province Sud et réalisée en partenariat entre le Cirad-AMAP et l'IAC, complète la carte de la forêt telle qu'elle a été publiée en 2021 et analysée dans le cadre de l'Atlas de la forêt en Nouvelle-Calédonie - province Nord (projets COGEFOR et ADMIRE).

Une telle cartographie des écosystèmes forestiers constitue un outil fondamental d'aide à la décision en amont de l'élaboration des documents d'urbanisme et pour l'instruction des projets susceptibles de porter atteinte à ces écosystèmes. Associée aux travaux définis dans cette convention, elle a notamment vocation à anticiper l'évolution future de la couverture forestière en province Sud et permettre ainsi l'identification des secteurs à protéger prioritairement (lutte contre les feux, les espèces envahissantes, maîtrise de l'urbanisation, optimisation des contours des aires protégées) et nécessitant des actions de restauration écologique.

Ce rapport final détaille les opérations menées par l'UMR-AMAP et l'IAC pour produire la carte de la forêt et les sous-produits qui conduisent à identifier les zones d'intérêt pour la conservation. Les produits délivrés dans ce projet sont publiés sur la plateforme Zenodo qui permet de télécharger librement les jeux de données complets et de disposer d'un DOI (Digital Object Identifier) immuable pouvant être cité dans des publications internationales. Ces jeux de données ont été générés, analysés et validés en utilisant une suite d'outils logiciels open-source, incluant QGIS, PostgreSQL, PostGIS, Python et la bibliothèque GDAL, sur une plateforme Linux.

Ce rapport est une version détaillée des 5 publications suivantes :

- ◆ Birnbaum, P., Girardi, J., Justeau-Allaire, D., Ibanez, T., Hequet, V., Eltabet, N., & Prior, J. (2024). Forest Map of New Caledonia (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12731044>
- ◆ Birnbaum, P., & Ibanez, T. (2024). Holdridge Life Zones Classification in New Caledonia Habitats (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12731521>
- ◆ Birnbaum, P., Carnevali, M., & Blanchard, G. (2024). Potential Tree Species Richness in the Forests of New Caledonia (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12739429>
- ◆ Birnbaum, P., Hequet, V., Ibanez, T., Eltabet, N., & Prior, J. (2024). Classification of New Caledonian Forests According to Edge and Elevation Effects (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12739730>
- ◆ Birnbaum, P. (2024). Forest Hotspots in the Biodiversity Hotspot of New Caledonia (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12740617>

1) La carte de la forêt

La carte de la forêt constitue le socle de l'étude à partir duquel il est possible de calculer la superficie totale, de mesurer l'état de la fragmentation et les zones prioritaires de conservation. L'effort est donc porté sur la validation de cette carte en s'assurant que chaque fragment est précisément délimité dans l'espace géographique, mais également qu'il répond à une définition normalisée et universelle.

Définition

La "forêt" est ici définie comme l'ensemble des formations arborées qui forment une canopée continue ne permettant pas de distinguer le sol sur les images aériennes. Vue depuis le ciel, cette forêt prend la forme d'un ensemble plus ou moins continu, composé d'un assemblage de couronnes d'arbres contiguës. Elle présente un grain de canopée irrégulier qui reflète à la fois l'hétérogénéité du mélange d'arbres (constitué d'espèces différentes ayant de petites, moyennes ou grandes couronnes avec une gamme étendue de tons de vert), et celle de la dynamique incluant les trouées causées par la mort (volis) ou la chute (chablis) des arbres les plus âgés. Ce grain hétérogène s'oppose nettement au grain plus lisse et homogène des formations composées de peu d'espèces telles que les savanes, les mangroves, les plantations ou encore les invasions biologiques.

Ces propriétés sont réunies sous le terme "couvert forestier" sans distinguer la composition floristique, car la canopée ne contient qu'une portion restreinte du panel des arbres. La forêt s'appuie ici sur la définition de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO - Food and Agriculture Organisation) qui ne distingue pas les composantes, mais uniquement la structure (une superficie minimale de 0.5 ha, une hauteur minimale de 5 m et une densité >10 %), définition que nous adaptons en excluant les formations pour lesquelles le sol est visible.

En résumé, nous considérons toutes les formations arborées comme appartenant à la classe forêt, quelle que soit leur composition floristique, à l'exception des plantations & des mangroves. Les formations constituées principalement d'espèces exotiques, qui se distinguent nettement par leur canopée homogène comme les plantations de pins des Caraïbes, sont également exclues.

Méthode

La carte de la forêt est réalisée par la digitalisation du couvert forestier à très haute résolution. Il s'agit d'une donnée vectorielle produite par l'UMR AMAP à partir d'une combinaison de données radiométriques avec les cartes déjà existantes, qu'elles soient issues d'images matricielles ou vectorielles. Cette combinaison est suivie d'une phase de digitalisation à l'échelle 1:3000 en se basant sur la couverture aérienne (BDPHOTO-NC) disponible sur le site de la DITTT (georep.nc). Pour plus d'informations, il convient de parcourir les rapports précédents, notamment les ouvrages réalisés en province Nord ([Birnbaum et al., 2015](#); [Birnbaum et al., 2022](#)) qui détaillent les principes de la délimitation

des formations arborées.

Chaque polygone digitalisé est ensuite qualifié, voire scindé ou supprimé, par une phase de photo-interprétation experte. Un polygone est considéré comme appartenant à la classe forêt, si la canopée est suffisamment 1) Haute, en considérant l'ombre portée autour de chaque couronne, 2) Hétérogène, avec des couronnes petites et grandes, de différentes couleurs et 3) et Continue, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de distinguer le sol.

Si cette classification est robuste dans la grande majorité des cas, notamment dans la forêt continue qui couvre la chaîne centrale, les limites sont parfois difficiles à discerner dans les zones plus fragmentées de basse altitude ou aux abords des infrastructures humaines. L'interprétation experte s'appuie alors sur les éléments du milieu, tels que la topographie, les rivières, les émergences de roches, voire certaines pistes ou routes comme un séparateur. En conséquence, plus la forêt à digitaliser se situe à proximité de zones soumises à l'influence anthropique, plus le nombre de polygones est élevé et plus leur délimitation et leur validation sont délicates à établir. L'interprétation experte doit alors prendre en compte la présence d'espèces végétales envahissantes, de plantations ou toute autre formation arborée qui s'apparente à de la forêt et qui peut induire un biais dans la classification.

Une attention particulière est appliquée à tous les petits polygones (< 1 ha), ceux qui sont isolés (distants de plus d'un kilomètre d'un autre polygone) et ceux qui sont inclus dans un diamètre de 2 km autour des agglomérations, afin de s'assurer d'exclure ceux qui représentent les petits bosquets trop déconnectés de la forêt naturelle. Là encore, la limite est définie par l'expertise qui distingue les fragments selon les trois critères et leur connexion avec la grande forêt. Finalement, une distance minimale de 10 m a été fixée entre tous les fragments, ce qui signifie qu'en deçà de ce seuil, les fragments ont été fusionnés.

Validation

Cette carte est ensuite corrigée et validée par une série de tests orchestrés autour de :

- 1) données de végétation :
 - a) près de 10 000 points issus de spécimens de l'Herbier de Nouvelle-Calédonie (NOU), postérieurs à 2009 et mentionnant explicitement, en français ou en anglais, les termes 'arbre' et 'forêt' dans la description du collecteur sont considérés comme des révélateurs positifs ;
 - b) plus d'un millier de points d'inventaires réalisés depuis 2009, soit en maquis, soit en forêt, servant respectivement de révélateur négatif ou positif ;
 - c) vérifications effectuées sur le terrain, notamment dans les talwegs qui sont des lieux ombrés dont il est plus difficile de discerner la structure depuis les photographies aériennes.
- 2) produits radiométriques :
 - a) le jeu de données "*Tropical Rainforest Cover Change (TMF)*" qui propose une

- analyse de l'évolution du couvert forestier à l'échelle mondiale à partir de l'étude radiométrique d'image Landsat sur une série temporelle de 41 années (Vancutsem et al., 2021) ;
- b) le jeu de données "A high-resolution canopy height model of the Earth (ETH)" qui fournit une carte mondiale de la hauteur globale de la canopée établie à partir de l'extrapolation à des images Sentinel-2, de données LIDAR embarqués sur la Station Spatiale Internationale (GEDI/NASA) (Lang et al., 2023) ; ce jeu de données est utilisé pour révéler les zones ayant une canopée supérieure à 5 m
 - c) La combinaison de ces deux produits évalués ensemble sur une grille de 2 km² est confrontée à notre carte de forêt avec une vérification de chaque polygone lorsque la divergence dans la superficie réelle de forêt dépasse 15 % ;

Après ces phases de validation, un total de 1 564 polygones, soit à peine discernables sur les images, soit présentant une texture de canopée homogène, ont été vérifiés visuellement par un survol en hélicoptère. Enfin, la topologie est vérifiée sur la version de référence produite à l'échelle de 1:3000 selon le système universel WGS84 (EPSG:4326) mais également sur la version projetée en UTM zone 58S (EPSG:32758) avec une simplification à 5, 10 et 15 m pour permettre son utilisation, sans erreur, dans une version allégée.

Produit final :

La carte de la forêt est un fichier vecteur compatible avec un système SIG-ESRI, utilisant le système de coordonnées international WGS84 (Figure 1).

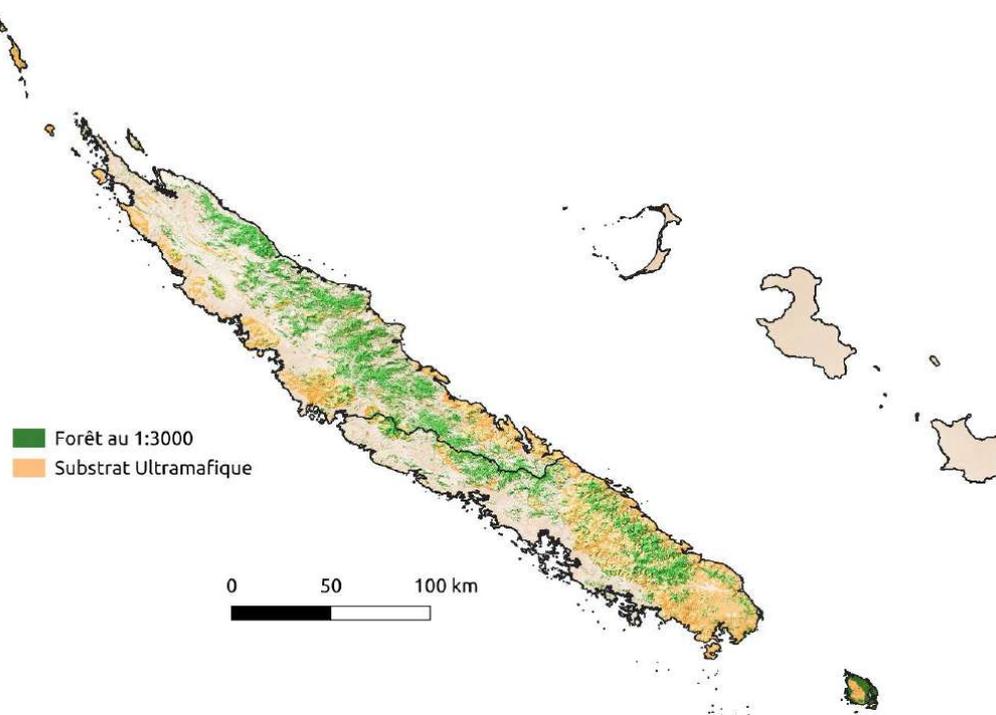


Figure 1 : la forêt de la Grande-Terre digitalisée à l'échelle du 1:3000 en suivant la définition proposée par la FAO (les îles loyautés ne sont pas couvertes par cette carte)

La table attributaire contient les colonnes suivantes :

Colonne	Type	Description
id	INTEGER	identifiant unique
pn	BOOLEAN	Vrai ou faux, indiquant si le polygone chevauche les limites administratives de la province Nord
ps	BOOLEAN	Vrai ou faux, indiquant si le polygone chevauche les limites administratives de la province Sud
pil	BOOLEAN	Vrai ou faux, indiquant si le polygone chevauche les limites administratives de la province des îles
area_ha	NUMERIC	Aire totale du polygone en hectares
dry_ha	NUMERIC	Aire du polygone en hectares incluse dans la zone de vie sèche (dry selon la classification de Holdridge)
moist_ha	NUMERIC	Aire du polygone en hectares incluse dans la zone de vie humide (moist selon la classification de Holdridge)
rain_ha	NUMERIC	Aire du polygone en hectares incluse dans la zone de vie pluvieuse (rain selon la classification de Holdridge)
created_by	TEXT	Créateur du polygone
date_creat	DATE	Date à laquelle le polygone a été créé
date_updat	DATE	Date à laquelle le polygone a été modifié

Limitations :

Aujourd'hui, la carte de la forêt ne concerne que les provinces Sud et Nord. Le processus et les méthodes restent les mêmes. La complétude de cette carte pour toute la Nouvelle-Calédonie ne dépend que de la volonté des gestionnaires environnementaux de la province des îles.

Citation :

Birnbaum, P., Girardi, J., Justeau-Allaire, D., Ibanez, T., Hequet, V., Eltabet, N., & Prior, J. (2024). Forest Map of New Caledonia (Version 2024) [Data set]. Zenodo.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.12731044>

2) Les zones de vie

Les zones de vie permettent de distinguer les fragments forestiers selon les conditions bioclimatiques. En effet, la structure et la richesse des forêts s'ajustent en premier lieu avec les ressources disponibles, notamment la température et l'humidité qui constituent des facteurs limitants essentiels à l'origine d'un important filtre environnemental sur la capacité de développement des espèces d'arbres.

Définition

Pour définir les conditions de vie, nous utilisons la classification internationale de la botaniste et climatologue Leslie R. Holdridge en 1947 qui définit le concept de zone de vie comme suit : *"Une zone de vie est un groupe d'associations végétales au sein d'une division naturelle du climat, qui sont faites en tenant compte des conditions édaphiques et des étapes de succession, et qui ont une physionomie dans n'importe quelle partie du monde"*.

Ce système propose de classer les écosystèmes terrestres en fonction de trois principaux facteurs climatiques : 1) la température moyenne annuelle, 2) les précipitations annuelles totales et 3) l'évapotranspiration potentielle (ETP, évaporation du sol qui pourrait se produire si l'eau était disponible en quantité non limitée). La combinaison de ces trois facteurs permet de prédire quels types de végétation et d'écosystèmes peuvent se développer dans chacune de ces zones.

Méthode

Pour réaliser cette classification pour la Nouvelle-Calédonie, nous avons utilisé les données de précipitations fournies par météo-France (modèle AURELHY) et les données de températures et d'évaporation potentielle fournies par *The Global Climate Data* (WORLDCLIM). La combinaison de ces deux variables d'entrée permet de définir cinq zones de vie en Nouvelle-Calédonie (*very dry, dry, moist, wet et rain*). Si la classification conduit à définir cinq zones de vie distinctes (*very dry, dry, moist, wet et rain*), les deux classes extrêmes, les zones de vie extrêmes (*very dry et rain*) représentent moins de 0.5 % de la superficie de la Grande-Terre de sorte que nous avons fusionné les classes *very dry* et *dry* dans la classe "sec", et les classes *wet et rain* dans la classe "pluvieuse" (Figure 2).

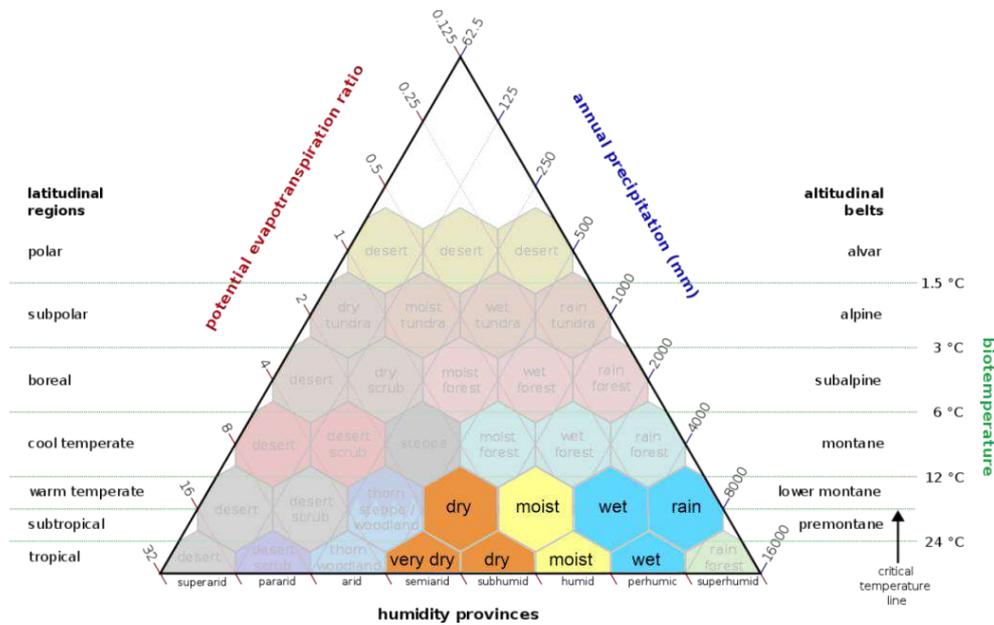


Figure 2 : les zones de vie selon la classification de Holdridge (1947). Trois zones de vies sont retenues en Nouvelle-Calédonie : zone sèche (*very dry/dry*), zone humide (*moist*) et zone pluvieuse (*wet/rain*)

Produit final :

Le produit final est un raster GeoTIFF projeté selon le système de coordonnées international WGS84 (Figure 3). Il se compose d'une seule bande avec trois classes distinctes, codifiées comme suit :

1. Zone de vie sèche
2. Zone de vie humide
3. Zone de vie pluvieuse

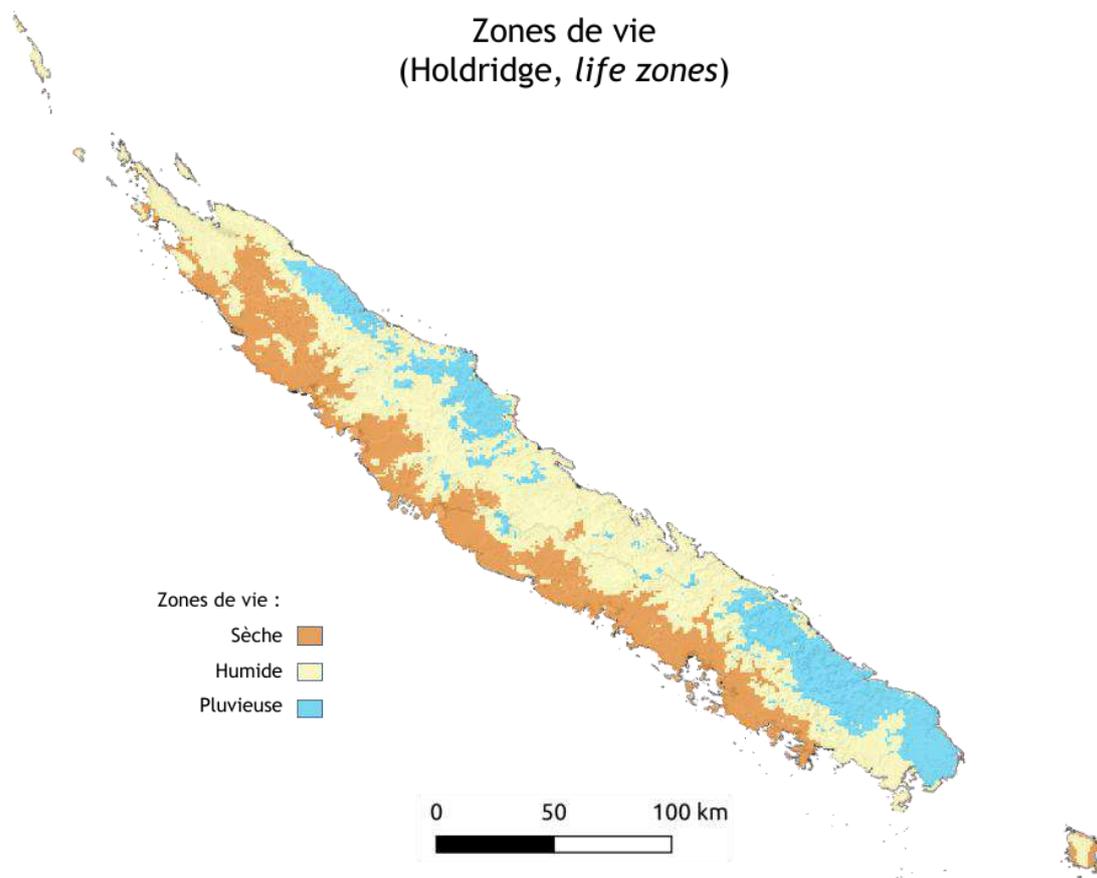


Figure 3 : distribution des zones de vie selon la classification de Holdridge.

Limitations :

Cette classification s'applique à une maille de 1 km² avec des données météorologiques de résolution et précisions différentes. Il convient de prendre en compte que les modèles utilisés AURELHY et WORLDCLIM sont tous les deux basés sur des extrapolations et des modélisations de sorte que cette carte est utile comme un support plus que pour se fier aux limites strictes.

Citation :

Birnbaum, P., & Ibanez, T. (2024). Holdridge Life Zones Classification in New Caledonia Habitats (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12731521>

3) La richesse potentielle

Dans l'objectif de définir les zones d'intérêt pour la conservation de la forêt, il est nécessaire de disposer d'une vision de la distribution géographique de la richesse floristique des communautés d'arbres. Pour estimer, le nombre d'espèces d'arbres que l'on peut trouver sur une superficie donnée, nous utilisons un modèle probabiliste de distribution empilé des espèces (S-SDM, ou *stacked species distribution model* en anglais) construit à partir de nos jeux de données d'occurrences. A l'aide de ce modèle, nous pouvons proposer une carte de la distribution potentielle de la richesse biologique en arbres dans les forêts de Nouvelle-Calédonie à une résolution de 1 ha.

Définition :

Un S-SDM représente la combinaison de plusieurs modèles individuels de distribution d'espèces (SDM, *species distribution models*). Chaque SDM prédit les secteurs dans lesquels une espèce peut se trouver en fonction de facteurs environnementaux (Ex : température, pluviométrie, altitude, substrat...). Une fois que ces modèles individuels sont construits, ils sont ensuite "empilés" sur une grille de 1 ha pour donner une vue d'ensemble de la distribution potentielle de la richesse floristique pour chaque cellule de la grille.

Méthode :

Pour chacune des 1281 espèces d'arbres de Nouvelle-Calédonie, nous avons compilé la somme des occurrences disponibles dans les bases de données du laboratoire Amap, notamment l'herbier (NOU) et le réseau des parcelles permanentes (NC-PIPPN). Le modèle de richesse étant calculé sur une maille de 1 ha, une seule occurrence par espèce est conservée pour chaque hectare et seules les espèces disposant d'un minimum de 4 occurrences ont été conservées.

Au final, notre jeu de données compte 136 808 occurrences pour 1 112 espèces d'arbres. Pour chacune de ces occurrences, nous avons collecté sept variables environnementales (pluviométrie, pente, altitude, index d'humidité (cti), ensoleillement moyen, substrat et distance à la côte est) et dresser pour chaque espèce le profil de sa niche environnementale réalisée (= tolérances environnementales). Le modèle de distribution de chaque espèce (SDM) est obtenu en projetant ce profil environnemental à l'échelle de la Grande-Terre.

Chaque SDM est créé en utilisant le package R, SSDM (Schmitt et al., 2017) qui accepte en entrée les coordonnées d'occurrences (longitude, latitude) et les sept variables environnementales sous la forme de raster (GeoTiff). Pour chaque espèce, un SDM d'ensemble (ESDM) a été réalisé en se basant sur neuf modèles indépendants : modèle linéaire généralisé (GLM), modèle additif généralisé (GAM), splines de régression adaptative multivariée (MARS), modèle boosté généralisé (GBM), analyse de classification d'arbres (CTA), entropie maximum (MAXENT), machine à vecteurs de support (SVM) et réseau de neurones artificiels (ANN). Des pseudo-absences ont été générées en suivant les recommandations de Barbet-Massin et al. (2012). La carte de

probabilité de présence a été convertie en carte binaire de présences/absences par la méthode SES (*sensitivity-specificity equality*), seuil fixé pour chacun des modèles en se basant sur une égalité entre l'indice de sensibilité et l'indice de spécificité. Se référer à [Schmitt et al. \(2017\)](#) pour plus d'informations sur les paramètres par défaut de chaque modèle et les méthodes sous-jacentes. Enfin, dans chaque cellule de 1 ha, nous avons additionné les probabilités de présence brutes des espèces et produit le modèle probabiliste (pSSDM) de la richesse floristique ([Figure 4](#)).

Produit final :

Le produit final est un raster GeoTIFF projeté selon le système de coordonnées international WGS84. Il se compose d'une seule bande avec une valeur décimale continue qui varie de 34.895 à 348.677 espèces potentielles.

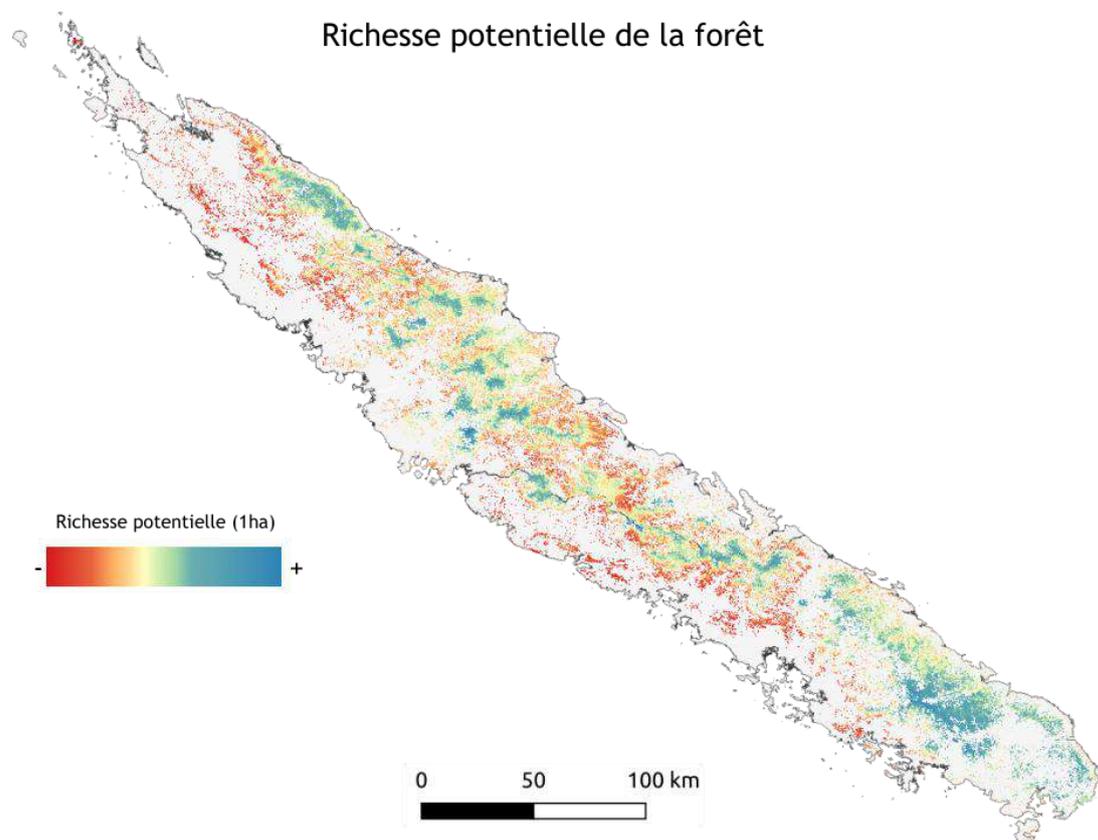


Figure 4 : distribution de la richesse potentielle en forêt calculée sur une grille de 1ha

Limitations :

La projection de la distribution potentielle de la richesse floristique des fragments forestiers est strictement basée sur la relation entre quelques variables environnementales et un ensemble limité d'occurrences d'espèces d'arbres. De nombreux facteurs, tels que la capacité de dispersion ou encore la compétition interspécifique, viennent modifier la distribution réelle d'une espèce. Par exemple, une zone fortement perturbée par les activités anthropiques peut être potentiellement très riche, même si la réalité démontre le contraire.

Par conséquent, la projection de ces probabilités sur l'espace géographique ne fournit qu'un aperçu de la richesse potentielle des fragments forestiers, qui ne peut pas être considérée comme la diversité observée. Les valeurs décimales sont là pour exprimer le fait qu'il ne faut pas considérer les valeurs absolues, mais plutôt prendre en compte un gradient qui s'étend du moins au plus riche.

Citation :

Birnbaum, P., Carnevali, M., & Blanchard, G. (2024). Potential Tree Species Richness in the Forests of New Caledonia (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12739429>

4) Les types forestiers

Le type forestier représente une approche simplifiée de l'influence locale des effets de l'environnement sur la richesse floristique via un filtre environnemental qui exerce une pression sur la tolérance des espèces d'arbres aux conditions environnementales extrêmes. Dans ce travail, nous présentons une classification des types forestiers basée sur l'influence de l'effet de lisière (distance à la lisière) et de l'effet d'altitude (température et superficie) sur la richesse des communautés d'arbres.

Définition

- L'effet de lisière influence la diversité des arbres à travers un filtre environnemental. En Nouvelle-Calédonie, la température annuelle maximale enregistrée à la lisière de la forêt est de 41° C en février, alors qu'elle ne dépasse jamais 24° C au-delà de 100 m de la lisière. Cette différence de température induit une sélection pour les espèces qui tolèrent les conditions les plus arides, conduisant à une réduction de la richesse biologique des communautés d'arbres (Ibanez et al., 2017 ; Birnbaum et al., 2022 ; Blanchard et al., 2023).
- L'altitude affecte également la diversité des arbres en raison des variations de température et de surface disponible (Ibanez et al., 2014 ; Birnbaum et al., 2015 ; Pouteau et al., 2015 ; Ibanez et al., 2016 ; Ibanez et al., 2018). En Nouvelle-Calédonie, la richesse des communautés d'arbres observée varie de 35 à 121 espèces par hectare au sein du réseau NC-PIPPN, avec un pic à moyenne altitude (Figure 5).

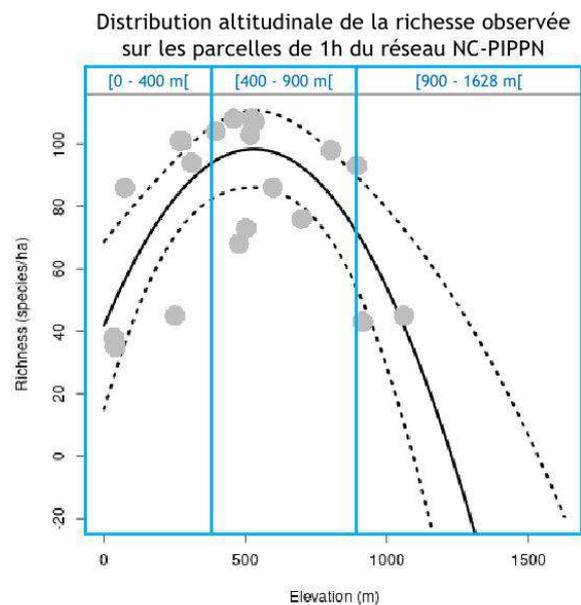


Figure 5 : distribution altitudinale de la richesse floristique des arbres des 23 parcelles de 1 ha du réseau NC-PIPPN

Méthode :

La richesse potentielle est évaluée à l'aide du modèle S-SDM (cf. précédent). Nous considérons le 80^{ème} percentile comme seuil pour distinguer la richesse potentielle faible et élevée dans trois classes d'altitude : [0 - 400 m[, [400 - 900 m[et [900 - 1628 m[. Dans chacune de ces classes, la richesse potentielle élevée correspond donc aux 20 % des pixels de 1 ha les plus riches (Figure 6).

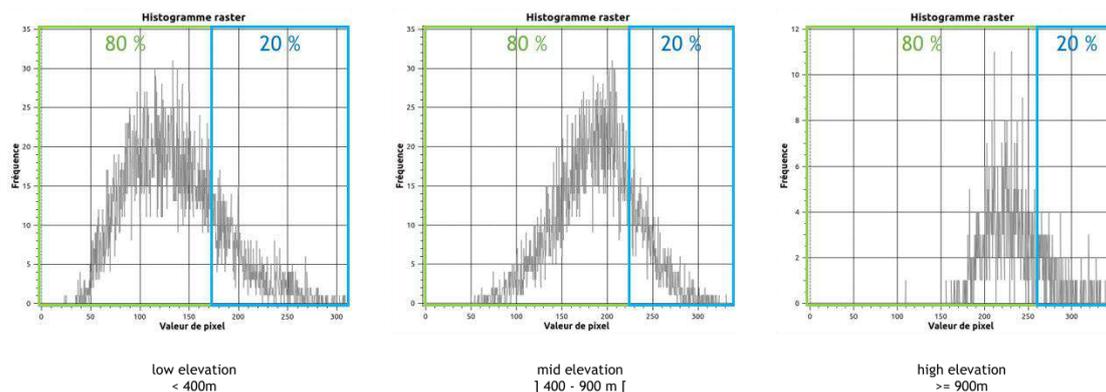


Figure 6 : distribution des valeurs de pixels par classe d'altitude et sélection du 80^{ème} percentile comme seuil pour séparer la richesse potentielle faible (vert) et élevée (bleue).

La classification des types de forêts combine la distance par rapport à la lisière de la forêt et la richesse potentielle déclinée par classe d'altitude afin de délimiter trois grandes catégories (Figure 7):

- Forêt de lisière (*Edge Forest*) : parties de la forêt situées à moins de 100 mètres de la lisière de la forêt.
- Forêt mature (*Mature Forest*) : parties de la forêt situées à plus de 100 mètres de la lisière avec une richesse potentielle à l'hectare faible dans les trois classes d'altitude.
- Forêt de cœur (*Core Forest*) : parties de la forêt situées à plus de 300 mètres de la lisière avec une richesse potentielle à l'hectare élevée dans les trois classes d'altitude.

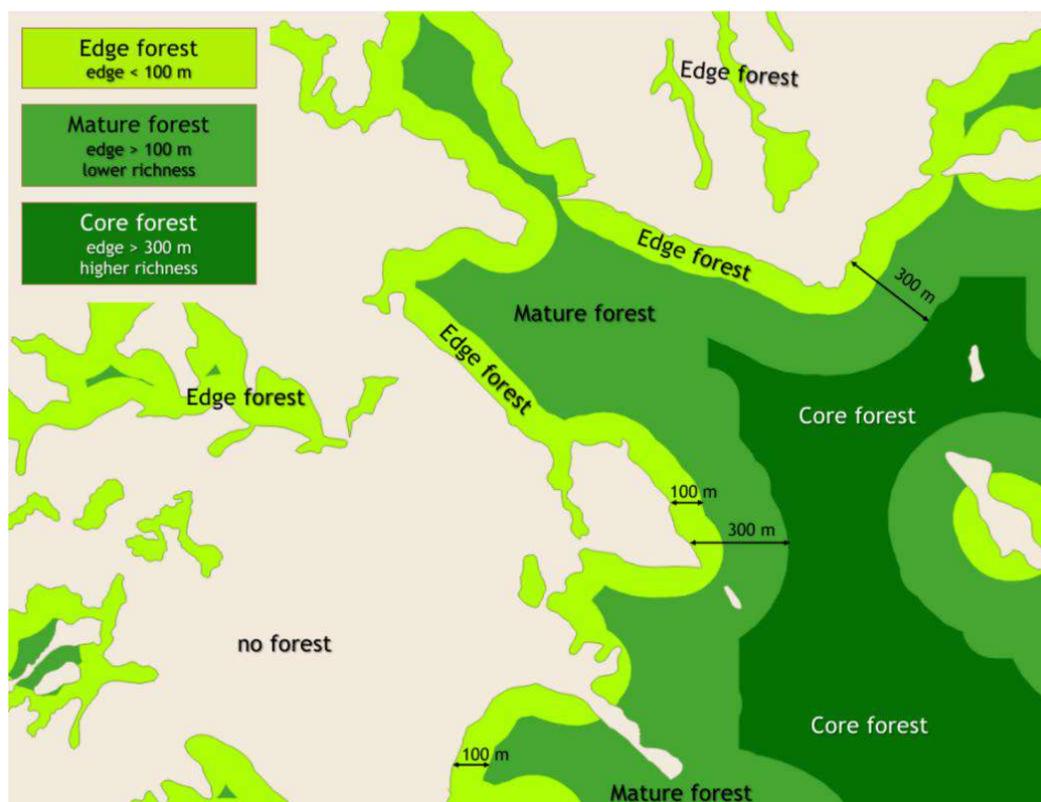


Figure 7 : illustration de la typologie de la forêt basée sur la distance à la lisière et la richesse floristique

Produit final :

La carte de la typologie de la forêt est un fichier vecteur compatible avec un système SIG-ESRI, utilisant le système de coordonnées international WGS84 (Figure 8).

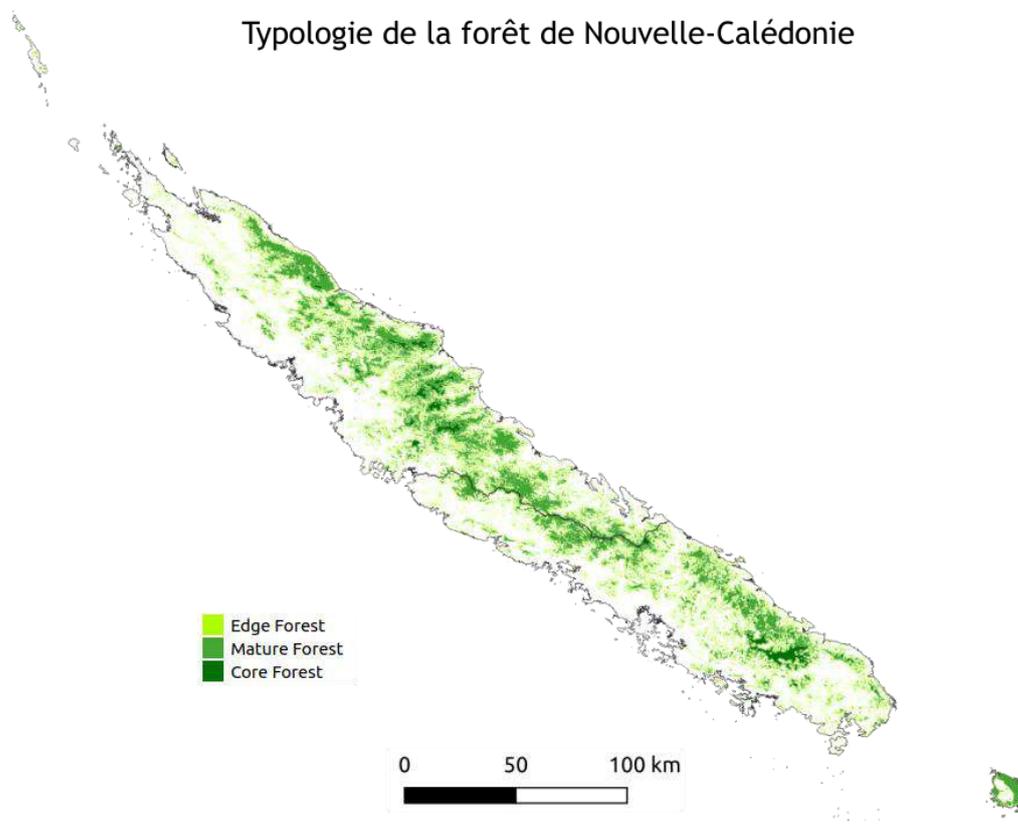


Figure 8 : carte de la typologie de la forêt basée sur l'effet de lisière et l'effet de l'altitude sur la richesse (*Edge forest* = forêt de lisière; *Mature forest* = Forêt mature, *Core Forest* = Forêt de cœur)

La table attributaire contient les colonnes suivantes :

Colonne	Type	Description
type	TEXT	Un des trois catégories de type forestier ("Edge Forest", "Mature Forest", "Core forest")
area_ha	NUMERIC	Aire du multi-polygone
description	TEXT	Description du type forestier

Limitations :

La distinction entre ces trois classes repose sur une interprétation écologique qui ne reflète pas des ruptures directement perceptibles dans la forêt. La transition écologique de la lisière au cœur de la forêt suit un gradient progressif modulé par de multiples conditions abiotiques et biotiques.

De plus, cette classification repose sur des observations et des mesures locales, complexes à généraliser et à extrapoler sur un territoire aussi diversifié sur le plan

environnemental. Néanmoins, elle permet d'aborder l'impact de la fragmentation à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie.

Citation :

Birnbaum, P., Hequet, V., Ibanez, T., Eltabet, N., & Prior, J. (2024). Classification of New Caledonian Forests According to Edge and Elevation Effects (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12739730>

5) Les hot-spots forestiers

La Nouvelle-Calédonie fait partie des 34 hotspots de biodiversité du fait de sa richesse floristique très élevée (nombre d'espèces et endémisme) et des menaces qui pèsent sur cette flore unique par les activités anthropiques.

Définition :

Cette analyse explore les menaces qui pèsent sur les forêts de Nouvelle-Calédonie, en se concentrant sur la probabilité de déforestation dans les zones où les communautés d'arbres sont les plus riches. Pour cela, nous considérons la forêt de cœur comme une partie de la forêt qui a une plus forte probabilité de contenir un nombre élevé d'espèces et nous évaluons alors le risque de déforestation en 2100.

Méthode :

Les points chauds de diversité des communautés d'arbres ont été identifiés à l'aide de la classe forêt de cœur « *Core Forest* » extraite de l'ensemble de données « *Classification of New Caledonian Forests According to Edge and Elevation Effects* ». Les forêts de cœur sont définies comme des zones forestières situées à plus de 300 mètres de la lisière de la forêt et caractérisées par des communautés d'arbres potentiellement plus riches.

Pour évaluer la qualité de l'habitat, chaque fragment de forêt de cœur a été augmenté d'une zone tampon de 500 m dans laquelle nous avons évalué :

- 1) La superficie menacée de déforestation pour les années 2050 et 2100, qui est calculée selon le modèle « *Spatial scenario of tropical deforestation and carbon emissions for the 21st century* » (Vielledent et al., 2023), disponible sous forme de GeoTIFFs téléchargeables pour la Nouvelle-Calédonie pour les années 2050 et 2100 sur le site ForestAtRisk du Cirad. <https://forestatrisk.cirad.fr/newcal/>.
- 2) Les paramètres de l'habitat forestier, notamment la couverture forestière, la distribution des types de forêts et l'indice de fragmentation (meff). Cet indice meff (km²) se base sur la probabilité que deux individus de la même espèce puissent se rencontrer au sein d'un même habitat continu et non fragmenté (Jaeger, 2000; Moser et al. 2007). Plus cet indice est élevé, plus la fragmentation est faible.

Produit final :

La carte des zones prioritaires de conservation est un fichier vecteur compatible avec le système SIG-ESRI et utilisant le système de coordonnées international WGS84 (Figure 9).

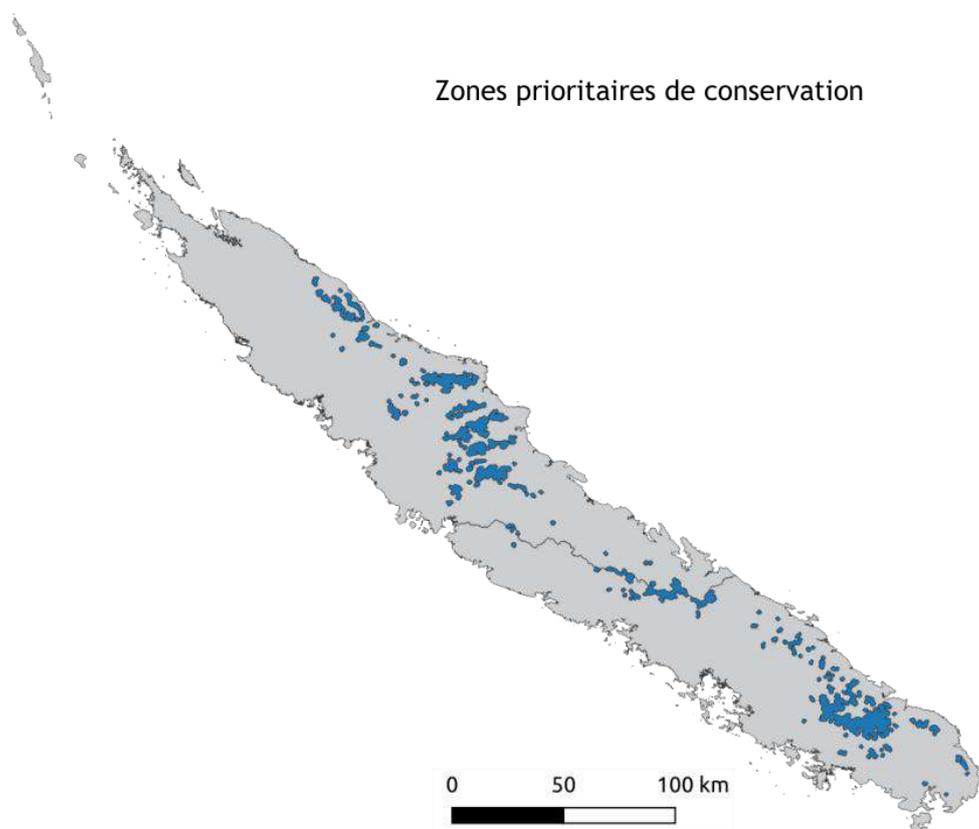


Figure 9 : distribution des 112 zones prioritaires de conservation.

La table attributaire contient les colonnes suivantes :

Colonne	Type	Description
id_buffer	INTEGER	identifiant unique de la zone prioritaire de conservation
area_ha	NUMERIC	Aire totale du polygone en hectares
frag_index	NUMERIC	Indice de fragmentation (meff)
forest_cov	NUMERIC	Proportion de forêt dans la zone tampon (%)
edge_r	NUMERIC	Proportion de forêt de lisière (%)
mature_r	NUMERIC	Proportion de forêt mature (%)
core_r	NUMERIC	Proportion de forêt de coeur (%)
defor_2050	NUMERIC	Proportion de forêt menacée par la déforestation en 2050 (%)
defor_2100	NUMERIC	Proportion de forêt menacée par la déforestation en 2100 (%)
pn	BOOLEAN	Vrai ou faux, indiquant si le polygone chevauche les limites administratives de la province Nord
ps	BOOLEAN	Vrai ou faux, indiquant si le polygone chevauche les limites administratives de la province Sud

Limitations :

Cette analyse des enjeux de la conservation de la forêt vise à encourager le dialogue entre les écologues forestiers et les stratégies de gestion forestière en

Nouvelle-Calédonie. Elle ne doit pas être appliquée de manière aveugle en se basant uniquement sur les quelques variables quantitatives proposées.

Citation :

Birnbaum, P. (2024). Forest Hotspots in the Biodiversity Hotspot of New Caledonia (Version 2024) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12740617>

6) Conclusion et perspectives

La forêt couvre environ 5 400 km², soit 1/3 du territoire, dont 2 200 km² en province Sud et près de 3 200 km² en province Nord. La répartition des zones de vie est assez similaire entre les deux provinces, avec néanmoins une proportion de zone humide plus importante en province Nord et pluvieuse en province Sud (Figure 10).

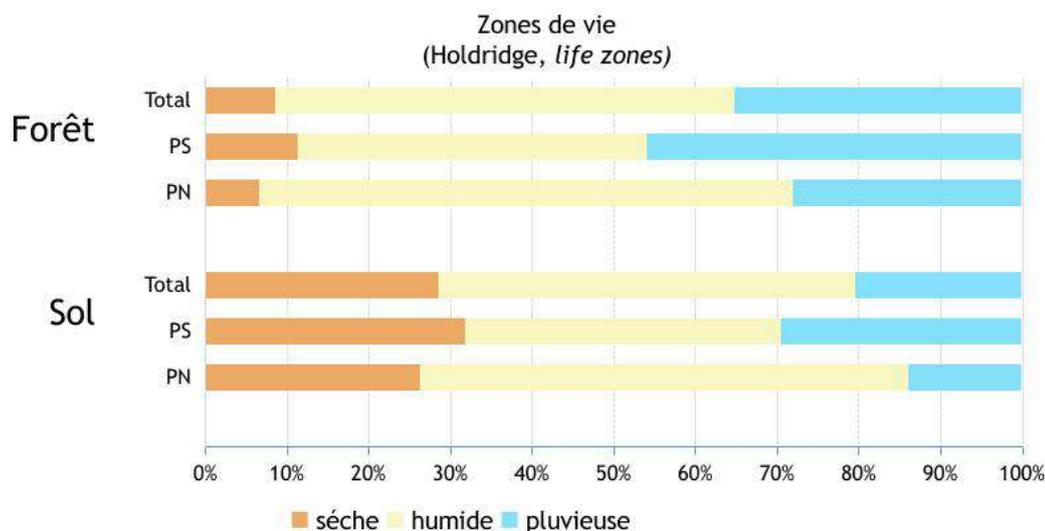


Figure 10 : répartition des zones de vie sur la superficie totale (sol) et celle occupée par la forêt

Avec près de 8000 km², la zone de vie humide représente la moitié de la superficie de la Grande-Terre et concentre plus de 56 % de toute la forêt (Tableau 1). Alors que le milieu sec représente près de 30 % du territoire, il contient seulement 9 % de la forêt totale. Globalement, la couverture forestière augmente avec l'humidité, passant de moins de 10 % dans le milieu sec à près de 58 % dans la zone de vie pluvieuse. Elle est plus importante en province Nord. Enfin, bien que la province Sud présente une proportion supérieure de forêt de cœur, elle détient également une part plus élevée de forêt de lisière.

Tableau 1 : principales caractéristiques de la forêt déclinées par province

	Province Sud	Province Nord	Total
Forêt (ha)	219 352	321 712	541 064
Couverture forestière	31 %	34 %	33 %
Types			
Lisière	47 %	43 %	44 %
Mature	45 %	51 %	49 %
Cœur	8 %	6 %	7 %

Zones de vie	PS	PN	Total
Sèche	11 %	7 %	9 %
Humide	43 %	65 %	56 %
Pluvieuse	46 %	28 %	35 %

La carte de la forêt se compose de 12 058 polygones [0,5 - 95 042 hectares] ; 81 % d'entre eux ont une superficie inférieure à 10 ha. Sans surprise, les plus gros massifs de forêt forment la chaîne centrale autour de laquelle se distribuent les petits fragments, majoritairement localisés à basse altitude (Figure 11).

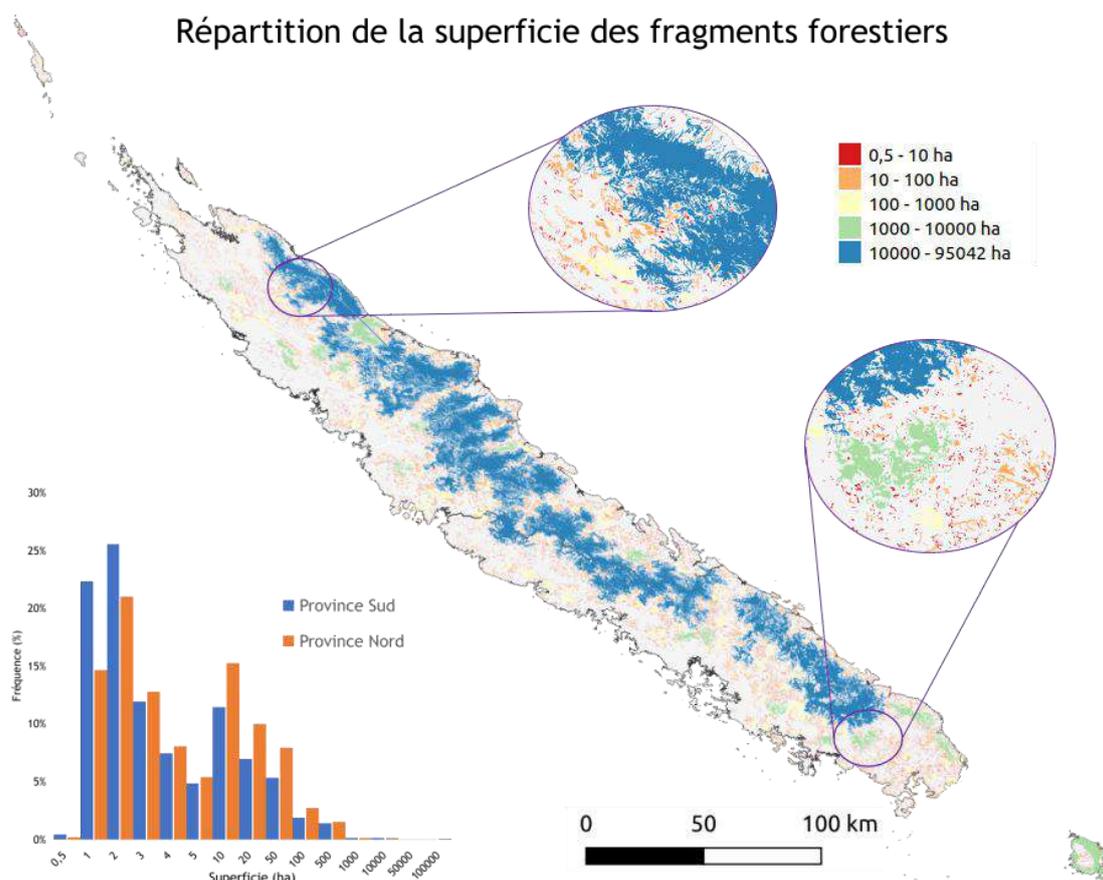


Figure 11 : distribution et répartition de la superficie des 12 058 polygones de forêt

La forêt est grignotée progressivement depuis les zones de basse altitude jusqu'à la chaîne centrale. Cette organisation conduit à une fragmentation intense et un isolement de plus en plus important. La représentation spatiale de la taille effective du maillage (indice meff) sur une grille de 1 km² montre à quel point l'intégralité de la chaîne centrale est en cours de morcellement (Figure 12).

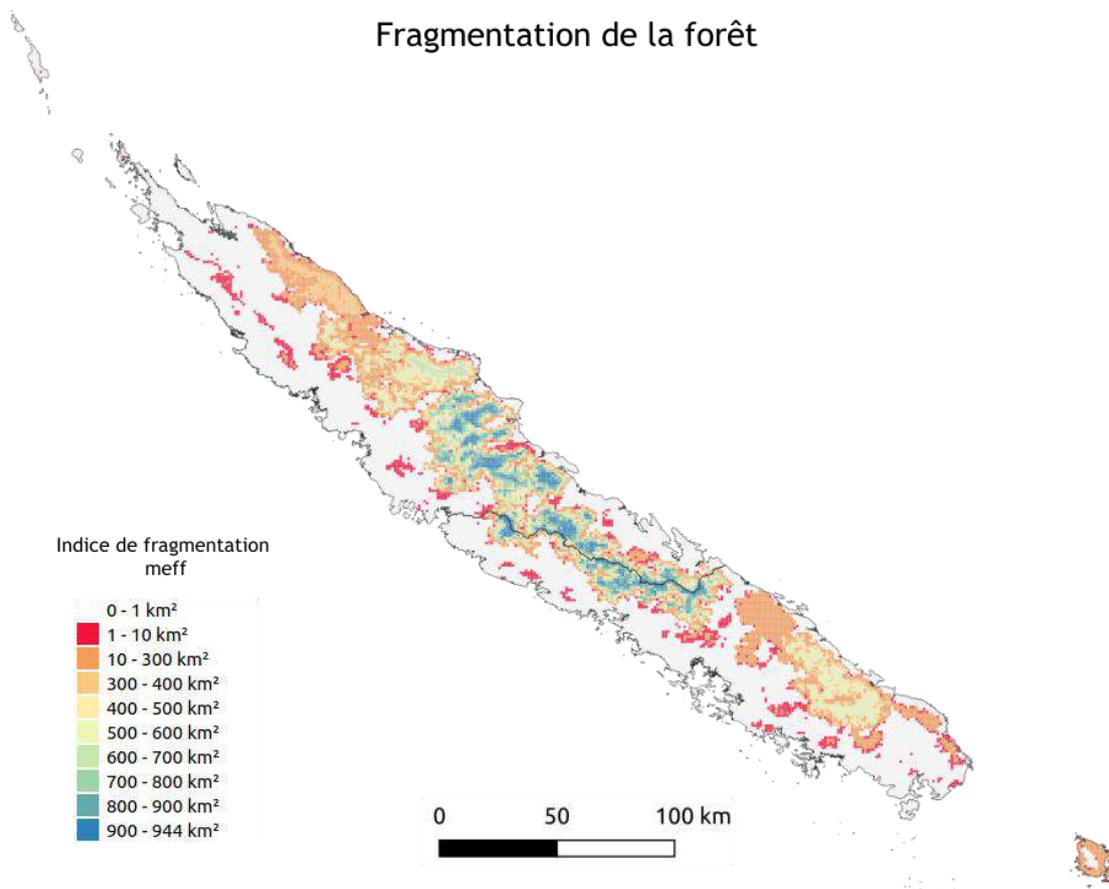


Figure 12 : indice de fragmentation calculé sur une maille de 1 km². Plus l'indice meff est petit, plus la fragmentation est intense (ex : les organismes situés dans les cellules non colorées ne peuvent pas migrer vers une autre cellule sans devoir quitter l'habitat forestier).

La taille effective du maillage (meff) exprime la surface en km² qui représente le domaine vital dans lequel un organisme peut se développer sans devoir franchir un autre habitat. Il reflète à la fois la surface des espaces naturels et leur degré de morcellement. Plus l'habitat est fragmenté, plus la taille effective du maillage est faible. Bien entendu, le sens écologique de cet indicateur s'applique différemment selon les espèces et leur domaine vital. Le massif situé à cheval entre les deux provinces est le moins fragmenté; il s'étend depuis le Mt Do au sud ouest jusqu'au Goro Jé au centre de la chaîne en passant par le Mt Aoupinié ou encore le parc des grandes fougères.

La combinaison de la carte de la forêt avec celle de la typologie et de la richesse potentielle nous permet de définir 112 zones prioritaires de conservation (env. 123 000 ha) potentiellement très riches. Parmi ces zones, 38 présentent un risque élevé de menaces et pourraient devenir des hotspots en 2050 et 77 en 2100, dont 51 se situent exclusivement en province Sud, 22 en province Nord et 4 sont partagés entre les deux provinces (Tableau 2).

Tableau 2 : zones de conservation prioritaires et prédiction de déforestation en 2050 et 2100. Les hotspots correspondent aux zones de conservation prioritaires soumises à un risque de déforestation pour les années 2050 et 2100.

	Zones de conservation		Menacées (<i>hotspots</i>)		Prédiction de déforestation	
	<i>nombre</i>	<i>aire (ha)</i>	<i>2050</i>	<i>2100</i>	<i>2050</i>	<i>2100</i>
PS	52	46 548	35	51	253 (0.5%)	2 410 (5%)
PN	54	63 927	2	22	26 (0.04%)	311 (0.5%)
PS/PN	6	12 788	1	4	6 (0.05%)	203 (1.6%)
Total	112	123 263	38	77	285 (0.2%)	2923 (2.4%)

La prédiction de déforestation en 2100 est très élevée, notamment pour la province Sud qui pourrait potentiellement perdre plus de 2 400 ha de ses forêts riches, soit 5 % des zones de conservation identifiées. Ces secteurs sont principalement situés dans la commune de Thio et au nord de la commune de Yaté (Figure 13). La quasi-totalité des zones de conservation identifiées (51/52) sont sous la menace de la déforestation en 2100. En province Nord, les forêts de cœur sont davantage situées dans des grands ensembles moins fragmentés situés sur des sols non-miniers ce qui permet de réduire considérablement le risque de déforestation même s'il existe pour 22 des 54 fragments identifiés.

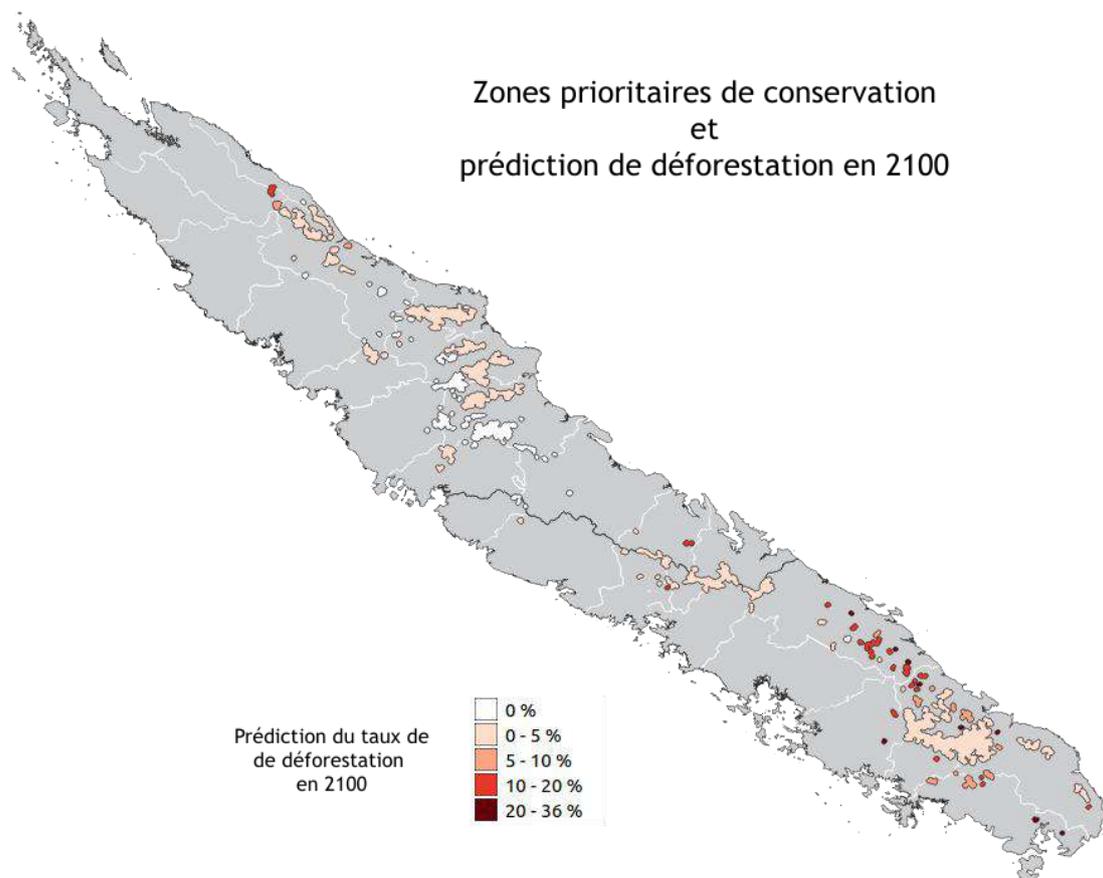


Figure 13 : distribution des zones prioritaires de conservation et prédiction de déforestation pour les 77 hotspots de la Grande-Terre menacés par la déforestation en 2100.

Globalement, on note une corrélation linéaire significative entre la proportion actuelle de la forêt de lisière dans la zone de prioritaire de conservation et le risque de déforestation en 2100 (Figure 14). Cette relation entre fragmentation et déforestation rappelle celle observée à l'échelle des communes de la province Nord (Birnbaum et al., 2022).

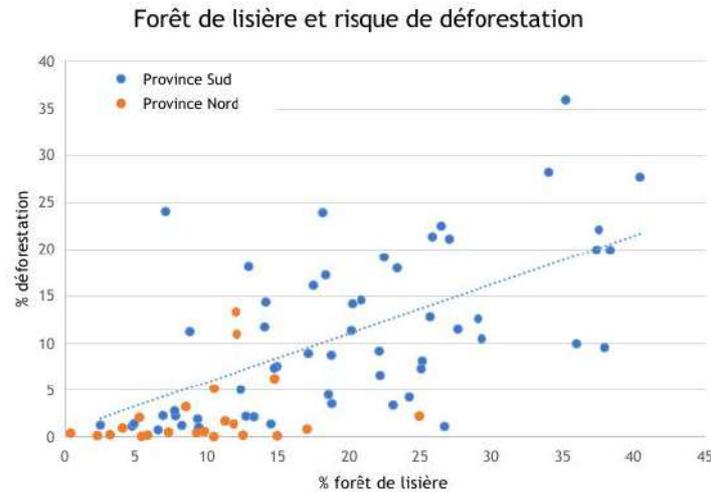


Figure 14 : relation entre la proportion de forêt de lisière et la prédiction des risques de déforestation en 2100 pour les 77 zones prioritaires de conservation.

En outre, elle confirme que la distance à la lisière de la forêt est l'effet le plus important, et de loin, sur la prédiction du risque de déforestation en Nouvelle-Calédonie. Cet effet a été testé au travers du modèle "*Tropical Rainforest Cover Change (TMF)*" qui propose une analyse de l'évolution du couvert forestier à l'échelle mondiale à partir de l'étude radiométrique d'image Landsat sur une série temporelle de 41 années (Vancutsem et al., 2021). En étudiant les variables appliquées à chaque pixel, ce modèle montre que la distance à la lisière de la forêt est l'effet le plus important, et de loin, sur le risque de déforestation. En moyenne, si un pixel forestier se situe à une distance de 100 m de la lisière forestière, le risque de déforestation est réduit de 95 %. Une distance de 1 km, réduit le risque de déforestation de près de 100 %. Par ailleurs, ce modèle montre que l'effet du substrat ultramafique sur le risque de déforestation est significativement positif (+ 34 %).

Ce modèle, basé sur un scénario '*business as usual*' c'est-à-dire une stricte projection dans le futur de ce qui a été observé sur la période 2000-2020, confirme effectivement que la déforestation est principalement due à la fragmentation de surcroît sur le substrat ultramafique qui domine le Grand Sud. Plus la fragmentation augmente, plus la forêt est exposée aux effets de la lisière et plus la déforestation est probable. Ce processus s'alimente et s'accélère, étant donné que la déforestation est un puissant moteur de fragmentation. En effet, le modèle montre une accélération de la déforestation entre la période 2000-2010 et la période 2010-2020 de sorte que l'on peut suggérer que la déforestation sur la période à venir sera plus intense que celle prédite aujourd'hui d'autant que le changement climatique va engendrer de nouvelles menaces sur l'écosystème forestier, telles que la sécheresse et les feux de brousse.

Bien que cette analyse s'appuie sur des projections futures, les efforts de conservation devraient également se concentrer sur la préservation des forêts dans leur état actuel, y compris en s'attaquant à la perte de biodiversité. La table attributive liée à la carte des

hotspots contient des métriques qui permettent d'identifier des zones actuellement menacées même si elles n'apparaissent pas dans les prédictions futures présentées ici. La proportion de forêt de lisière et l'indice de fragmentation permettent d'identifier d'autres priorités qui visent à limiter la perte d'habitat. La continuité écologique, entre les zones de vie, doit aussi faire partie des stratégies de conservation et de restauration.

La carte de la forêt constitue le socle qui permet d'asseoir une stratégie de conservation et de restauration des forêts à l'échelle de la Grande-Terre. En croisant sa distribution avec les autres produits fournis dans le cadre de cette convention, de nombreuses analyses et études peuvent être développées. Nous encourageons les utilisateurs à explorer ces métriques et leur corrélation avec d'autres variables quantitatives ou qualitatives pour acquérir une compréhension plus approfondie des défis de la conservation des forêts en Nouvelle-Calédonie. Néanmoins et avant d'utiliser ces indicateurs, il faut préalablement définir des objectifs de conservation (par exemple maximiser la biodiversité, réduire la fragmentation, restaurer les environnements dégradés...) et identifier les contraintes à sa mise en oeuvre (accessibilité, budget, durabilité, faisabilité...). La collaboration et la mise en oeuvre d'une stratégie commune à l'échelle de la Grande-Terre devrait s'inscrire dans cette réflexion de conservation surtout que le massif de forêt actuellement le moins fragmenté se situe à cheval entre les deux provinces. Par ailleurs, la conservation ne doit pas s'attacher à définir seulement une stratégie à l'échelle globale. Dans chaque commune, dans chaque zone de vie, chaque substrat, aire protégée, il est possible de décliner autant d'enjeux de conservation.

Néanmoins et quel que soit l'objectif choisi, la lutte contre la fragmentation devrait devenir une priorité des stratégies mises en place en raison de son ampleur actuel et des risques de déforestation dans un futur proche, notamment sur le substrat ultramafique ([Birnbaum et al., 2023](#)).

7) Références :

- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert C. H. and Thuiller W. (2012) - Selecting pseudo-absences for species distribution models : How, where and how many ? *Methods in ecology and evolution*, 3(2) :327–338.
- Birnbaum, P., Ibanez, T., Vandrot, H., Blanchard, E., Hequet, V., Chambrey, C., & Pouteau, R. 2015. Les forêts humides de la province Nord, Nouvelle-Calédonie. Synthèse des travaux de recherche 2012-2015. Editions IAC, Nouméa.
- Birnbaum, P., Hequet, V., Girardi, J., Vandrot, H., Mangeard, T., Ibanez, T., Blanchard, E., Pouteau, R., Blanchard, G., Justeau-Allaire, D., Vieilledent, G., & Cassan, J.-J. (2022). Atlas de la forêt—Province Nord—Nouvelle-Calédonie. Editions Province Nord.
- Birnbaum, P., Ibanez, T., Blanchard, G., Justeau-Allaire, D., Hequet, V., Eltabet, N., Vieilledent, G., Barbier, N., Barrière, R., & Bruy, D. (2023). Forest and tree species distribution on the ultramafic substrates of New Caledonia. *Botany Letters*, 170(3), 412–424.
- Blanchard, G., Barbier, N., Vieilledent, G., Ibanez, T., Hequet, V., McCoy, S., & Birnbaum, P. (2023). UAV-Lidar reveals that canopy structure mediates the influence of edge effects on forest diversity, function and microclimate. *Journal of Ecology*, 111(7), 1411–1427.
- Holdridge, L. R. (1947). Determination of World Plant Formations From Simple Climatic Data. *Science*, 105(2727), 367–368.
- Ibanez, T., Munzinger, J., Dagostini, G., Hequet, V., Rigault, F., Jaffré, T., & Birnbaum, P. (2014). Structural and floristic diversity of mixed tropical rain forest in New Caledonia: New data from the New Caledonian Plant Inventory and Permanent Plot Network (NC-PIPPN). *Applied Vegetation Science*, 17(3), 386–397.
- Ibanez, T., Grytnes, J.-A., & Birnbaum, P. (2016). Rarefaction and elevational richness pattern: A case study in a high tropical island (New Caledonia, SW Pacific). *Journal of Vegetation Science*, 27(3), 441–451.
- Ibanez, T., Hequet, V., Chambrey, C., Jaffré, T., & Birnbaum, P. (2017). How does forest fragmentation affects tree communities? A critical case study in the biodiversity hotspot of New Caledonia. *Landscape Ecology*, 32, 1671–1687.
- Ibanez, T., Blanchard, E., Hequet, V., Keppel, G., Laidlaw, M., Pouteau, R., Vandrot, H., & Birnbaum, P. (2018). High endemism and stem density distinguish New Caledonian from other high-diversity rainforests in the Southwest Pacific. *Annals of Botany*, 121(1), 25–35.
- Jaeger, J. A. G. (2000). Landscape division, splitting index, and effective mesh size: New measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15(2), 115–130.
- Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2023). A high-resolution canopy height model of the Earth. *Nature Ecology & Evolution*, 7(11), 1778–1789.
- Moser, B., Jaeger, J. A. G., Tappeiner, U., Tasser, E., & Eisel, B. (2007). Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem. *Landscape Ecology*, 22(3), 447–459.

- Pouteau, R., Bayle, E., Blanchard, E., Birnbaum, P., Cassan, J.-J., Hequet, V., Ibanez, T., & Vandrot, H. (2015). Accounting for the indirect area effect in stacked species distribution models to map species richness in a montane biodiversity hotspot. *Diversity and Distributions*, 21(11), 1329–1338.
- Schmitt, S., Pouteau, R., Justeau, D., Boissieu, F. de, & Birnbaum, P. (2017). ssdm: An R package to predict distribution of species richness and composition based on stacked species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(12), 1795–1803.
- Vancutsem, C., Achard, F., Pekel, J.-F., Vieilledent, G., Carboni, S., Simonetti, D., Gallego, J., Aragão, L. E. O. C., & Nasi, R. (2021). Long-term (1990–2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics. *Science Advances*, 7(10), eabe1603.
- Vieilledent, G., Vancutsem, C., Bourgoin, C., Ploton, P., Verley, P., & Achard, F. (2023). Spatial scenario of tropical deforestation and carbon emissions for the 21st century (p. 2022.03.22.485306). *bioRxiv*.