



IAC
Institut Agronomique
néo-Calédonien

IRD
Institut de recherche
pour le développement

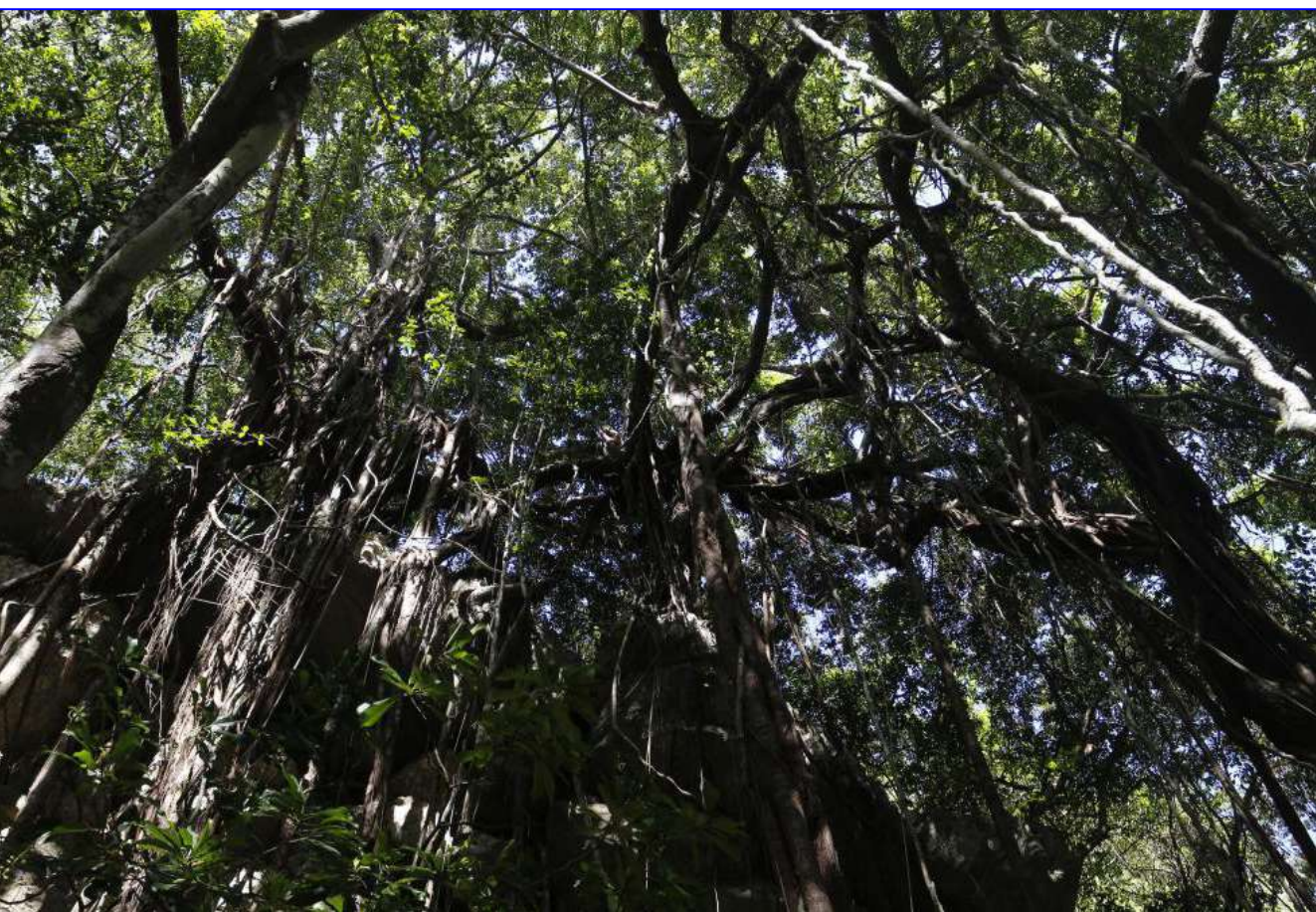


COGEFOR

**Rapport intermédiaire du partenariat
CONVENTION N° 16C180**

Connaissances et outils et pour la gestion conservatoire des forêts naturelles en province Nord

Octobre 2017



**Birnbaum Ph., Ibanez T., Pouteau R., Vandrot H.,
Blanchard G., Justeau D., Girardi J., Barrabé L. &
Hequet V.**

La présente convention a pour ambition de compléter et transférer les résultats scientifiques acquis dans le cadre du partenariat Ecofor (2012-2015, conventions 12C114 & 14C396) aux gestionnaires et de les traduire en outils opérationnels dédiés à la conservation dans le cadre d'un partenariat tripartite entre la Province, l'IAC et le CIRAD. Ce partenariat s'appuie sur les acquis, les recommandations et les perspectives synthétisés dans l'ouvrage intitulé « Les Forêts de la province Nord - Synthèse des Connaissances 2012-2015 » publié aux éditions de l'IAC.

Cette nouvelle convention (COGEFOR) conduite dans le cadre d'un partenariat équivalent aura pour but la production de « **Connaissances et outils pour la gestion conservatoire des forêts naturelles en province Nord** ». Les activités permettront :

- de **poursuivre l'effort d'amélioration des connaissances** générales sur les forêts à l'échelle du territoire provincial de façon plus soutenue et durable,
- de **mettre en œuvre et de renforcer les dispositifs** permettant une meilleure compréhension des dynamiques forestières (suivi et expérimentation) notamment les placettes forestières,
- **d'assurer le renforcement et le soutien des capacités opérationnelles** des services (expertise, soutien technique, élaboration d'outil, etc.)
- globalement, d'appuyer la gestion des milieux naturels.

Le Projet COGEFOR est basé sur la caractérisation des forêts de la province Nord vis-à-vis de leurs particularités (endémisme, dynamique, diversité, adaptations) à des fins de gestion du patrimoine forestier naturel (conservation, connaissance, valorisation).





Conformément aux objectifs du partenariat, la mise en place des nouvelles études (thèse basse altitude, portail SIE niamoto notamment) s'inscrit dans le renforcement global des connaissances sur les arbres et les habitats forestiers de la province Nord. L'acquisition de nouvelles données s'est ainsi combinée à la compilation de données issues de la littérature et de nouveaux protocoles d'acquisition pour aborder avec plus de précisions l'origine, la distribution et l'écologie des espèces mais également l'organisation et la structure des habitats forestiers et leur intégration dans un contexte régional et mondial.

Etat d'avancement de Cogefor

Suite aux recommandations émises dans l'ouvrage collectif **“Les Forêts de la province Nord - Synthèse des Connaissances 2012-2015”** (Birnbaum et al., 2015) un effort particulier est porté sur les forêts de basse altitude (hors forêts sèches) ainsi que sur les forêts sur substrats ultramafiques et calcaires, sous-représentées dans les collections et les inventaires forestiers. Le renforcement des connaissances sur les arbres et les forêts s'est ainsi poursuivi au travers des efforts de capitalisation des données, de la mise en place de nouvelles parcelles mais également du développement de nouveaux protocoles d'acquisition de données ainsi que d'outils collaboratifs ouvrant la porte à une implication citoyenne dans nos recherches.

L'année 2016 a été marquée par la soutenance de thèse d'Elodie Blanchard (Blanchard, 2016) qui a travaillé durant 4 ans sur la structure des forêts de la province Nord et notamment l'organisation de leur canopée. Cette thèse intitulée « Diversité structurale des forêts denses humides de la province Nord de Nouvelle-Calédonie : de l'arbre au paysage » a été soutenue avec talent le 20 Décembre 2016 à Montpellier (Figure 1). Bravo à elle. Ses principaux résultats sont mentionnés dans ce rapport intermédiaire.





Figure 1 : Soutenance de thèse de Elodie Blanchard en décembre 2016

Plus de 100 espèces se sont ajoutées aux quelques 700 espèces d'arbres recensées dans les études précédentes à partir de l'analyse croisée des échantillons de l'herbier de Nouvelle-Calédonie (NOU) et des observations collectées dans la littérature.

Alors que jusqu'à présent nous avons utilisé des indices de diversité ne prenant en compte que la taxonomie (par exemple la richesse spécifique), le projet Cogefor a permis de lancer un nouveau chantier sur la prise en compte des relations phylogénétiques dans la mesure de la diversité. Ces travaux nous permettent dorénavant d'aborder la structuration de nos communautés au travers de l'histoire évolutive grâce notamment à la création de l'arbre phylogénique des espèces d'arbres de la Nouvelle-Calédonie.

Cependant, la définition des propriétés structurales et floristiques des forêts néo-calédoniennes ne saurait être pertinente sans leur contextualisation aux échelles régionales et globales. Les forêts néo-calédoniennes sont-elles plus riches, plus denses, moins hautes ou parfaitement comparables aux autres forêts insulaires. Quelle est donc l'originalité des forêts de la Nouvelle-Calédonie? Pour répondre à ces questions nous avons comparé les forêts néo-calédoniennes à d'autres forêts du Pacifique sud ouest mais aussi plus largement aux forêts des systèmes insulaires de l'indo-pacifique.



La mise en place de parcelles standardisées par la superficie (1 ha) et par le diamètre minimum des arbres ($DBH \geq 10$ cm) s'est poursuivie. Nous avons cependant utilisé un protocole plus adapté pour l'étude des petits fragments forestiers. C'est ainsi qu'en complément des parcelles d'inventaires d'1 ha, nous utilisons des points d'inventaire (400 m², $DBH \geq 10$ cm) déjà utilisés dans d'autres projets de recherches portant sur les forêts fragmentées du sud de la Grande-Terre (cf. projet Corifor, Birnbaum et al., 2016)

La capitalisation de toutes ces méthodes et ces données alimente respectivement nos logiciels et nos bases de données qu'elles soient d'ordre géographique (e.g., cartographie, occurrence) ou biologiques (e.g., taxonomie, phylogénie, traits fonctionnels) ce qui concourt à mieux appréhender l'organisation et la composition des communautés d'arbres.

L'extrapolation des observations locales (comme celles acquises au sein du réseau de parcelles permanentes que nous déployons) aux échelles spatiales nécessaires pour la gestion et la conservation des forêts passe par l'application de modèles prédictifs qui s'appuient sur la distribution géographique et environnementale des jeux d'occurrences. Nos études portant sur les modèles de distribution d'espèces (SDM) et leur compilation à l'échelle de 1 ha permettent dorénavant de projeter l'état de la distribution potentielle des espèces d'arbres et de la richesse floristique à l'échelle de toute la Calédonie au regard de notre connaissance actuelle.

Finalement pour répondre pleinement aux objectifs appliqués du partenariat Cogefor, il est indispensable de fournir des outils d'analyses et d'aide à la décision qui permettent de mieux appréhender les enjeux de conservation au regard d'analyses scientifiques et publiées. Depuis le début de l'année 2016, nous avons déployé un système d'information environnementale (SIE) dédié aux forêts de la province Nord (niamoto.io) qui restitue les données capitalisées à l'échelle locale et globale et qui représente le socle d'un système d'aide à la décision en matière de gestion de l'environnement. Cette plateforme accueillera dans le futur les autres outils développés dans le cadre du partenariat Cogefor tels que des logiciels (ou scripts) permettant d'automatiser les analyses phylogénétiques, de générer des modèles de distribution d'espèces, d'analyser statistiquement la composition d'une communauté, de prédire les zones à fort enjeux de conservation via le RLA-NC ou encore de distribuer aux utilisateurs certaines données du projet au travers de plusieurs services internet (web-services).



1. Le réseau des inventaires forestiers et des parcelles permanentes de Nouvelle-Calédonie (NC-PIPPN)

Le réseau des inventaires forestiers continue de s'enrichir avec notamment la mise en place de trois nouvelles parcelles de 1 ha situées à Koumac, Ouegoa (Amoss) et Kouaoua (Wekori) (cf. fiches parcelles). Ces trois nouvelles parcelles viennent élargir l'amplitude écologique de ce réseau (substrat, précipitation, altitude) ainsi que son recouvrement géographique (Figure 2).

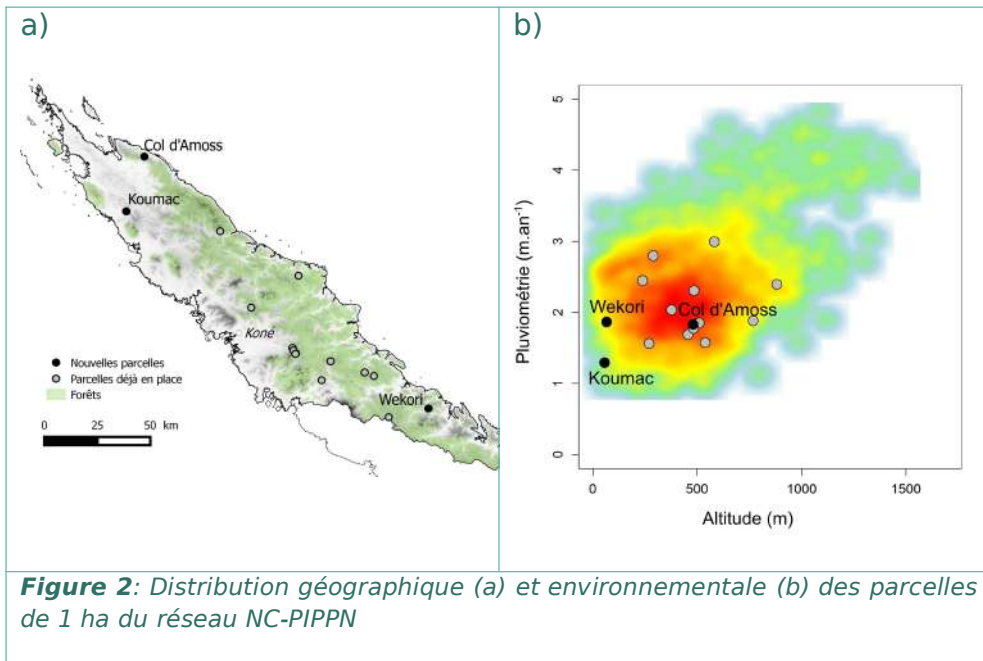


Figure 2: Distribution géographique (a) et environnementale (b) des parcelles de 1 ha du réseau NC-PIPPN

1.1. Originalité taxonomique et structurale des nouvelles parcelles de 1ha

Du fait de leur distribution environnementale, ces trois nouvelles parcelles contribuent fortement au renforcement et à l'équilibrage de nos jeux de données. Chaque nouvelle entrée permet d'enrichir nos bases de données d'informations portant autant sur l'organisation de la communauté que sur le spectre de tolérance écologique des espèces d'arbres.

- **La parcelle du Col d'Amoss** est la deuxième parcelle mise en place dans le bloc forestier « Panié ». C'est aujourd'hui la parcelle la plus au nord-est de l'ensemble du dispositif. C'est la deuxième parcelle après celle de l'Aoupinié en termes de nombre de tiges avec 1472 tiges à l'hectare. C'est une parcelle largement dominée par deux espèces de la famille des Clusiaceae : *Garcinia vieillardii* et *Calophyllum caledonicum* qui représentent à elles seules plus de 41% de l'effectif total. Cette nouvelle parcelle apporte 20 nouvelles espèces d'arbres dans le réseau NC-PIPPN. Parmi ces nouvelles espèces, quatre sont endémiques et ont une distribution restreinte au nord de la Grande Terre : trois palmiers (Arecaceae) dont un individu de *Cyphokentia cerifera* (classé NT en liste rouge UICN), un individu de *Cyphophoenix elegans* et surtout 35 individus de *Kentiopsis magnifica* (classé EN en liste rouge UICN) ainsi que six individus de *Viotia vieillardii* (Proteaceae)
- **La parcelle de Koumac** qui étire le réseau vers le nord-ouest représente la première parcelle installée sur les substrats calcaires. Elle est à la fois la parcelle de plus basse altitude (55 m) et de plus faibles précipitations (1292 mm/an). Avec seulement 514 tiges à l'hectare elle détient le record de la plus faible densité à l'hectare. Son aire basale est la troisième plus faible après Forêt Plate P17 et Tiwae. Cette parcelle se caractérise par une composition floristique dénuée de palmiers, de fougères et de gymnospermes. En revanche, elle contient une densité relativement élevée de lianes (18 individus) ce qui la place en deuxième position en terme de densité de liane derrière la parcelle de Forêt Plate P12. Avec seulement 32 espèces, c'est la parcelle la moins riche derrière Gohapin (41 espèces), tout en restant légèrement plus diverse que cette dernière (Shannon : 2.51 vs 2.26 et Simpson 0.87 vs 0.77). Elle est largement dominée par deux espèces : *Diospyros fasciculosa* (Ebenaceae) et *Aglaiia elaeagnoidea* (Meliaceae), caractéristiques de milieux ouverts et/ou perturbés, et qui

présentent à elles seules plus de 44% de l'effectif total. Cette parcelle ajoute 12 nouvelles espèces dans le réseau de parcelles : deux espèces introduites et envahissantes (*Lantana camara* et *Melia azedarach*) qui signent une fois encore le degré de perturbation du milieu, trois espèces inféodées aux forêts sèches calédoniennes (*Mimusops elengi* (Sapotaceae), *Planchonella luteocostata* (Sapotaceae) et *Fontainea pancheri* (Euphorbiaceae)), vestige d'un passé forestier sans doute plus riche et divers et, deux espèces autochtones dont la distribution est restreinte au nord-ouest de la Calédonie et qui marquent la singularité de la région (*Pleiogynium timoriense* (Anacardiaceae) et *Gyrocarpus americanus* (Hernandiaceae))

- **La parcelle de Wekori** est située au sud-est du réseau NC-PIPPN et représente la première parcelle installée sur substrat ultramafique, à basse altitude (65 m). Le peuplement est caractérisé par une densité basse (896 tiges à l'hectare) et une diversité relativement faible ($R = 74$ espèces, Shannon = 3.38 et Simpson = 0.95). La flore des arbres est dominée par *Xylopia dibaccata* (Annonaceae) qui représente 12.6% du peuplement (113 individus). Les quatre espèces les plus abondantes représentent 36% de l'effectif total. La parcelle de Wekori permet d'ajouter 10 nouvelles espèces d'arbres dans le jeu de données global. Ces nouvelles entrées ne reflètent pas une particularité floristique de la zone mais plutôt des entrées d'arbustes atteignant rarement 10 cm de DBH : *Zygogynum pomiferum* (Winteraceae), *Archirhodomyrtus turbinata* (Myrtaceae), *Cupaniopsis fruticosa* (Sapindaceae) ou des espèces peu communes et/ou peu collectées : *Xylopia dibaccata* (Annonaceae), *Guettarda balansaeana* et *Antirhea rhamnoides* (Rubiaceae), *Tapinosperma nectandroides* (Primulaceae), *Euroschinus verrucosus* (Anacardiaceae)

Amoss

LOCALISATION

Date de mise en place : 20 / 10 / 2016
 Position géographique : -20.18° S ; 164.26° E
 Massif : **Amoss**
 Substrat : **Volcano-sédimentaire**
 Altitude : **486 m**
 Précipitations : **2 090 mm.an⁻¹**



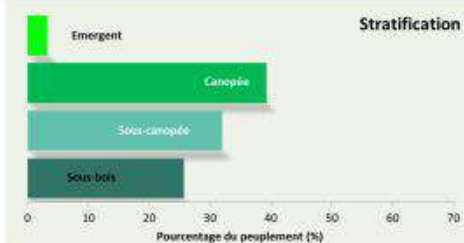
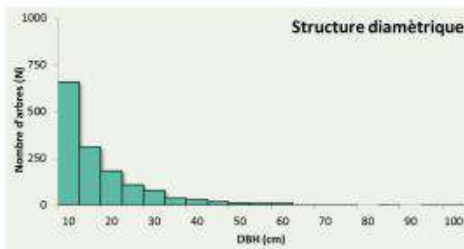
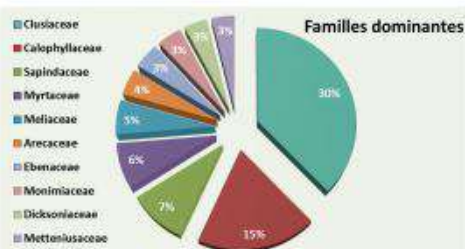
STRUCTURE

Nombre de tiges : **1515**
1369 Arbres
52 Palmiers
46 Fougères
5 Lianes
43 Morts

Aire basale : **66.49 m² / ha**
 Hauteur moyenne de canopée : **14 m**

Densité de bois moyenne : **0,67 g.cm⁻³**
 Richesse spécifique : **95**
 Indice d'équitabilité : **0,69**
 Indice de diversité de Shannon : **3,16**
 Indice de diversité de Simpson : **0,89**
 Taux d'identification spécifique **95 %**

COMPOSITION



Koumac

Date de mise en place : **04 / 12 / 2016**
 Position géographique : **-20.32° S ; 164.21° E**
 Massif : **NA**
 Substrat : **Calcaires**
 Altitude : **45 m**
 Précipitations : **1 570 mm.an⁻¹**



LOCALISATION

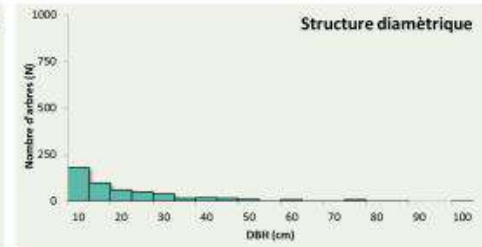
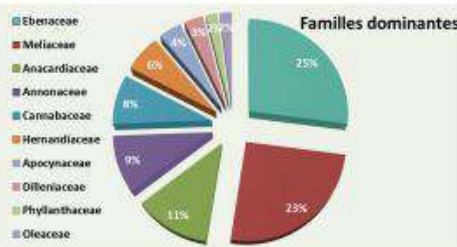
Nombre de tiges : **545**
496 Arbres
0 Palmiers
0 Fougères
18 Lianes
31 Morts

Aire basale : **34.5 m² / ha**
 Hauteur moyenne de canopée : **16 m**

STRUCTURE

Densité de bois moyenne : **0,66 g.cm⁻³**
 Richesse spécifique : **32**
 Indice d'équitabilité : **0,72**
 Indice de diversité de Shannon : **2,51**
 Indice de diversité de Simpson : **0,87**
 Taux d'identification spécifique **97 %**

COMPOSITION



Wekori

LOCALISATION

Date de mise en place : 27 / 03 / 2017
 Position géographique : -21.22 S ; 165.43° E
 Massif : **Menazi**
 Substrat : **Ultramafique**
 Altitude : **64 m**
 Précipitations : **1 790 mm.an⁻¹**



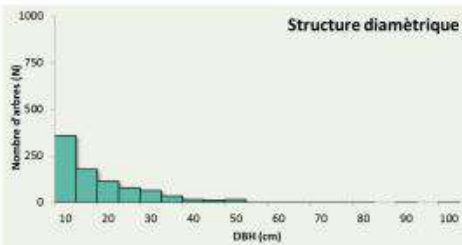
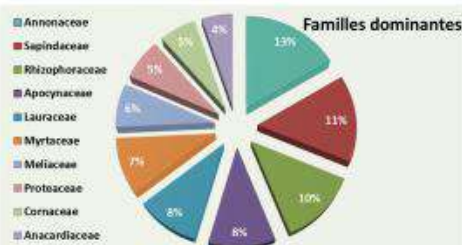
STRUCTURE

Nombre de tiges : **947**
894 Arbres
0 Palmiers
0 Fougères
2 Lianes
51 Morts

Aire basale : **43,9 m² / ha**
 Hauteur moyenne de canopée : **16,7 m**

Densité de bois moyenne : **0,66 g.cm⁻³**
 Richesse spécifique : **74**
 Indice d'équitabilité : **0,78**
 Indice de diversité de Shannon : **3,38**
 Indice de diversité de Simpson : **0,95**
 Taux d'identification spécifique **96,7 %**

COMPOSITION





***Mimusops elengi* (Sapotaceae)** localement appelé « raporé » est une espèce caractéristique des forêts sèches et des formations littorales. 3 individus ont été recensés sur la parcelle de Koumac. C'est une espèce que l'on rencontre généralement dans les forêts matures



***Zygogynum pomiferum* (Winteraceae)** est une espèce de sous-bois qui dépasse rarement un DBH de 15 cm. On la trouve généralement dans les sous-bois de forêts peu perturbées. Trois individus ont été inventoriés sur la parcelle de Wekori. Les *Zygogynum* font partie d'une des plus anciennes familles de plantes à fleurs

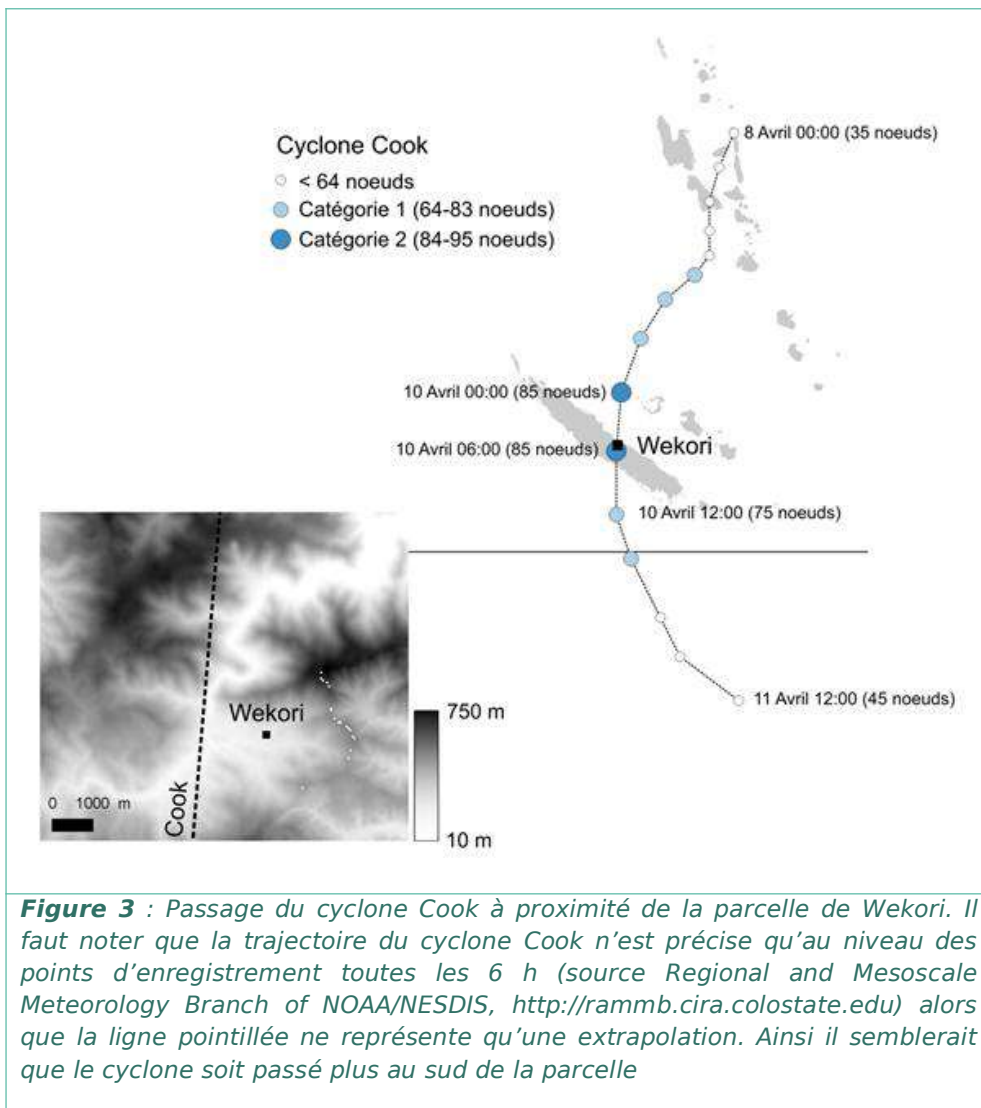
1.2. Dommages causés par le cyclone Cook sur la parcelle de Wekori (1ha)

Le 10 Avril 2017 le cyclone Cook de catégorie 2 a traversé la Nouvelle-Calédonie de Houaïlou à Bourail (Figure 3). Ce cyclone est passé à proximité de la parcelle de 1 ha de Wekori installée deux semaines plus tôt le 27 Mars 2017. Cette événement nous a offert l'opportunité de mesurer les dommages causés par un cyclone sur la forêt néo-calédonienne. Une relecture de la parcelle a été effectuée le 19 Septembre 2017 durant laquelle nous avons noté les dommages sévères : arbres cassés ou déracinés.

Les dommages enregistrés sont relativement faibles (Figure 4), seuls 8 arbres ont été cassés et 7 déracinés sur les 896 arbres de la parcelle (soit moins de 2% des arbres sévèrement endommagés). La faiblesse de ces dommages peut être expliquée par la force modérée du cyclone (catégorie 2). Ces dommages concernent 12 des 75 espèces inventoriées dans la parcelle et ne semblent pas avoir plus affecté une espèce en particulier. A titre de comparaison, l'ouragan Hugo de catégorie 4 qui est passé à proximité du site expérimental de Luquillo à Puerto Rico en 1989 a causé une mortalité de 9% des individus ≥ 10 cm DBH (Zimmerman et al. 1994).

Bien que ces dommages puissent sembler dérisoires, nous faisons l'hypothèse qu'ils sont à l'origine de la structure si particulière des forêts néo-calédoniennes - une forte densité de tiges et une canopée basse. En effet, bien que la parcelle de Wekori ait vraisemblablement été peu exposée aux vents générés par le cyclone Cook et que ce dernier soit passé relativement rapidement sur le territoire avec une intensité moindre, des dommages non négligeables créant de larges trouées ont toutefois été observés.

Comme Webb et al. (2011), nous suggérons que la répétition de ces événements, même de faible ou de moyenne intensité, participent à la structuration des forêts néo-calédoniennes. En effet, la Nouvelle-Calédonie est en moyenne exposée à cinq événements cycloniques par an. Cela se traduit vraisemblablement par une forte rotation dans les forêts néo-calédoniennes (51 arbres morts déjà identifiés sur la parcelle de Wekori avant le passage du cyclone), la création de trouées favorisant la régénération et in fine par une densité élevée de tiges de petit diamètre.



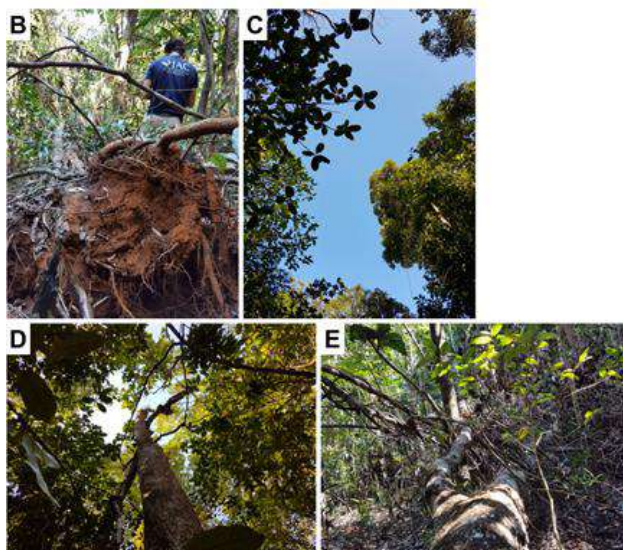
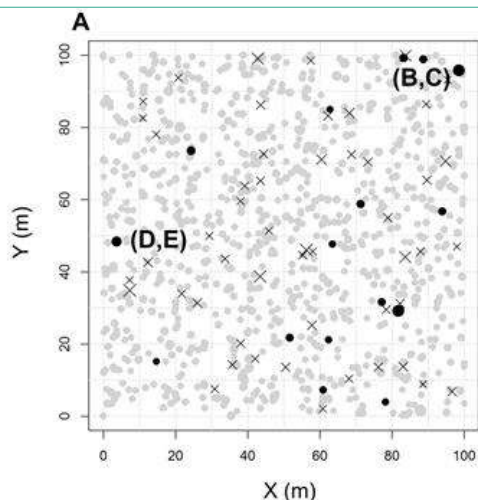


Figure 4 : (A) Cartographie des arbres de la parcelle de Wekori. Les croix noires représentent les arbres morts avant le passage du cyclone Cook (1er lecture), les points noirs représentent les arbres cassés ou déracinés après le passage du cyclone Cook (2ème lecture), la taille des points étant proportionnelle à la taille (diamètre) des arbres. B, C, exemple d'un arbre (*Xylopia dibaccata*, Annonaceae, DBH = 24.0 cm) déraciné et la trouée créée par la chute de l'arbre et D, E, exemple d'un arbre cassé (*Planchonella endlicheri*, Sapotaceae, DBH = 52.5 cm)



2. Organisation de la diversité des forêts humides

Les parcelles permettent d'enrichir notre connaissance sur la variabilité de l'organisation des communautés d'arbres. Nous constatons que les densités d'arbres sont extrêmement variables tandis qu'elles expliquent près de 40% de la richesse floristique (Ibanez et al., 2016). Les valeurs de biomasse sont également variables tout en restant inscrites dans la gamme standard qui caractérise la productivité des forêts humides tropicales. Néanmoins en Nouvelle-Calédonie, cette biomasse est contenue dans le nombre élevé de petite tiges.

2.1. Structure des forêts humides de la province Nord

Le travail de la thèse de Elodie Blanchard, soutenue en décembre 2016 auprès de l'Université de Montpellier, a permis de dégager les principales propriétés des forêts denses humides néo-calédoniennes, de cartographier leur distribution, de prédire leur structure à large échelle mais également de quantifier l'influence de l'environnement et des dynamiques forestières sur leur structuration.

Pour cela, 23 parcelles d'inventaire forestier d' 1 ha (100 m x 100 m) ont été mises en place en province Nord, entre 250 et 900 m d'altitude et entre 1500 et 3000 mm de précipitations annuelles. En plus de quantifier localement l'organisation structurale de ces forêts, ces parcelles ont permis de calibrer un modèle prédictif basé sur l'analyse de la texture de la canopée, à l'aide de la méthode FOTO (Fourier transform Textural Ordination), qui a été appliquée à huit images satellitaires Pléiades à très haute résolution (couvrant 1295 km²). Un tel modèle capable de lier texture et structure repose sur le postulat que la relation allométrique entre le DBH (Diameter at Breast Height) et l'aire de la couronne des arbres de canopée est stable. Nous avons ainsi testé cette relation à l'échelle pantropicale (Blanchard et al., 2016b).

Ses résultats ont montré que les forêts néo-calédoniennes sont denses (1182 ± 233 tiges/ha), présentent une aire basale élevée (44 ± 11 m²/ha), une canopée relativement basse (14 ± 3 m) et une biomasse aérienne caractéristique des forêts tropicales (299 ± 83 t/ha). Elles se distinguent également par une importante variabilité structurale. Cette variabilité est du même ordre tant le long de gradients environnementaux que de gradients de succession forestière. La méthode FOTO appliquée aux images Pléiades a permis de prédire et de spatialiser des paramètres structuraux clés

(tels que la densité de tiges et la biomasse aérienne) à partir de corrélations robustes avec les indices de texture de la canopée ($R^2 \geq 0,6$; $RMSE \leq 20\%$). La méthode s'avère très performante pour détecter les forêts qui comptent une forte densité de grands arbres (diamètre à hauteur de poitrine, $DBH \geq 40$ cm) qui témoignent de forêts caractérisées par une canopée élevée, une faible densité de tiges, une aire basale élevée, une variation importante du coefficient de variation du DBH et une stratification équilibrée.

A l'échelle des massifs montagneux, la structure forestière est principalement influencée par l'insolation potentielle et l'altitude. A l'échelle du versant elle est contrainte par la pente et un indicateur topographique d'humidité. Ces travaux permettront d'estimer les ressources forestières à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie et de définir une nouvelle typologie forestière fondée sur une classification structurale standardisée sur l'ensemble du territoire.

2.2. Structure des forêts humides de la province Nord

Pour répondre à cette question, nous avons cherché à replacer nos résultats obtenus sur les forêts néo-calédoniennes dans leur contexte régional et pantropical afin d'identifier les particularités de ces forêts et comprendre comment ces particularités sont apparues et se maintiennent. En collaboration avec l'université d'Australie du sud et l'herbier du Queensland, nous avons comparé la structure et la composition de 9 des parcelles d'un hectare installées en Nouvelle-Calédonie à 14 parcelles d'un hectare localisées dans d'autres forêts humides du Pacifique sud-ouest ; en Australie, à Fidji, en Papouasie Nouvelle Guinée et aux Îles Salomon (Figure 5). Ces travaux ont été publiés dans la revue *Annals of Botany* (Ibanez et al. 2017).

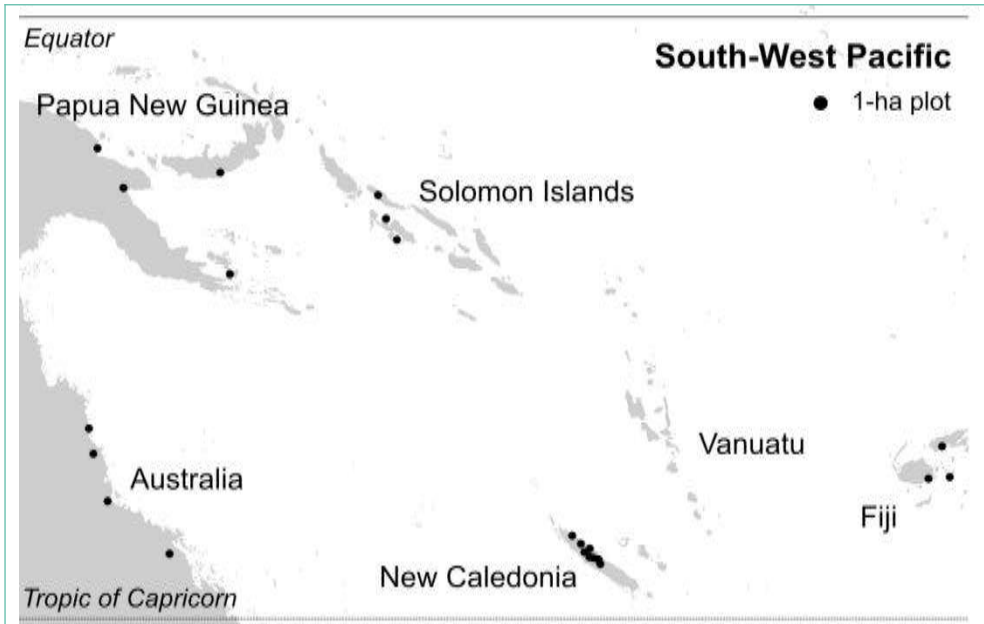


Figure 5 : Réseau de parcelles forestières d'1 ha dans le Pacifique sud-ouest rassemblé en collaboration avec l'université d'Australie du sud et l'herbier du Queensland et zoom sur le réseau de parcelle néo-calédonien. Seules les parcelles situées en forêts denses humides et sur sols non-ultramafiques ont été prises en compte dans l'analyse

Avec en moyenne 1253 tiges à l'hectare les forêts néo-calédoniennes sont très denses en comparaison avec les autres forêts humides du Pacifique sud-ouest. Une densité > 1000 tiges à l'hectare est commune en Nouvelle Calédonie, alors qu'une telle densité n'est observée hors Nouvelle-Calédonie qu'en Australie. Par exemple, la densité de tiges moyenne en Papouasie Nouvelle Guinée et aux Îles Salomon est plus de deux fois inférieure. La forte densité de tige observée en Nouvelle Calédonie s'accompagne aussi d'une densité élevée de fougères arborescentes. L'hypothèse retenue est que c'est la fréquence relativement élevée des cyclones en Nouvelle Calédonie comparée à Fidji, à la Papouasie Nouvelle Guinée et aux Îles Salomon qui explique cette différence de structure (cf. plus haut). Des travaux sont en cours pour tester cette hypothèse mais nous révèlent déjà qu'à une échelle pantropicale les forêts denses humides soumises à au moins un cyclone par décennie ont des densités de tiges plus élevées que les autres.

Les forêts denses humides néo-calédoniennes ne se distinguent pas

de leurs voisins du Pacifique sud-ouest par leur richesse floristique (95 espèces à l'hectare en moyenne). Une synthèse effectuée sur la diversité des forêts des îles de la région Indo-pacifique nous montre qu'en Nouvelle Calédonie comme dans les autres îles, la richesse à l'hectare est avant tout bornée par la taille et l'isolation de l'île et de l'archipel (Figure 6). Cette étude met en avant l'importance des forçages régionaux (taille et isolement des îles et des archipels) sur les assemblages locaux d'espèces (Ibanez et al., soumis, Global Ecology and Biogeography).

La Nouvelle-Calédonie se distingue aussi et bien évidemment, par l'originalité de sa flore. En moyenne dans une parcelle de un hectare, 89% des espèces sont endémiques à la Nouvelle-Calédonie alors que ce taux n'est en moyenne que de 81% en Australie et de 55% à Fidji. Nous montrons que l'originalité des forêts néo-calédoniennes est aussi marquée au niveau du genre ou de la famille. Parmi les taxons les plus abondants et diversifiés, on retrouve ; les Myrtaceae et particulièrement les genres *Syzygium* et *Ptilocalyx*, les Sapindaceae avec les genres *Cupaniopsis* et *Guioa*, les Lauraceae avec le genre *Cryptocarya*, les Sapotaceae avec les genres *Pycnandra* et *Planchonella* ou encore les Meliaceae avec le genre *Dysoxylum*. L'originalité de cette flore s'accompagne aussi de forts changements dans la flore de proche en proche (diversité beta) ce qui complique d'autant la tâche des gestionnaires pour définir la meilleure stratégie de conservation de ces forêts.

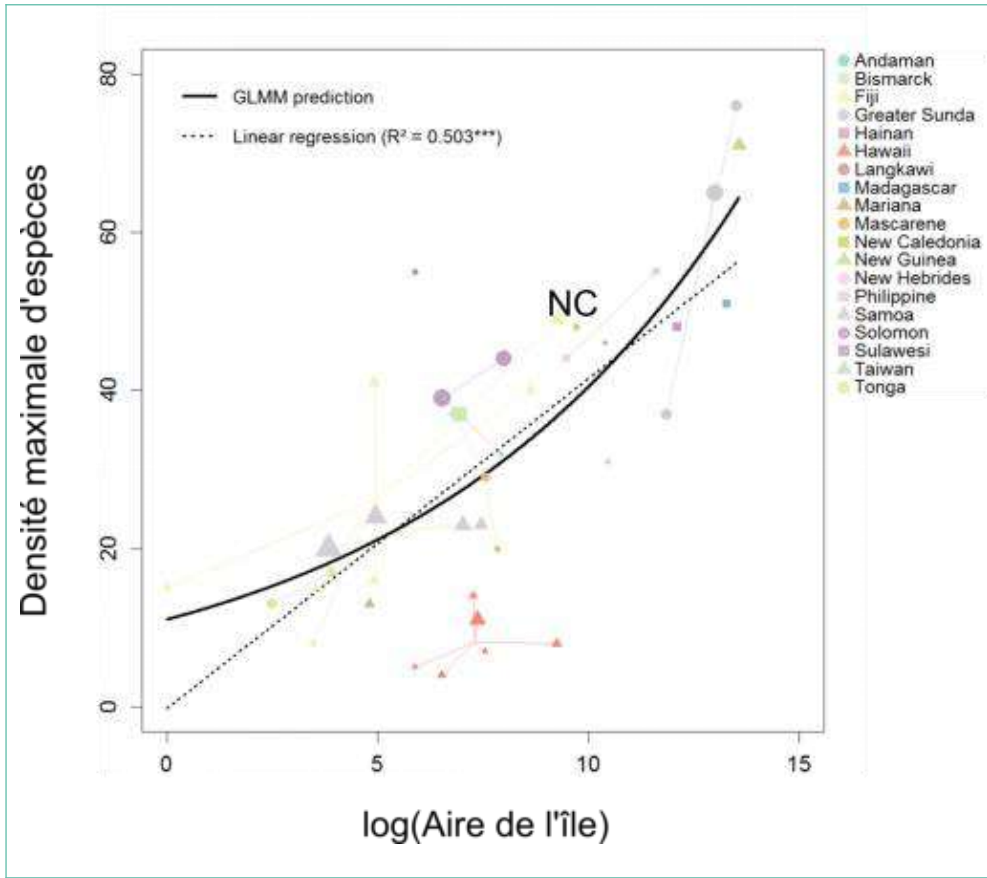
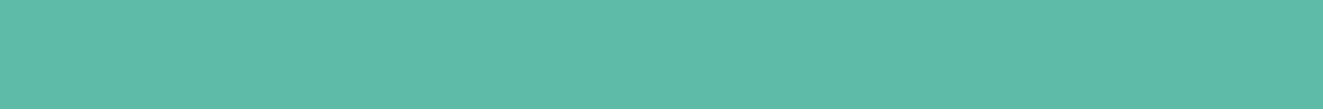


Figure 6 : Relation entre le nombre maximal d'espèces inventoriées par hectare et l'aire des îles. Pour la Nouvelle-Calédonie (NC), comme pour les autres îles de l'Indo-Pacifique l'aire de l'île limite la densité d'espèces



3. L'histoire évolutive des communautés d'arbres

Toutes ces études convergent pour établir que les forêts de Nouvelle-Calédonie sont constituées de communautés d'arbres présentant une organisation à la fois dictée par l'insularité du territoire et la position inter-tropicale de l'île mais également par le régime cyclonique qui caractérise la région Pacifique. De ces résultats découlent des questions majeures portant sur les processus évolutifs qui sont impliqués dans les distributions et les structurations de ces communautés d'arbres. Les assemblages actuels relèvent-ils seulement du hasard, d'une dispersion limitée, d'un régime de perturbations aléatoires et fréquentes, de l'existence de filtres environnementaux (tolérance/intolérance aux propriétés contraignantes des substrats ultramafiques, à la sécheresse, ou encore aux conditions climatiques singulières des forêts de montagne), de phénomènes de compétition inter- et intra-spécifique, ou encore d'une dynamique passée des forêts (périodes d'expansions et contractions) sous l'effet d'oscillations climatiques ? Quelle est la part respective de chacun de ces processus ?

Pour mieux distinguer la part liée aux conditions de l'environnement de celle en lien avec l'histoire évolutive des espèces nous avons cherché à intégrer l'histoire évolutive de nos communautés d'arbres au travers d'une étude phylogénétique. Plus spécifiquement plusieurs méthodes développées dans le domaine de la phylogénie permettent d'associer un "arbre" dit phylogénétique à la matrice actuelle des communautés d'espèces d'arbres dans le but d'identifier l'existence de processus évolutifs ayant structuré les communautés d'arbres. En d'autres termes nous cherchons à savoir si l'organisation des communautés résulte, au moins en partie, d'une histoire évolutive commune.

3.1. L'arbre phylogénétique

Un arbre phylogénétique est un arbre schématique montrant les relations de parentés (« les branches ») entre des espèces végétales, chacune correspondant à une extrémité (« les feuilles »). Il s'apparente à un arbre généalogique d'espèces, toutefois il en diffère puisque chaque ramification (ou « nœud ») représente l'ancêtre hypothétique commun (non connu et supposé éteint) de ses descendants.

Un arbre phylogénétique est un support de travail permettant de

raconter une histoire évolutive. Il fournit deux informations évolutives primordiales : (1) les relations de parenté entre espèces (est-ce que deux espèces sont évolutivement proches ou éloignées ?), (2) les longueurs de branches (de combien deux espèces de l'arbre sont-elles différentes ?), lesquelles transcrivent des vitesses d'évolution (l'évolution d'un nœud vers une espèce ou vers un autre nœud a-t-elle été rapide ou lente ?) et des âges d'apparition (quand sont apparues les espèces ou les lignées d'espèces ?).

Un arbre phylogénétique peut être construit suivant deux méthodes différentes : (1) à l'aide de séquences d'ADN (assemblage moléculaire), (2) à l'aide de connaissances préalables des relations de parenté déjà publiées dans la littérature mais dispersées (assemblage manuel, technique dites des super-arbres). Dans le cadre du projet Cogefor, seule la deuxième méthode est applicable étant donné que la majorité des espèces d'arbres de Nouvelle-Calédonie n'ont encore jamais été séquencées. De manière plus concrète, l'élaboration du super-arbre phylogénétique pour les 1270 espèces d'arbres présentes en Nouvelle-Calédonie s'est déroulée en trois étapes (Figure 7). Un super-arbre des 97 familles d'arbres a été construit en utilisant un arbre préliminaire daté de toutes les familles d'Angiospermes mondiales (Magallon et al., 2015). Les 289 genres d'arbres ont ensuite été incorporés dans ce dernier super-arbre au sein de leurs familles respectives en se basant sur plusieurs études antérieures, puisque la plupart des genres sont déjà séquencés. Les 1270 espèces ont finalement été ajoutées au super-arbre et classées de manière aléatoire dans leurs genres respectifs puisque la majorité n'ont jamais été séquencées.

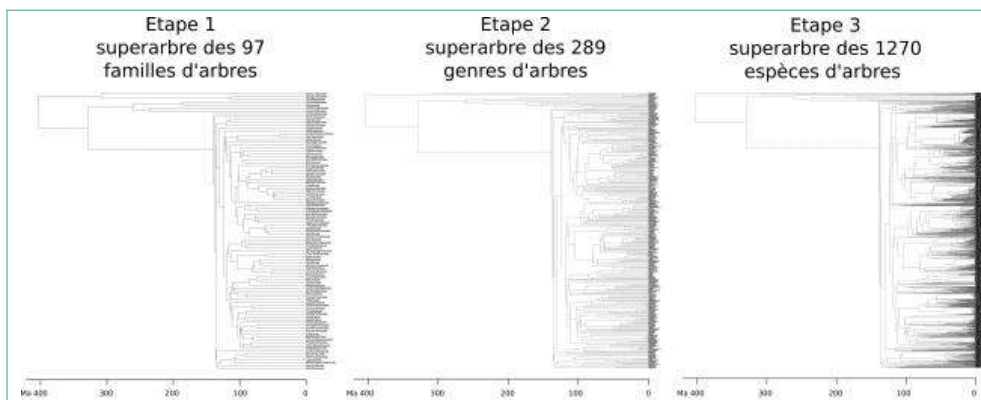


Figure 7 : Mise en place du super-arbre phylogénétique des espèces d'arbres de la Nouvelle-Calédonie

3.2. Les indices de diversité phylogénétiques

A partir du super-arbre, différents indices dits de diversité phylogénétique peuvent être calculés pour chaque communauté d'arbres, en utilisant simultanément les relations de parenté entre espèces et leurs longueurs de branches. L'intégration de ces deux informations permet de quantifier plus précisément à quel point deux espèces sont différentes ou semblables (de par la distance phylogénétique les séparant) contrairement aux outils de distance taxonomique communément utilisés et basés sur une simple comparaison binaire de type absence / présence.

Le calcul et l'interprétation de ces indices permettent entre autres de déterminer : 1) des zones refuge forestières, 2) des couloirs de dispersion passée d'espèces, 3) des communautés d'arbres 'surdispersées' (c.-à-d. régions d'immigration élevée d'espèces) vs. 'agglomérées' (c.-à-d. régions de diversification locale importante) ; de caractériser 4) les effets de la compétition sur l'assemblage des communautés locales d'arbres ; et de révéler 5) des filtres environnementaux ayant structuré la composition des forêts néo-calédoniennes.

De manière détaillée, appliqués à une communauté d'arbres ces indices permettent de caractériser sa quantité d'histoire évolutive (diversité phylogénétique alpha, indice PD), et d'expliquer la coexistence de ses espèces (utilisation des indices MPD, MNTD, NTI et NRI). Le processus évolutif ayant majoritairement impacté la structure de la communauté est alors identifié (effets de la compétition ou d'un filtre environnemental). D'autres indices permettent de quantifier à quel point deux communautés d'arbres sont semblables ou différentes sur le plan évolutif (diversités phylogénétiques beta, utilisation des indices beta MPD, beta MNTD). Ainsi la comparaison phylogénétique au sein d'un ensemble de communautés permet des regroupements basés sur leurs similarités phylogénétiques transcrivant généralement une histoire évolutive commune dans le cas des communautés les plus similaires.

Ces outils et ces indices phylogénétiques sont désormais opérationnels et disponibles pour s'intégrer à toutes les futures études nécessitant un cadre évolutif (p.ex. les forêts de basse altitude, les forêts de montagne, la dynamique des forêts sous l'effet de perturbations de vaste ampleur). Le super-arbre des espèces d'arbres est en effet dorénavant disponible et les scripts R pour le calcul des indices phylogénétiques sont mis au point.

3.3. Organisation fonctionnelle et évolutive de la diversité des communautés

La composition des forêts néo-calédoniennes est très hétérogène, c'est-à-dire que de proche en proche, on observe d'importants changements dans la liste des espèces. L'une des grandes hypothèses est que l'environnement, par exemple la disponibilité en eau, agit comme un filtre qui permet ou non l'installation et la survie des espèces. Ce filtre repose sur l'hypothèse de l'existence de fonctionnalités (e.g. physiologiques, mécaniques, biologiques) qui permettent à l'espèce de tolérer (ou non) l'impact du filtre environnemental. Pour révéler l'existence d'un filtre environnemental, des indices de diversité phylogénétique (indices de Pagel λ et κ , et d'Abouheif) sont utilisés pour projeter les traits fonctionnels tels que la densité de bois, la hauteur, le diamètre ou encore la SLA des feuilles des arbres sur l'arbre phylogénétique. Ces indices permettent de définir à quel point deux espèces se ressemblent vis-à-vis du trait. En cas de fort signal phylogénétique au sein de la communauté étudiée, le trait structure la phylogénie et révèle ainsi l'existence d'un filtre environnemental.

Pour tester l'existence d'un filtre environnemental, nous avons utilisé une approche fonctionnelle au travers de l'évolution de la densité de bois des arbres et des peuplements le long d'un gradient d'aridité qui s'étend depuis les forêts sclérophylles jusqu'aux forêts humides de la côte ouest (Ibanez et al., 2016b). La densité de bois est en effet connue pour être un indice de la tolérance des espèces à l'aridité : plus la densité de bois d'une espèce est élevée plus elle est susceptible de tolérer les conditions d'aridité. La densité de bois a été échantillonnée sur 1580 arbres appartenant à 175 espèces sélectionnées dans 9 sites différents répartis le long d'un gradient de pluviométrie. Les résultats montrent que les communautés sont composées d'espèces dont la densité de bois moyenne est plus élevée dans les milieux arides. Néanmoins, cette corrélation n'est pas linéaire. Seules les communautés situées dans les extrêmes du gradient d'aridité (< 1500 mm) présentent une densité de bois moyenne significativement plus élevée qu'attendue par le hasard. Le signal de ce trait, calculé à travers le super-arbre phylogénétique, montre que dans la sous-classe des Superrosidae, les Myrtales et les Sapindales contiennent des genres présentant des densités de bois élevées ($>0,7$ g.cm³) et une distribution majoritaire dans les environnements arides (en orange, Figure 8). A l'inverse, dans la sous-classe des Superasteridae, le clade regroupant les Apiales, les Escalloniales et les Paracryphiales contiennent des genres ayant des densités de bois faibles ($< 0,5$ g.cm³) et une distribution majoritaire

dans les milieux humides (en vert, Figure 8). En d'autres termes, certaines grandes lignées d'arbres possèdent une densité de bois plus élevée que le hasard ne le prédit, ce qui leur confère un avantage significatif pour occuper les milieux arides. Inversement, d'autres lignées possèdent une densité de bois plus faible que par hasard et sont présentes majoritairement dans les forêts humides.

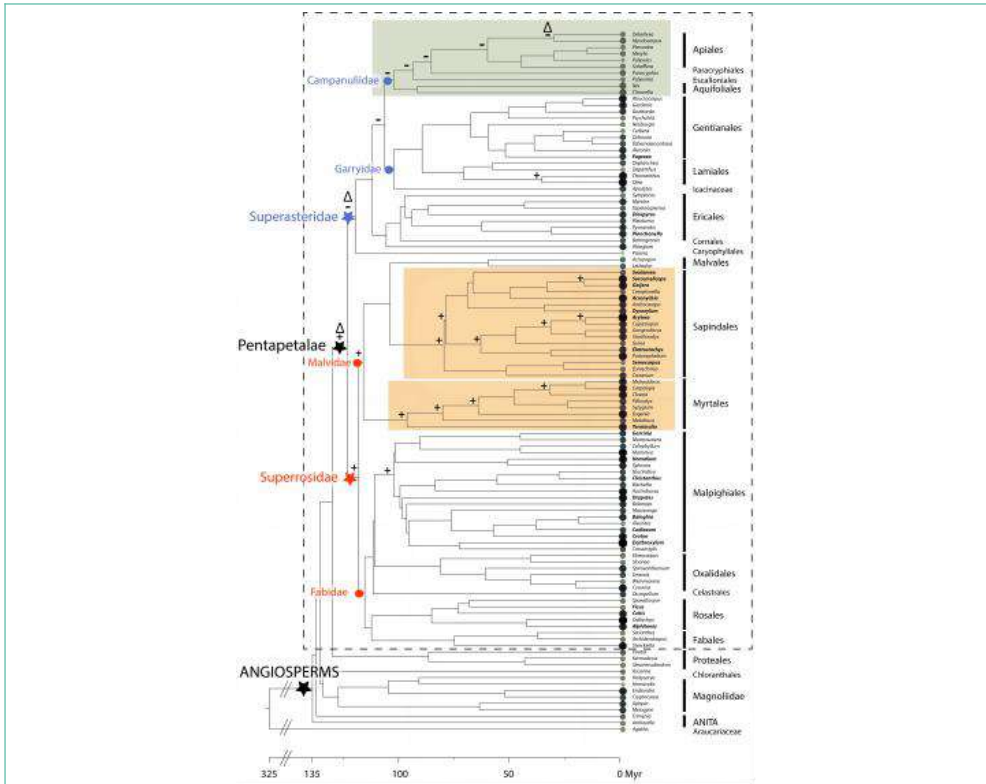
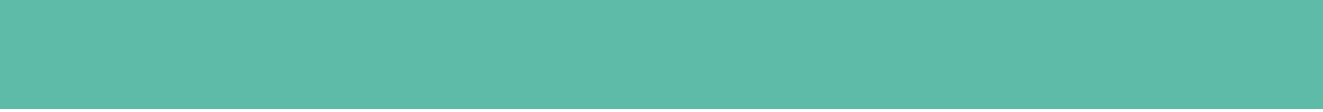


Figure 8 : Répartition non aléatoire des valeurs de densité de bois sur l'arbre phylogénétique (en vert les clades présentant majoritairement des faibles densités de bois et en orange les clades à fortes densités de bois, Ibanez et al., 2016b)



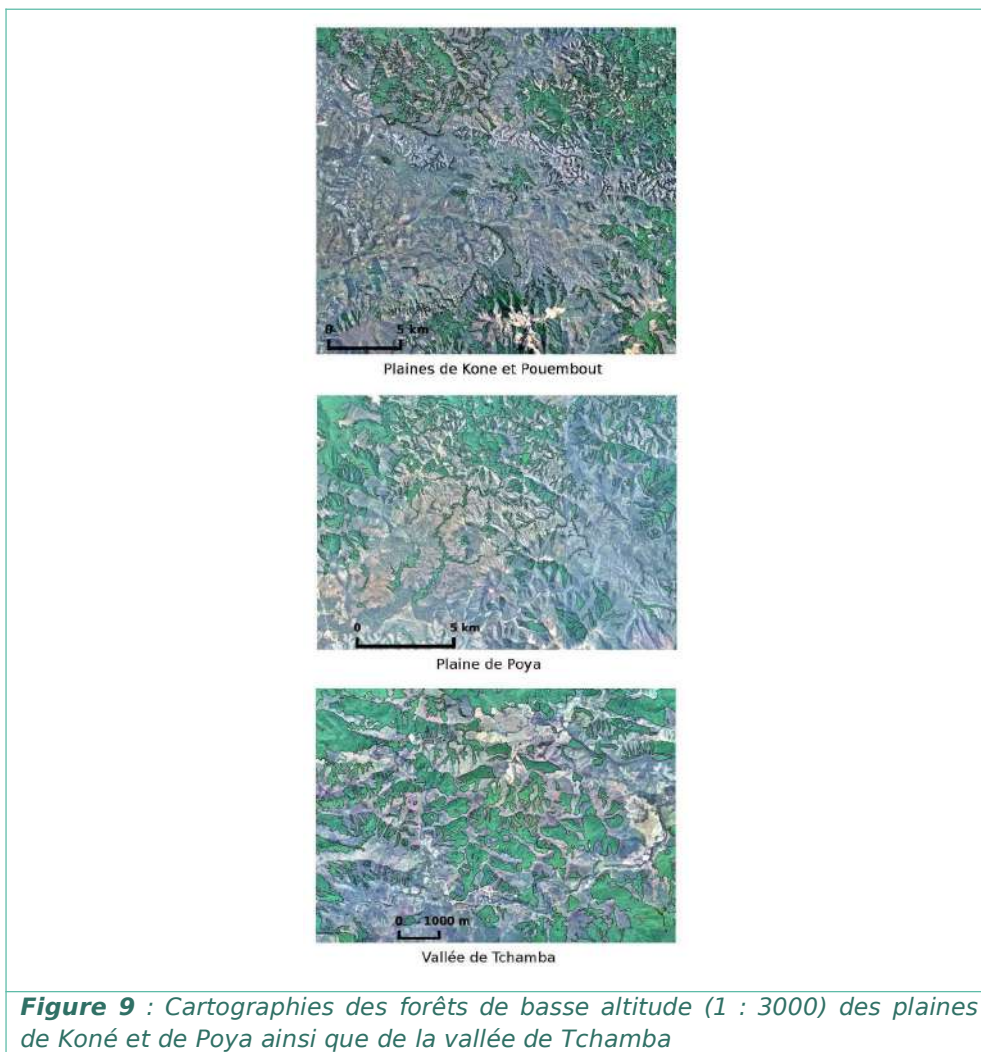
4. Les forêts de basses altitudes

Un sujet de thèse intitulé “Contribution des forêts de basse altitude au maintien de la diversité en Nouvelle-Calédonie” Université de Montpellier, co-encadré par F. Munoz (Prof. Université de Grenoble) et Ph. Birnbaum (Chercheur Cirad/Amap) a débuté en octobre 2016 afin de vérifier plusieurs hypothèses relatives à l’importance “potentielle” de ces forêts de basse altitudes dans le fonctionnement global des écosystèmes de la Nouvelle-Calédonie et plus particulièrement des formations forestières de la province Nord. Ce sujet repose sur le constat qu’environ 80% de la surface plane de la Grande-Terre se situe à moins de 500 m d’altitude ce qui ne représente plus que 50% de la surface totale des forêts. Néanmoins ces forêts extrêmement fragmentées abritent encore plus de 90% des espèces d’arbres de Nouvelle-Calédonie (au moins une occurrence connue). Par ailleurs, l’asymétrie de la disponibilité hydrique (pluviométrie et saisonnalité) entre la côte est et la côte ouest combinée à une topographie complexe génère une diversité de conditions environnementales et d’habitats qui offrent potentiellement une gamme de niches écologiques très étendue (depuis les conditions de la forêt sèche dans les plaines de la côte ouest jusqu’à celles des forêts humides dans les talwegs notamment). Enfin ces forêts sont soumises à des impacts anthropiques nombreux et récurrents tels que les feux, l’urbanisation, la dégradation par les espèces invasives qui concourent à renforcer l’état de fragmentation et fragilisent d’autant la résilience de ces écosystèmes. La combinaison entre une richesse et une menace élevée font de ce compartiment environnemental, largement sous-évalué, le secteur dans lequel la conversion de l’écosystème naturel a été le plus intense et qui constitue de fait, un enjeu important de conservation pour le maintien du fonctionnement des écosystèmes forestiers.

4.1. Cartographie des Forêts de Basse Altitude (FBA)

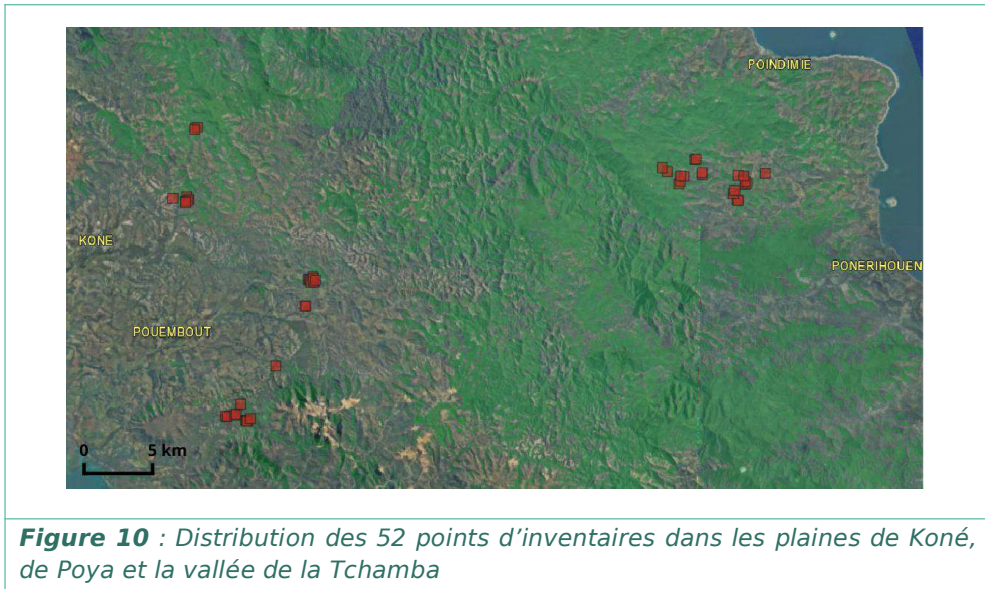
Dans le cadre de l’étude des FBA et dans la continuité de la digitalisation des massifs forestiers de la province Nord au 1 : 3000, les plaines de Pouembout et de Koné, la plaine de Poya, et la vallée de Tchamba ont été cartographiées (Figure 9). Ces données spatiales mettent en évidence un habitat forestier très fragmenté, dont les forêts résiduelles sont souvent restreintes aux talwegs et le long des cours d’eau, suggérant une répartition spatiale fortement contrainte par le régime des feux. La prise en compte de ces

fragments forestiers permet d'estimer de manière plus précise l'aire des forêts de basse altitude qui restait sous-estimée si l'on considère les données des précédentes cartographies des forêts de Nouvelle-Calédonie.



4.2. Nouvelles données concernant les forêts de basse altitude

Un nouveau réseau d'inventaires est mis en place dans le but d'étudier les forêts de basse altitude (FBA) de la province Nord. Un dispositif adapté de points d'inventaires est déployé pour mieux appréhender la fragmentation extrême de ces forêts. Le point d'inventaire correspond à une parcelle circulaire de 400 m² soumise au même protocole d'inventaire que pour les autres parcelles du réseau NC-PIPPN. Tous les individus présentant un DBH supérieur à 10 cm sont inventoriés et identifiés au rang d'espèce. Au total, 52 parcelles réparties selon un transect est-ouest ont été mises en place, soit une surface couverte totale de 2,08 hectares (Figure 10)



4.3. Comprendre les paramètres qui structurent la diversité des FBA : une approche à deux échelles

La première partie de ce travail a pour but la caractérisation des facteurs environnementaux qui structurent les communautés d'arbres des FBA en agissant comme contraintes sur les propriétés ou « traits » fonctionnels des espèces. La forte diversité bêta des forêts néo-Calédoniennes, mise en évidence par les études précédentes, suggère que la dispersion limitée et les processus neutres sont des facteurs qui structurent fortement la composition floristique des forêts. Comme nous l'avons vu précédemment, l'approche fonctionnelle est donc particulièrement pertinente pour étudier l'action des filtres environnementaux dans le contexte calédonien. À l'échelle de la Nouvelle-Calédonie, les travaux précédents suggèrent une forte influence du gradient de précipitations est-ouest sur la densité de bois moyenne des communautés d'arbres, probablement à cause de son implication hydraulique dans la résistance à la sécheresse (cf. plus haut). Dans la continuité de ce travail, nous cherchons (1) à comprendre comment ce gradient de précipitations influence la structure fonctionnelle des communautés d'arbres à l'échelle des forêts fragmentées de basse altitude en comparant des communautés situées sur la côte est (Précipitations moyenne annuelle, PMA : 2300-2600 mm) à d'autres situées sur la côte ouest (PMA : 1000-1300 mm) (2) comment les gradients environnementaux locaux liés à la topographie modulent cette influence, en comparant des communautés situées sur des crêtes et dans des fonds de talwegs.

Pour qualifier les positions topographiques des parcelles, nous avons utilisé un indice topographique (*topographic wetness index* - TWI) permettant d'estimer localement le contrôle de la topographie sur l'écoulement des eaux. Cet indice est connu pour être corrélé à différents paramètres liés à la disponibilité hydrique et en nutriments, notamment la profondeur du sol. Cet indice a été calculé pour l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie avec une résolution de 10 m.

Pour cette étude, nous avons construit un schéma d'échantillonnage stratifié de manière symétrique sur les deux gradients étudiés en disposant 20 parcelles sur la côte est et 20 parcelles sur la côte ouest. Dans chacun de ces deux ensembles de 20 parcelles, 10 parcelles ont été placées aléatoirement dans les zones à forte valeurs de TWI, soit dans des fonds de talwegs, et 10 parcelles ont été placées aléatoirement dans les zones à faible valeurs de TWI, soit sur des crêtes. Nous testons l'hypothèse que le régime précipitations plus faible de la côte ouest représente un filtre

environnemental sur la distribution des espèces d'arbres, en agissant comme une contrainte sur leurs traits fonctionnels. Nous testons aussi l'hypothèse que les contraintes liées au stress hydrique seront accentuées sur les crêtes, qui présentent un déficit dans la redistribution des eaux de pluie.

Les traits fonctionnels utilisés dans cette première phase portent sur les propriétés des feuilles et du bois (Figure 11). Quatre traits fonctionnels connus pour représenter des trade-off entre les stratégies de conservation des ressources, de rapidité de croissance et de résistance à la sécheresse ont été mesurés :

- L'aire foliaire spécifique (*specific Leaf Area*, SLA), qui correspond au rapport entre l'aire des feuilles fraîches et le poids sec des feuilles exprimé en cm^2/g . Ce trait est lié à l'investissement des espèces dans leur masse foliaire et représente un indicateur de la stratégie de croissance et de conservation des ressources des espèces. Le SLA est généralement corrélé positivement à la vitesse de croissance des espèces, et les espèces présentant un faible SLA sont souvent associées à des milieux pauvres en nutriments. Une forte valeur de SLA est aussi associée à une tolérance aux milieux ombragés.
- L'aire foliaire (*Leaf Area*, LA), qui correspond à la surface moyenne des feuilles d'une espèce exprimée en cm^2 . L'aire foliaire d'une espèce est souvent liée à sa tolérance à différents stress, dont le stress hydrique. Une grande surface foliaire favorise la conductivité hydraulique alors qu'une faible surface foliaire permet de limiter l'évaporation en cas de sécheresse. Les espèces ayant un faible LA sont donc généralement mieux adaptées aux stress environnementaux.
- Le rapport entre le poids sec et le poids frais des feuilles (*Leaf Dry-Matter Content*, LDMC), exprimé en mg/g . Le LDMC est généralement corrélé positivement à la durée de vie des feuilles et négativement à la vitesse de croissance des espèces, il est donc souvent négativement corrélé au SLA. La valeur de ce trait tend à être faible pour les espèces présentes dans les environnements fortement perturbés.
- La densité de bois (*Wood density*, WD), mesurée à partir d'un prélèvement dans le tronc (carotte) à hauteur de poitrine, qui correspond au rapport entre le poids sec et le volume de l'échantillon de bois, exprimé en g/cm^3 . Ce trait est impliqué dans de nombreuses fonctions, il représente un *trade-off* entre rapidité de croissance et longévité et il est négativement corrélé au risque d'embolisme. Les espèces à forte densité de bois sont donc plus adaptées au stress hydrique, comme nous l'avons vu précédemment.

a)



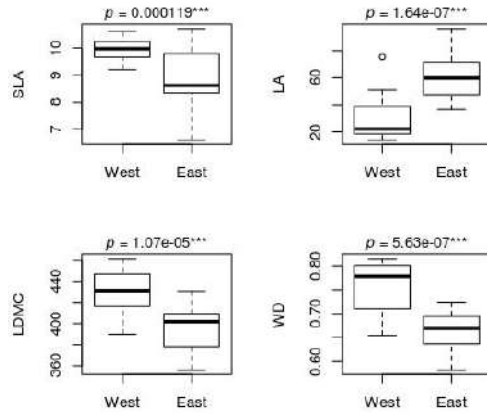
b)



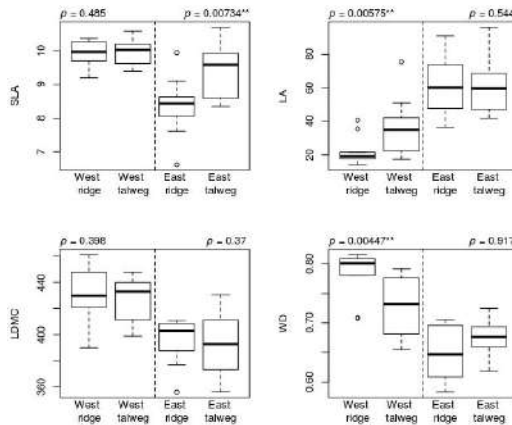
Figure 11 : (a) Petites feuilles de *Guioa villosa* (gauche) et grande surface foliaire de *Ficus otophora* (droite). (a) Carottes de bois pour la mesure de la densité

4.4. Un filtre environnemental fort sur la structure fonctionnelle des FBA de la côte ouest

Les communautés des forêts de basse altitude situées sur la côte est et celles de la côte ouest présentent des structures fonctionnelles clairement différentes (les tests sont significatifs pour les quatre traits mesurés, Figure 12). En moyenne, les communautés d'arbres de la côte ouest ont des surfaces foliaire plus faibles et un bois plus dense que les communautés de la côte est. Ces deux traits fonctionnels représentent un trade-off entre la conductivité hydraulique et la résistance à la sécheresse et au risque d'embolisme. Ces résultats suggèrent l'existence d'un filtre environnemental lié aux contraintes hydriques des environnements plus secs de la côte ouest, et viennent confirmer les résultats des études précédentes concernant la densité de bois en Nouvelle-Calédonie. Les espèces ayant des faibles densités de bois et/ou des surfaces foliaires élevées ne sont pas adaptées à ces milieux arides du fait du risque trop élevé de forte évaporation et/ou d'embolisme. Les communautés de la côte ouest présentent des valeurs de LDMC et de SLA plus élevées que celles de la côte est, les communautés d'arbres de la côte ouest ont donc des feuilles plus fines mais plus denses que celles de la côte est. Ce résultat suggère des stratégies différentes : une tendance à la conservation de ressources pour les communautés de la côte est et, au contraire, une stratégie d'acquisition plus rapide des ressources sur la côte ouest. Ces tendances pourraient être liées à un régime de perturbations, impliquant par exemple les feux et l'herbivorie, plus soutenu sur la côte ouest et donc des communautés d'arbres représentant des stades de succession plus précoces.



a)



b)

Figure 12 : Influence des précipitations sur la distribution des traits fonctionnels (SLA : Surface foliaire spécifique ; LA : Surface foliaire ; LDMC : Teneur en matière sèche des feuilles ; WD : Densité de bois). (a) comparaison entre les communautés de la côte est et de la côte ouest, (b) comparaison entre les communautés des crêtes et les communautés des fonds de talwegs (Les lignes en pointillé différencient les inventaires de la côte ouest et de la côte est)

4.5. Une influence de la disponibilité hydrique sur la structure fonctionnelle des FBA modulée par la topographie sur la côte ouest

Dans les forêts de basse altitude de la côte ouest, les communautés situées sur les crêtes ont en moyenne un bois plus dense et des feuilles plus petites, ce qui suggère que le filtre environnemental lié à la disponibilité hydrique mis en évidence par les différences entre les communautés à l'est et à l'ouest est modulé par la topographie via la redistribution des eaux de pluie via l'écoulement et le stockage dans le sol. Cependant, les intervalles entre les valeurs extrêmes des communautés de ces deux extrêmes topographiques montrent que les traits fonctionnels sont plus contraints sur les crêtes (Figures 12 et 13), ce qui suggère qu'une majorité des espèces présentes dans les communautés des crêtes peuvent subsister au sein des communautés des fonds de talwegs. La répartition des FBA ayant tendance à être restreinte aux fonds de talwegs par les pressions anthropiques, notamment par les feux, ces communautés pourraient donc être considérées comme des réservoirs de biodiversité favorisant naturellement la recolonisation de la forêt vers les crêtes.

4.6. Les FBA de la côte est sous l'influence d'autres contraintes environnementales

Contrairement à ce qui est observé sur la côte ouest, la position topographique des communautés d'arbres des FBA de la côte est ne génère pas de différences de surface foliaire et de densité de bois. Cela suggère que la position topographique de ces communautés ne module pas les contraintes environnementales de la même manière à l'est et à l'ouest. Le régime de précipitations soutenu de la côte est est probablement suffisamment en excès pour que les communautés situées sur les crêtes ne soient pas soumises à des contraintes hydriques plus fortes par rapport aux communautés situées dans les talwegs. Par contre, sur la côte est, les communautés situées sur les crêtes ont en moyenne des valeurs de SLA plus faibles que celles des talwegs. Les communautés de la côte est se différencient donc le long d'un gradient opposant acquisition et conservation des ressources, les communautés des crêtes ayant une structure fonctionnelle traduisant une stratégie de conservation des ressources par rapport à celles des talwegs (Figure 13). L'accumulation des nutriments dans les talwegs pourrait expliquer ce résultat.

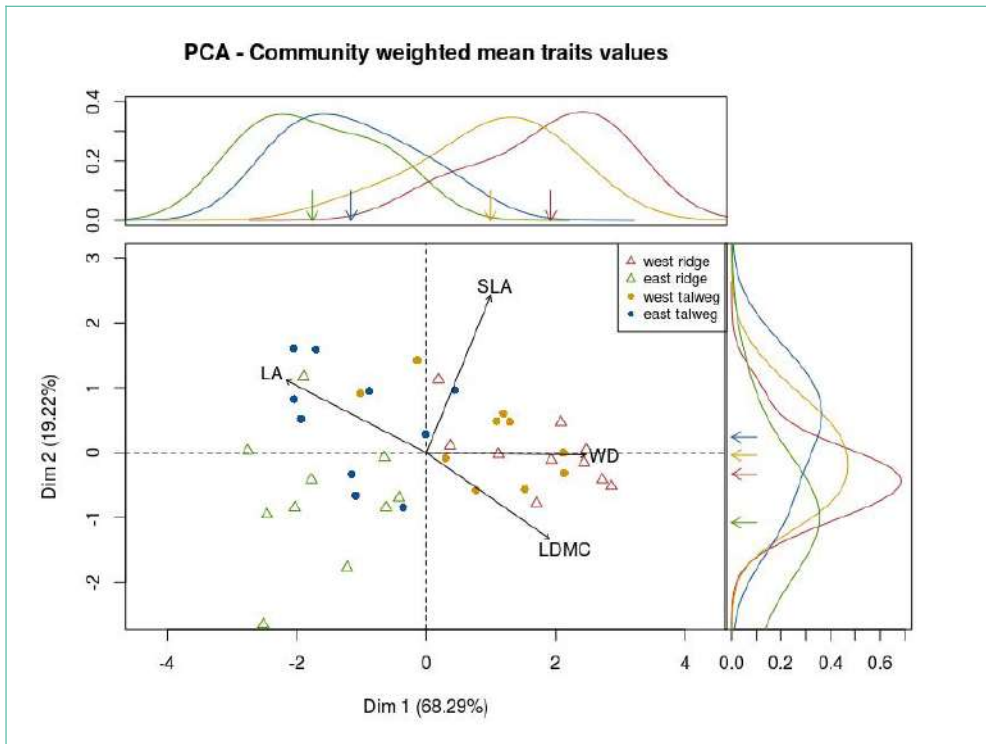


Figure 13 : Répartition des communautés dans l'espace de variation des traits fonctionnels représentés par les deux axes principaux (87.51% de la variation est expliquée par les deux axes représentés). Estimations de densités représentées en haut et à droite pour l'axe 1 et l'axe 2 respectivement. La répartition des valeurs sur l'axe 2 montre clairement une contrainte plus forte sur les communautés de la côte ouest situées sur des crêtes. Les flèches indiquent les moyennes de chaque classe topographique des côtes est et ouest projetées sur les axes 1 et 2

4.7. Comprendre comment la fragmentation influence les dynamiques qui façonnent la diversité des forêts de basses altitudes

Après avoir étudié les déterminants de leur structure fonctionnelle à différentes échelles, la prochaine étape de l'étude des forêts de basse altitude (FBA) est d'évaluer l'influence de la fragmentation des habitats forestiers sur les dynamiques qui structurent leur diversité. En effet, l'état de fragmentation avancé de ces forêts implique une modification potentiellement importante des dynamiques de migrations des espèces et de renouvellement des communautés. Dans les paysages les plus fragmentés, comme la plaine de Koné, l'hypothèse d'une forte implication de la limitation à la dispersion sera notamment testée. Une telle dynamique favoriserait l'influence des processus stochastiques à l'échelle de la communauté à cause d'une réduction de la fréquence de renouvellement des espèces, se traduisant par une perte de diversité taxonomique dans les communautés concernées. D'autre part, un régime de perturbations soutenu pourrait favoriser des espèces ayant des traits fonctionnels adaptés à une acquisition rapide des ressources. L'hypothèse faite ici est que la fréquence des perturbations serait traduite par un filtre environnemental sur les traits fonctionnels liés au trade-off acquisition-conservation des ressources. Pour tester ces différentes hypothèses, le réseau de parcelles de 400 m² actuel sera élargi pour couvrir un maximum de situations de densité d'habitat et de densité de lisières. Les résultats de ce travail permettront notamment de mieux évaluer les risques pour la biodiversité engendrés par la fragmentation des forêts de basse altitude.



5. Modélisation spatiale de la richesse et de la composition en espèces dans les forêts de Nouvelle-Calédonie

Comprendre comment les communautés s'organisent dans l'espace est un prérequis essentiel à la mise en place de stratégies de conservation efficaces. Dans ce chapitre, nous aborderons les dernières avancées du partenariat Cogefor en matière de modélisation spatiale des communautés. En plus de fournir des supports cartographiques pour l'aide à la décision, ce chapitre met en lumière certains des mécanismes qui structurent les communautés des forêts de Nouvelle-Calédonie. Il s'appuie sur les dernières générations de modèles de distribution que nos travaux publiés dans des revues internationales à comité de lecture contribuent à enrichir.

Il existe deux grandes familles de modèles qui permettent de spatialiser la richesse spécifique : 1) les modèles macro-écologiques (MEM) qui consistent dans un premier temps à assembler des données d'espèces pour décrire certains attributs des communautés puis à les modéliser en relation avec des prédicteurs environnementaux (*'assemble first, predict later'*) ; et 2) les S-SDM qui consistent d'abord à prédire la distribution des différentes espèces en relation avec des variables environnementales puis à assembler ces prédictions pour décrire les communautés qui en découlent (*'predict first, assemble later'*).

5.1. Modèles macro-écologiques (MEM)

La télédétection est reconnue comme une technique prometteuse qui viendra probablement façonner la future génération de modèles de communauté (He et al. 2015). Le NDVI (*normalized difference vegetation index*) représente un des indices spectraux issus de la télédétection les plus communément utilisés dans la littérature. Il représente une mesure de la quantité de vert calculée à partir de la réflectance dans les portions rouge et proche infrarouge du spectre électromagnétique. Un nombre croissant d'études utilise le NDVI pour prédire la richesse spécifique car le NDVI serait un bon indicateur de la productivité primaire nette qui, elle-même, serait intimement liée à la diversité en espèces (Liang et al. 2016). Cependant, la relation entre le NDVI et la richesse spécifique reste encore mal comprise à cause de facteurs biotiques et abiotiques

corrélés qui influencent la valeur de ce NDVI.

La relation NDVI-richesse spécifique varie au cours du temps, de façon à la fois inter-annuelle et intra-annuelle. Ainsi, cette variation pourrait affecter la qualité des MEM basés sur le NDVI. La moyenne et la variance ainsi que les extrema de NDVI mesurés sur des pas de temps annuels, saisonniers voire mensuels sont des variables exploratoires souvent utilisées pour prédire la richesse spécifique. Nous avons démontré que ces statistiques sont souvent simplistes et peuvent ne pas capturer le moment exact auquel la productivité est la mieux corrélée à la richesse spécifique (qui ne correspond pas forcément aux extrema climatiques mais doit aussi dépendre de la chronologie des événements climatiques passés). Pour cela, nous avons examiné la variation de la relation NDVI-richesse spécifique à haute résolution temporelle (16 jours) et sur une longue période (15 ans au travers de 835 images satellites MODIS (produit MYD13Q1 issu du satellite Aqua) acquises à une résolution spatiale de 250 m (<http://ivfl-info.boku.ac.at/>). La significativité de la relation NDVI-richesse spécifique a été étudiée au travers du réseau des parcelles d'1 ha, à l'aide de modèles linéaires (Figure 14).

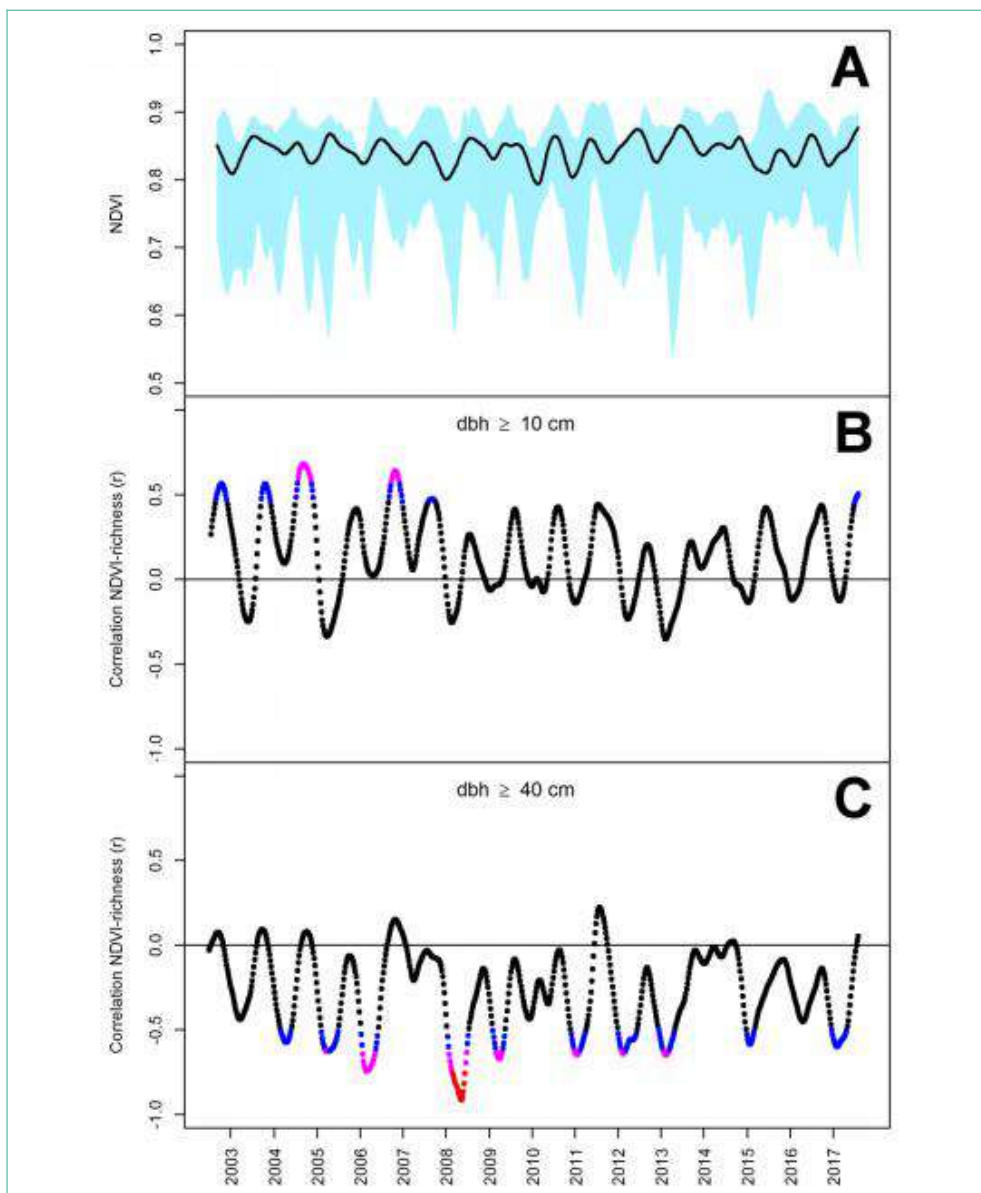


Figure 14 : Variation temporelle du NDVI au sein de 19 parcelles d'un hectare (A) et de sa capacité à prédire la richesse spécifique des arbres ayant un DBH ≥ 10 cm (B) et 40 cm (C). A : la ligne noire représente la moyenne de NDVI et la surface bleue l'intervalle dans lequel se situent toutes les valeurs. B et C : la couleur des points indique le niveau de significativité des corrélations : P-value ≥ 0.05 (noir); $0.05 < P\text{-value} \leq 0.01$ (bleu); $0.01 < P\text{-value} \leq 0.001$ (violet); P-value < 0.001 (rouge)

Certaines images pouvant être sélectionnées via une approche par 'screening' ont un pouvoir prédictif de la richesse spécifique bien

plus important que les statistiques descriptives classiques (Figure 14 et 15). Par conséquent, les MEM basés sur le NDVI peuvent être significativement améliorés au travers d'une utilisation moins systématique de l'ensemble des images constituant une série temporelle de NDVI. Cette méthode basée sur le NDVI (en particulier celui mesuré par le système satellitaire héliosynchrone MODIS) représente une excellente opportunité pour prédire la distribution de la richesse spécifique dans les forêts de Nouvelle-Calédonie.

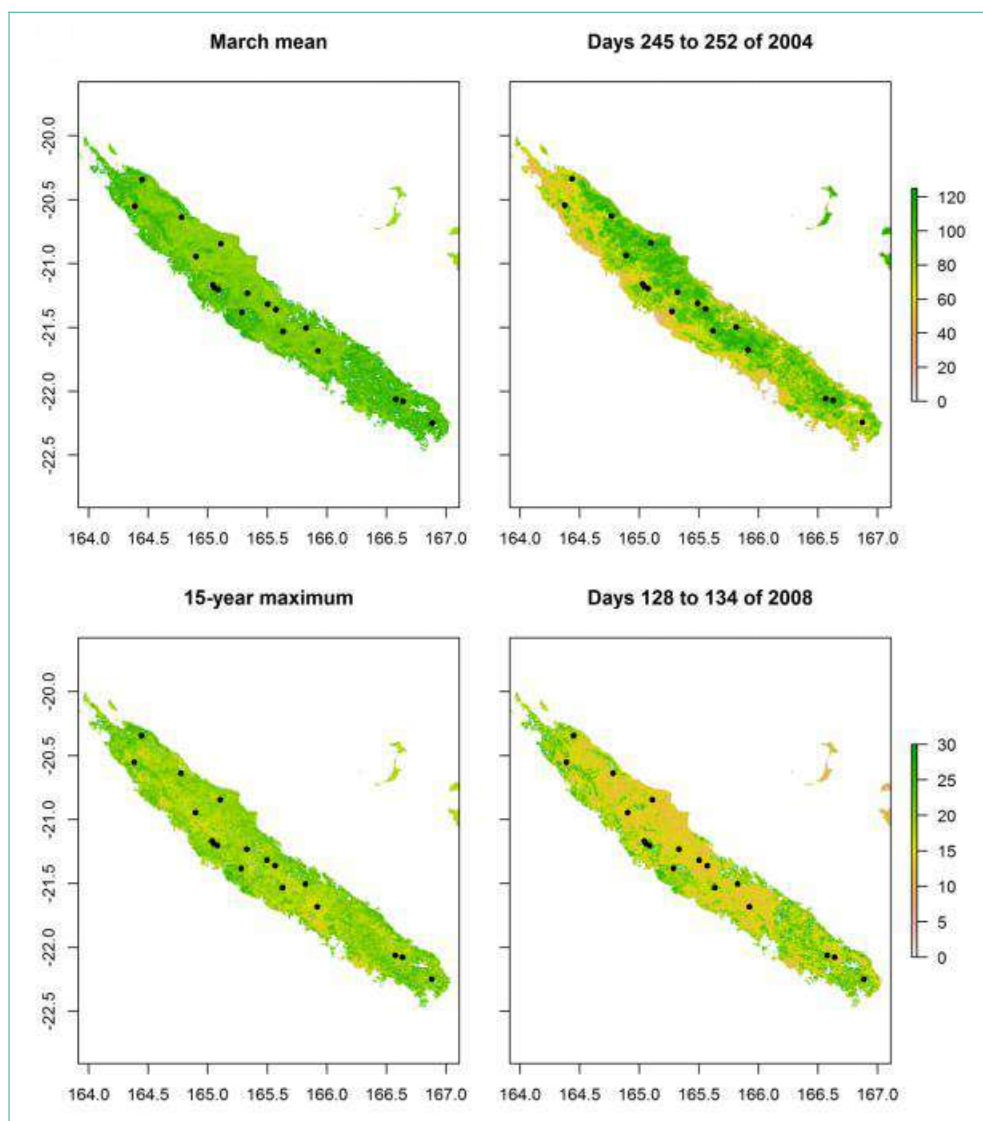


Figure 15 : Richesse spécifique des arbres ayant un DBH ≥ 10 cm (ligne supérieure) et 40 cm (ligne inférieure) prédite à partir de statistiques descriptives basiques dérivées d'une série temporelle de 15 ans d'images de NDVI (colonne de gauche) et d'une seule image sélectionnée par 'screening' (colonne de droite). Les points noirs localisent les 19 parcelles d'un hectare utilisées pour évaluer le pouvoir prédictif du NDVI

5.2. Modèles de distribution d'espèces « empilés » (S-SDM)

Les S-SDM sont des modèles qui offrent de nouvelles opportunités pour cartographier la richesse spécifique. Néanmoins, plusieurs études signalent que la précision de cette méthode tend à décliner le long du gradient altitudinal. Nous avons ainsi testé si cette diminution provenait d'un environnement de plus en plus imprédictible au fur et à mesure que l'altitude augmente du fait d'une variabilité accrue en micro-habitats, ou d'une relation statistique expliquée par la diminution de la surface disponible qui pourrait affecter le pool régional d'espèces et, par extension, la richesse spécifique locale ('indirect area effect').

Un modèle MAXENT a été construit pour chacune des 562 espèces d'arbres sélectionnées pour ce travail à partir de huit variables environnementales ayant une résolution spatiale de 100 m (altitude, distance à la route la plus proche, exposition aux alizés, indice topographique d'humidité, insolation potentielle, pente, secteur phyto-géographiques, type de substrat) et près de 10 000 occurrences d'espèces. Pour chaque espèce, une carte de probabilité de présence a été produite. Tous les modèles ont ensuite été « empilés » et les estimations de richesse spécifique résultantes ont été comparées à la richesse mesurée dans 11 parcelles d'1 ha indépendantes (n'ayant pas servi à la calibration des modèles). Pour appréhender le phénomène d'*'indirect area effect'*, le S-SDM a été ajusté en utilisant l'équation d'Arrhenius qui lie la richesse spécifique d'un habitat à la surface de celui-ci (Arrhenius 1921). La richesse spécifique estimée par le S-SDM non-ajusté variait de 95 à 251 espèces (moyenne de 153) tandis que les inventaires *in situ* indiquaient des valeurs plus basses, allant de 39 à 131 espèces (moyenne de 90). Cette surestimation de la richesse spécifique augmentait significativement avec l'altitude (Pouteau et al., 2015a). Cependant, nous avons constaté que le fait de prendre en compte l'*'indirect area effect'* permettait de décorrélérer de l'altitude l'écart entre prédictions et observations et d'estimer avec une précision satisfaisante la richesse spécifique observée (Figure 16 et 17).

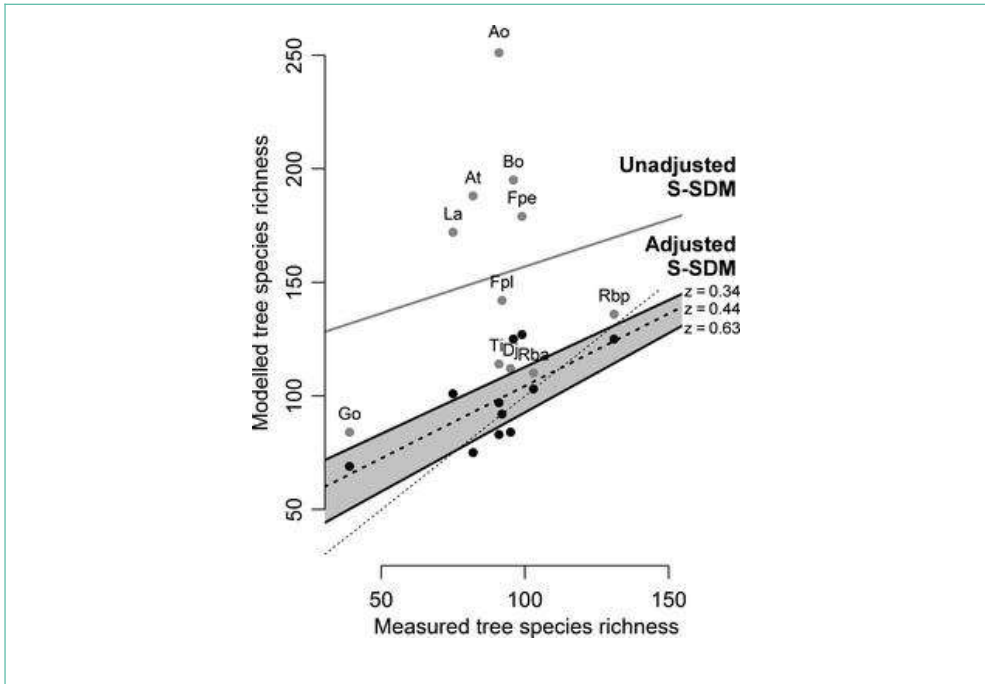


Figure 16 : Corrélation entre richesse spécifique empirique et prédite par un S-SDM non-ajusté (ligne grise continue) et tenant compte de l'indirect area effect' (ligne noire en pointillés). Les lignes noires continues représentent l'intervalle de valeur du paramètre z de l'équation d'Arrhenius pour lequel la corrélation est significative (Pouteau et al., 2015a)

La diminution de la précision des S-SDM avec l'altitude serait donc principalement expliquée par l'indirect area effect'. Bien qu'il reste des difficultés à aborder avant de fournir des prédictions solides de la richesse spécifique à partir de S-SDM, nos résultats représentent un pas en avant significatif vers des modèles de communauté plus performants.

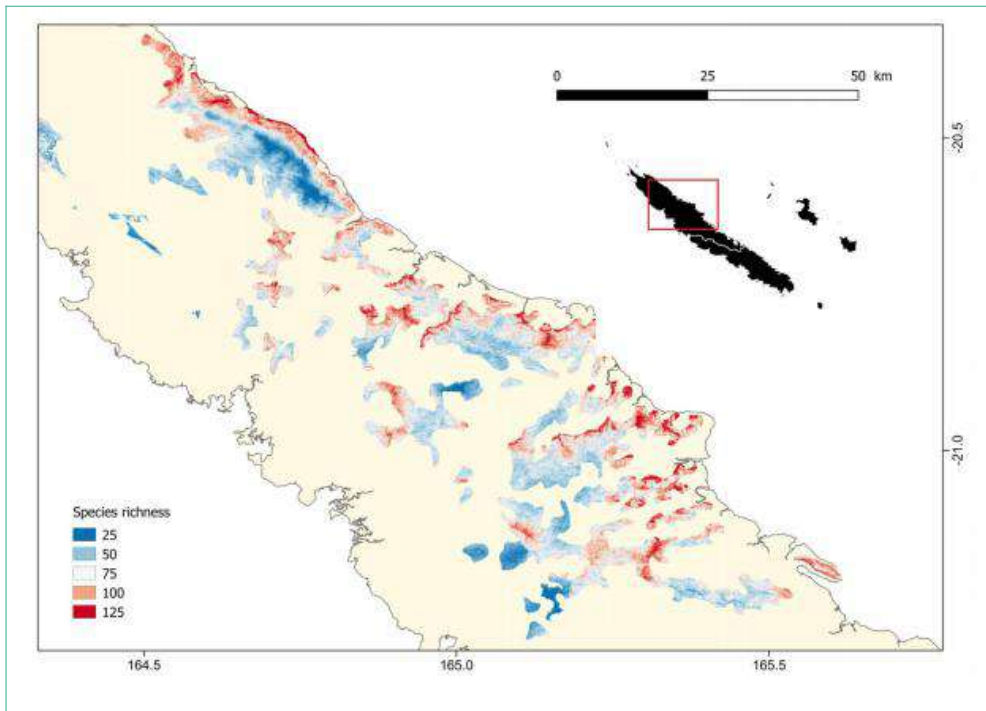


Figure 17 : Cartographie de la richesse spécifique des arbres dans les forêts de la province Nord de Nouvelle-Calédonie obtenue par un S-SDM dans lequel l'indirect area effect a été ajusté

5.3. Modélisation de la composition spécifique

La distribution de la richesse floristique à l'échelle du territoire comme la Grande-Terre dépend des facteurs qui régissent la distribution des espèces et leur assemblage en communautés. Comprendre les facteurs qui régissent la composition floristique de ces communautés est une question majeure en écologie, avec une résonance particulière dans les environnements où des concentrations exceptionnelles d'espèces endémiques subissent une perte exceptionnelle d'habitat. Dans cette étude, nous avons cherché à déterminer quels processus écologiques (filtrage environnemental, limite de dispersion et saturation des communautés) contrôlent l'assemblage des espèces dans les forêts de Nouvelle-Calédonie et voir si ces processus diffèrent de ceux

Chapitre 5

contrôlant les communautés des forêts continentales, bien plus étudiées.

Le filtrage environnemental a été abordé par un S-SDM combinant neuf algorithmes et générant des cartes binaires de présence/absence pour 678 espèces d'arbres pour lesquelles nous avons compilé près de 40 000 occurrences.

La limite de dispersion a été prise en compte en appliquant une restriction de 18 km de diamètre autour de chaque occurrence d'espèce (où la présence de l'espèce est donc avérée). La saturation de l'assemblage a été approchée en ordonnant les espèces par ordre décroissant de probabilité de présence jusqu'à obtenir le nombre estimé d'espèces sur chaque site. Les prédictions d'une gamme de S-SDM prenant en compte les différentes combinaisons de ces trois processus ont été comparées aux communautés observées dans 12 parcelles d'un hectare indépendantes.

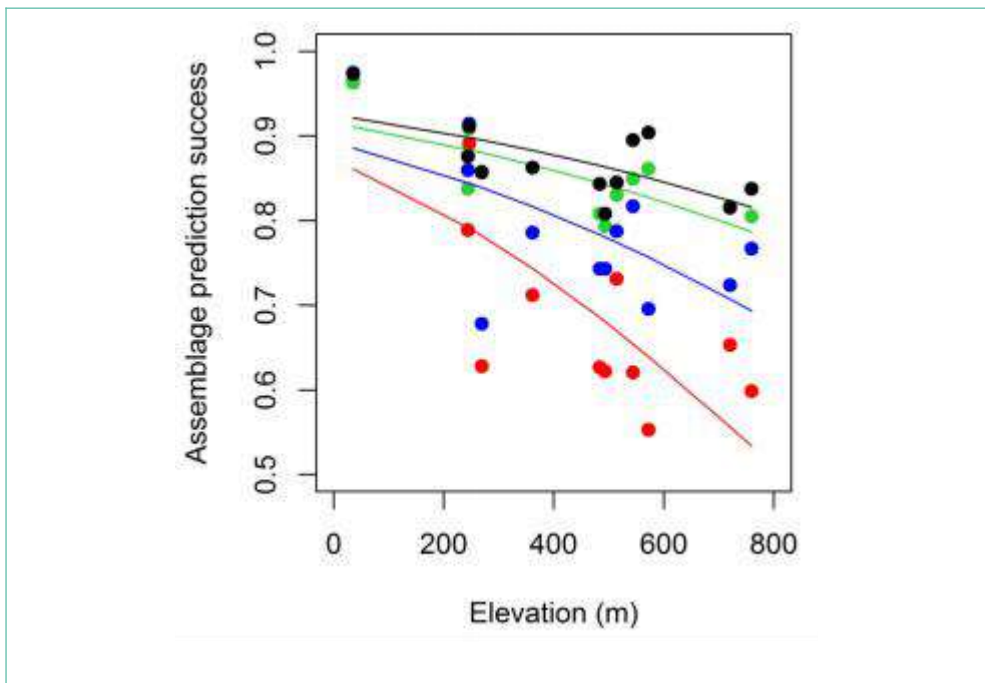


Figure 18 : Variation de la précision des assemblages d'espèces d'arbres prédits par quatre S-SDM le long du gradient altitudinal. Rouge : filtrage environnemental uniquement, bleu : filtrage environnemental et limite de dispersion, vert : filtrage environnemental et saturation des communautés, noir : les trois processus

Nos résultats ont montré que les trois processus (environnement, dispersion, saturation) sont des déterminants importants de la structuration des communautés d'arbres en Nouvelle-Calédonie. Les meilleures prédictions ont en effet été obtenues en combinant ces trois processus. Considérer la limite de dispersion augmente la spécificité de l'assemblage prédit (taux de vrais négatifs) tandis que la prise en compte de la saturation en augmente la sensibilité (taux de vrais positifs). Nous avons constaté que le pouvoir prédictif des S-SDM avait tendance à diminuer avec l'altitude, suggérant que des processus stochastiques (et donc imprévisibles) pourraient influencer la dynamique des communautés dans les habitats plus productifs de montagne (Figure 18).

En conclusion, nous avons trouvé de nombreux points communs entre les processus contrôlant les communautés insulaires de Nouvelle-Calédonie et celles, mieux connues, des continents (rôle important de la dispersion et de la saturation locale, rôle croissant des processus neutres avec la productivité) mais des recherches supplémentaires sur un plus grand nombre et une plus grande variété d'îles demeurent nécessaires pour nuancer ces résultats.

5.4. Modélisation de la richesse spécifique future

Les futurs patrons de biodiversité ont été largement explorés pour mettre en place des stratégies de conservation dans les points chauds de biodiversité continentaux (Midgley et al. 2003 ; Siqueira & Peterson 2003 ; Fitzpatrick et al. 2008 ; Ogawa-Onishi et al. 2010 ; Fortini et al. 2013). Cependant, peu de recherches se sont focalisées sur des points chauds insulaires, malgré le fait que des opportunités limitées de migration et certaines caractéristiques inhérentes aux espèces insulaires les rendent plus sensibles aux changements environnementaux rapides. Ici, nous avons examiné comment les changements climatiques futurs pourraient affecter la richesse spécifique dans les forêts de Nouvelle-Calédonie, le plus petit point chaud de biodiversité du monde (Pouteau & Birnbaum, 2016).

Un modèle de distribution d'espèce MAXENT a été calibré pour chacune des 469 espèces d'arbres ciblées et projeté selon neuf scénarios climatiques (trois modèles de circulation globale : CGCM2, CSIRO et HadCM3 et trois scénarios d'émissions : B1, A1B et A2). Nos résultats ont indiqué que 87 à 96% des espèces devraient voir leur aire de distribution décliner à l'horizon 2070, 52 à 84% des

espèces devraient perdre au moins la moitié de leur aire de distribution actuelle et 0 à 15% des espèces pourraient s'éteindre. De façon surprenante, ces prédictions n'excèdent pas significativement celles obtenues sur de plus grands points chauds de biodiversité. Les raisons sous-jacentes pourraient être un effet tampon des océans qui atténue l'augmentation de la température de l'air ou encore la topographie complexe de l'archipel qui génère des micro-refuges climatiques. Ces mêmes micro-refuges auraient permis la conservation d'une partie de la flore de Nouvelle-Calédonie au cours des événements du Quaternaire (Pintaud et al. 2001; Poncet et al. 2013; Pouteau et al. 2015b).

De plus, une diminution importante de la richesse spécifique locale a été prédite sur les substrats ultramafiques et parmi les habitats de moyenne altitude (Figure 19). Cette diminution de la richesse sur les substrats ultramafiques pourrait s'expliquer par le nombre important d'espèces spécialistes qui seront fatalement plus affectées par le changement des conditions climatiques que les espèces ubiquistes plus à même de trouver des zones refuges. La perte prédite à moyenne altitude peut s'expliquer par un décalage vers les sommets de l'optimum température-précipitation. Cependant le rôle de ces variables peut également avoir été surestimé par les modèles au dépend de processus non-déterministes souvent avancés pour expliquer la forte diversité des habitats de moyenne altitude (e.g. '*mid-domain effect*' sensu Colwell & Lees 2000). Ces résultats appellent à davantage de recherches pour définir les bonnes stratégies d'atténuation et d'adaptation dans les îles où la disparition d'espèces contribuerait de façon disproportionnée au déclin de la biodiversité globale.

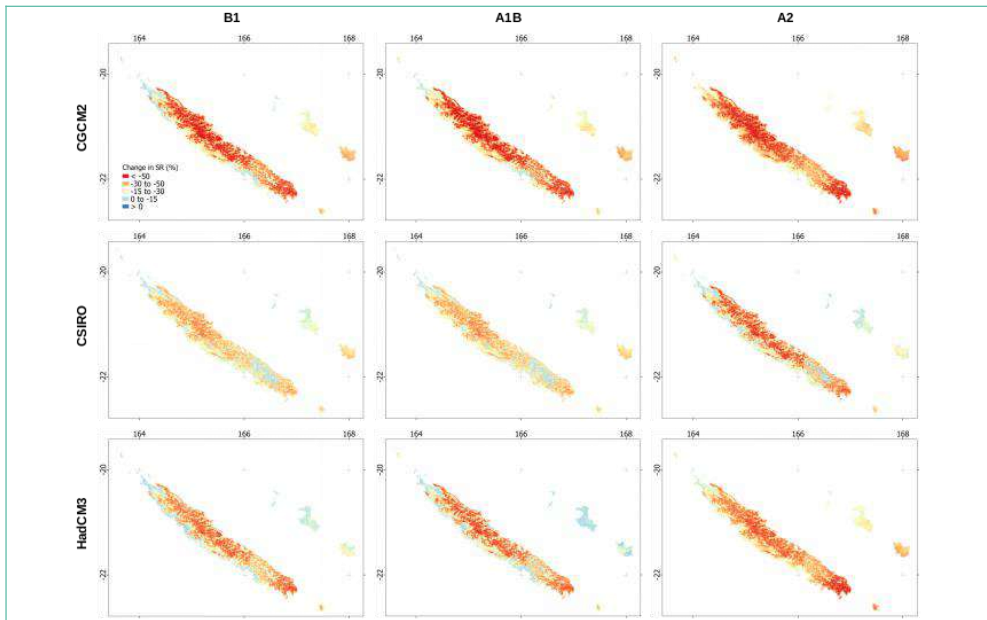


Figure 19 : Changement de richesse spécifique locale chez les arbres de Nouvelle-Calédonie prédit par trois modèles de circulation globale (lignes) et trois scénarios d'émissions (colonnes) à l'horizon 2070 (Pouteau & Birnbaum, P. (2016)

6. L'éco-informatique au service de la conservation

Les travaux en éco-informatique ont représenté une place significative dans les efforts mis en place depuis le début de la convention. En effet, un des objectifs majeurs de la convention COGEFOR concerne le développement d'outils informatiques d'aide à la décision en matière de gestion conservatoire des espaces naturels en province Nord. Ces outils ont vocation à s'appuyer sur les travaux scientifiques réalisés par l'équipe et ont pour objectif de les valoriser auprès des gestionnaires et du public.

6.1. Le package 'SSDM' : une interface de modélisation

Les acteurs de la conservation portent un intérêt grandissant à la cartographie de biodiversité basée sur les modèles de distribution d'espèces dits « empilés » (abrégiés S-SDM), une méthode qui consiste à combiner de multiples modèles de distribution d'espèces afin de produire un modèle unique de communautés (cf. plus haut). Toutefois, aucun logiciel spécifiquement conçu pour mettre à la disposition de ces acteurs les outils de base nécessaires à la construction de ces modèles complexes n'existait jusqu'alors.

Le package 'SSDM' que nous avons développé (Schmitt et al. 2017 ; disponible en open-source à l'adresse <https://cran.r-project.org/web/packages/SSDM/>) est une plateforme implémentée sous le logiciel R qui propose toute une gamme d'approches méthodologiques et de paramétrisation à chaque étape de la construction d'un S-SDM : sélection de pseudo-absences, calcul de l'importance des variables environnementales, contrôle de la précision des modèles, assemblage de différents algorithmes (GAM, GLM, MARS, MAXENT, CTA, GBM, ANN, Random Forest et SVM) et cartographie du niveau d'endémisme (voir Figure 20 pour un exemple de cartographie produite par le package). De par l'architecture orientée-objet du package, les utilisateurs peuvent modifier les méthodes préexistantes, en implémenter de nouvelles et les partager au sein d'un réseau d'utilisateurs. Le package inclut également une interface graphique afin qu'il puisse être utilisé par le plus grand nombre (Figure 21).

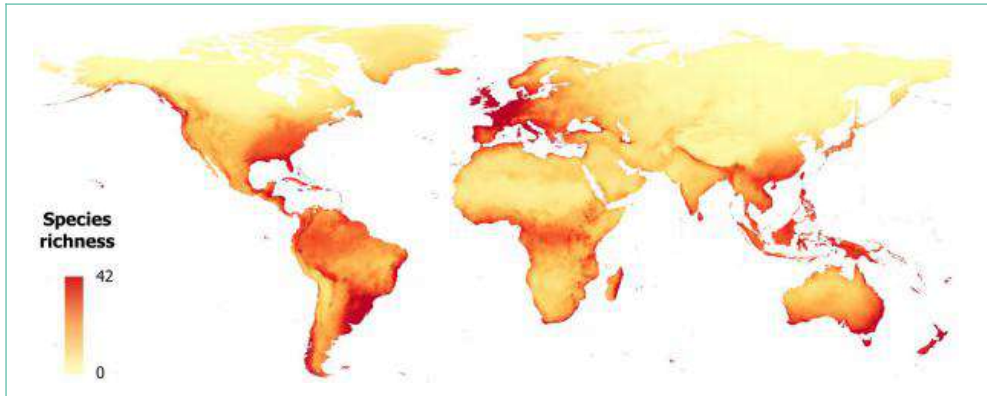


Figure 20 : Carte de la vulnérabilité aux 100 espèces les plus envahissantes mondiale générée par le package 'SSDM' (Schmitt et al., 2017)

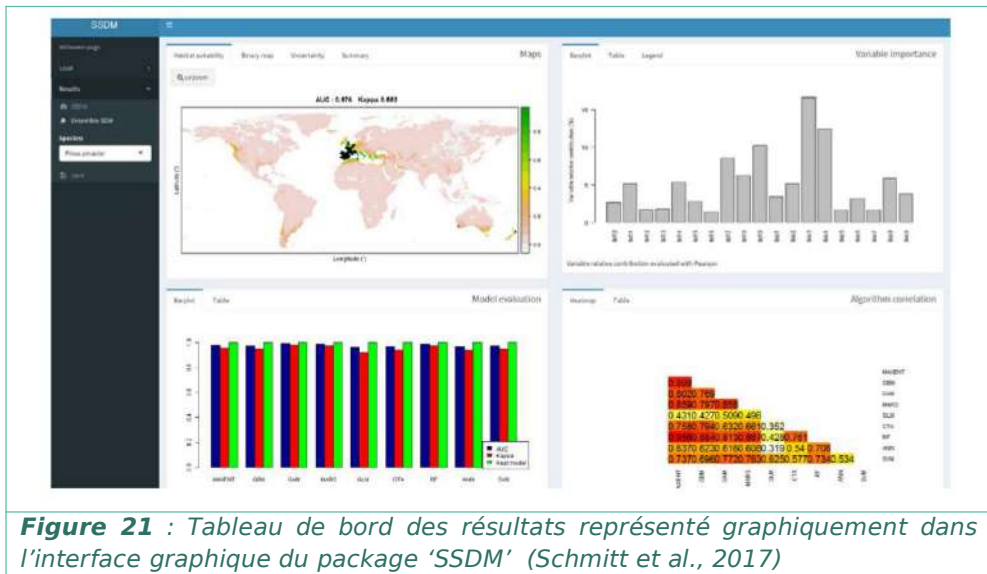


Figure 21 : Tableau de bord des résultats représenté graphiquement dans l'interface graphique du package 'SSDM' (Schmitt et al., 2017)

6.2. Le portail Niamoto (<https://niamoto.io/>)

Un des besoins principaux exprimés par les gestionnaires concerne la mise à disposition d'un système intégré d'aide à la décision pour la gestion des écosystèmes forestiers. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de rassembler les problématiques liées à la gestion et à la transformation des données autour d'un système d'information structuré et adapté. Ces questions se sont articulées autour d'un projet logiciel ambitieux, qui a été baptisé Niamoto, un mot qui signifie "forêt" en langue paicî. Pour la petite histoire, ce nom a d'abord été utilisé pour nommer un jeu de plateau éducatif autour des forêts développé par l'équipe et le service Communication de l'IAC en 2015, dans le cadre de la fête de la science à Touho (Figure 22). C'est donc en toute logique qu'il a été repris pour ce projet dont l'objectif est également de transmettre de la connaissance autour des forêts.



Le terme qui décrit le mieux Niamoto est celui de système d'information environnemental pour l'aide à la décision. Plus précisément, en s'appuyant sur les définitions :

- “Le système d'information est un ensemble organisé de ressources qui permet de collecter, stocker, traiter et distribuer de l'information. Il s'agit d'un système socio-technique”. Wikipedia.
- “Un système d'information est un réseau complexe de relations structurées où interviennent hommes, machines et procédures, qui a pour but d'engendrer des flux ordonnés d'informations pertinentes provenant de différentes sources et destinées à servir de base aux décisions.” Hugues Angot.

A travers ces deux définitions, nous avons pu mettre en évidence les objectifs principaux de Niamoto :

- Collecter de l'information autour des écosystèmes forestiers de la province Nord.
- Stocker ces informations.
- Traiter ces informations afin d'en extraire de la connaissance.
- Distribuer ces informations et la connaissance qui en est extraite.
- Valoriser l'ensemble à travers des outils d'aide à la décision.

Dans les parties suivantes, nous détaillerons dans les grandes lignes l'architecture générale de Niamoto, puis nous exposerons les travaux réalisés pour chacun des aspects présentés dans le paragraphe précédent, les résultats qui ont pu être observés, et les perspectives qui se dégagent pour la suite du projet.

6.3 Architecture générale de Niamoto.

Un des premiers choix fut celui de privilégier, les technologies libres et open-source. En plus de correspondre à plusieurs valeurs scientifiques (e.g. la diffusion de la connaissance au plus grand nombre), cette décision a été motivée par plusieurs aspects techniques et économiques :

- Possibilité d'accéder à des technologies de pointe de manière gratuite.
- Possibilité d'adapter ces technologies à nos besoins ce qui représente un gain de liberté dans le développement.
- Mise en avant de la dimension géographique au travers des puissants outils open-source SIG (e.g. QGIS, Geoserver, GDAL, OpenLayers, PostGIS).

L'ensemble du code source de Niamoto est libre, open-source et

hébergé sur Github. Cette ouverture nous offre de la visibilité et garantit notre transparence par rapport au travail réalisé. Par ailleurs, le développement de Niamoto a été l'occasion de contribuer à différentes bibliothèques open-source qui sont utilisées pour son développement, à travers la correction de bugs et l'ajout de nouvelles fonctionnalités qui nous ont été nécessaires. Parmi les bibliothèques auxquelles le développement de Niamoto a contribué, on peut citer :

- GeoPandas (<http://geopandas.org>)
- gsconfig (un portage pour Python 3 a été réalisé : <https://pypi.python.org/pypi/gconfig-py3>)
- Django (<https://www.djangoproject.com>)

Principales Technologies utilisées

- Langage de programmation principal : **Python 3**
- Base de données : **PostgreSQL/PostGIS, SQLAlchemy**
- Infrastructure : **AWS, Docker, Linux**
- Gestion de projet et qualité logicielle : **Git, Github, Readthedocs, Travis-CI, Codecov.**
- Automatisation, planification : **Celery, Airflow.**
- SIG : **QGIS, GDAL/OGR, OpenLayers, Geoserver, PostGIS.**
- Traitement de données : **Pandas, Numpy, R.**
- Web : NGinx, Gunicorn, **HTML/CSS, Javascript, Django, Django-rest-framework.**

Mécanismes principaux

Afin de disposer d'un noyau logiciel fiable et robuste, des efforts conséquents ont été investis pour réunir les fonctionnalités principales de Niamoto dans une bibliothèque serveur, **Niamoto-core** (Figure 23 & 24). Une attention toute particulière a été portée autour de la documentation et de la qualité logicielle de cette partie. Une documentation en ligne a été créée, une plateforme d'intégration avec une suite de test complète a été mise en place, ainsi qu'un outil de test de la couverture du code. A ce jour (octobre 2017), 94% du code de Niamoto-core est couvert par des tests unitaires et automatisés.

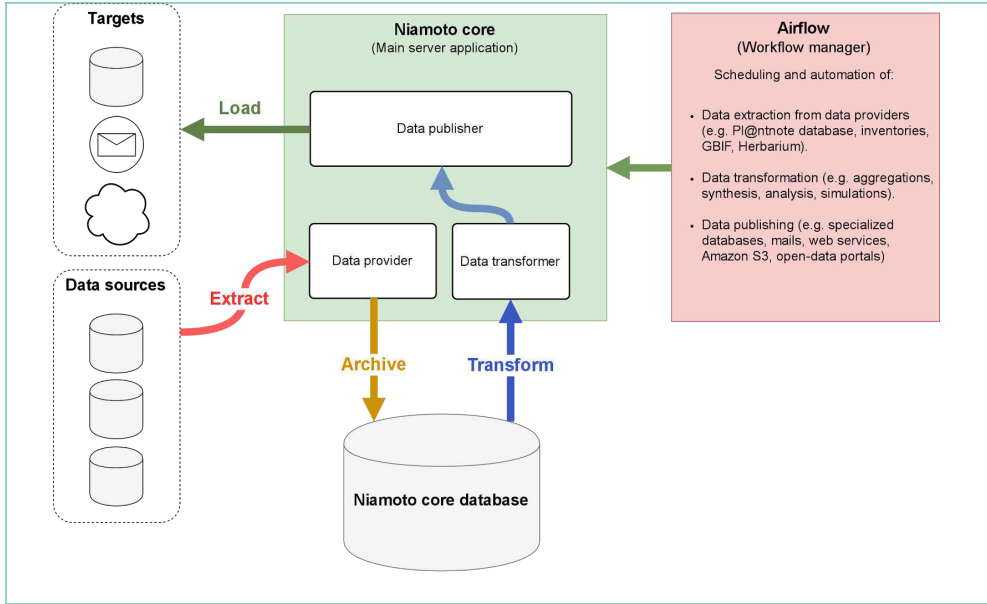


Figure 23 : Fonctionnement général du workflow de Niamoto-Core

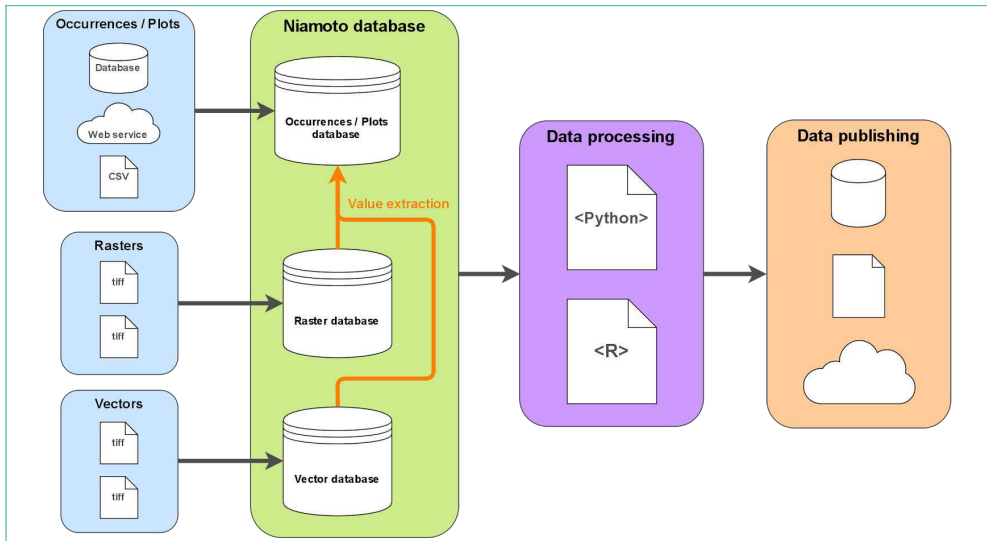


Figure 24 : Organisation de la gestion et de la transformation des données depuis l'intégration des sources de données jusqu'à la publication des données valorisées par les méthodes scientifiques

La partie visible de Niamoto, i.e. le portail web ou Niamoto-portal, a été développée de manière distincte, et s'appuie directement sur Niamoto-core.

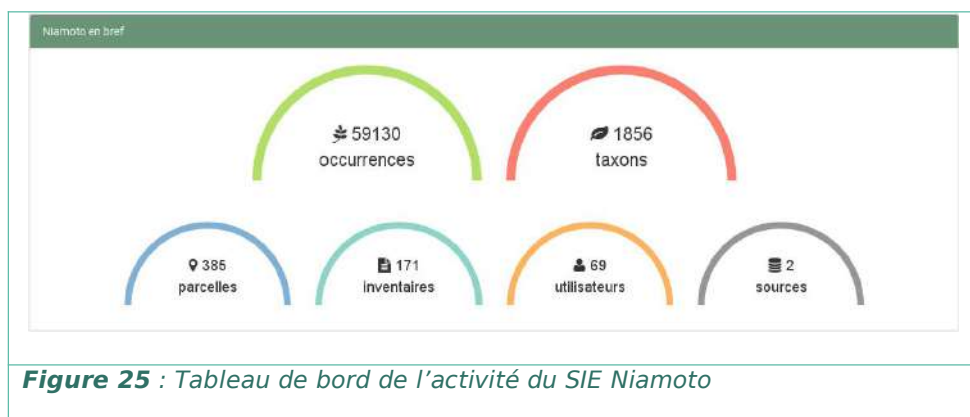
Concrètement, Niamoto est un système conçu selon une architecture client-serveur. Du côté serveur, il consolide et gère un entrepôt de données écologiques qui peuvent provenir de différentes sources. Il permet aussi de planifier et lancer des chaînes de traitement qui vont s'appuyer sur ces données pour en produire de nouvelles, à valeur ajoutée. Du côté client, Niamoto expose un portail web à travers lequel sont disponibles différents services. Il offre également des web-services REST.

Pour en savoir plus

- Le portail web : <https://niamoto.io/>
- Le code source de Niamoto-core : <https://github.com/dimitri-justeau/niamoto-core>
- La documentation en ligne de Niamoto-core : <http://niamoto.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- Les statistiques de couverture de code de Niamoto-core : <https://codecov.io/gh/dimitri-justeau/niamoto-core>
- Le code source de Niamoto-portal : <https://github.com/niamoto/niamoto-portal>

6.3. Une interface pour la gestion, la transformation et la restitution des données du réseau NC-PIPPN

Toutes les données qui sont collectées dans le cadre du réseau de parcelles forestières permanentes NC-PIPPN sont stockées dans Niamoto. Actuellement, le portail permet d'afficher une synthèse des données collectées sur le terrain, groupées par parcelle ou par taxon. Ces synthèses ont été mises sous la forme de tableaux de bord (Figure 25).



Le tableau de bord des taxons permet pour chaque rang taxonomique d'observer la répartition des sous-taxons ainsi que les distributions géographiques et environnementales (pluviométrie et altitude), qui sont définies et affichées sous la forme de diagrammes (Figure 26). Cet état de la répartition des taxons est mis à jour en temps réel depuis la base des occurrences.

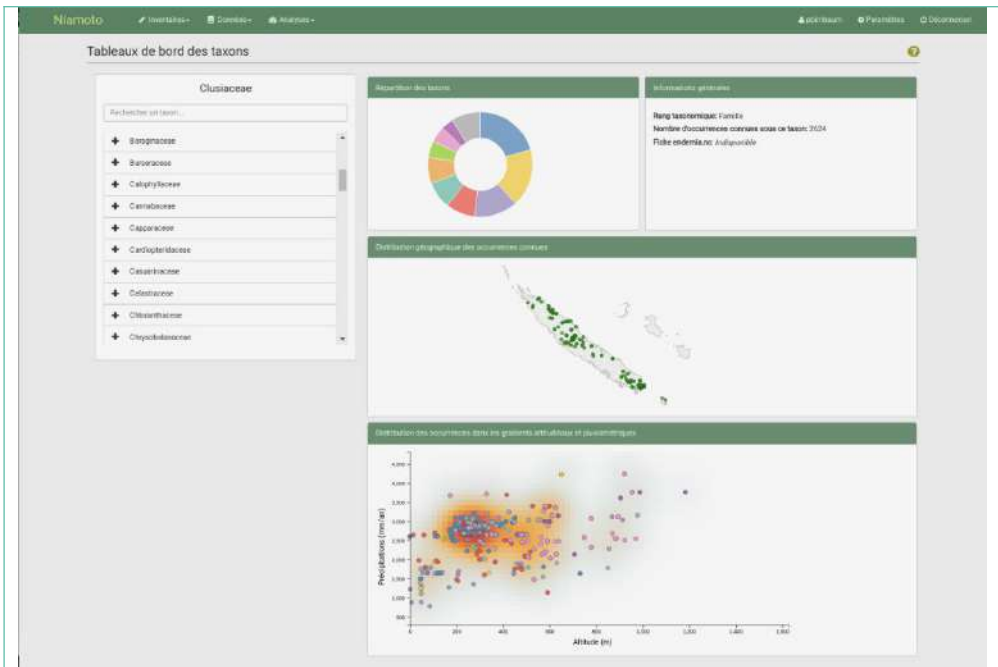


Figure 26 : Le tableau de bord des taxons du SIE Niamoto

Le tableau de bord des parcelles quant à lui permet pour chacune des parcelles de 1 ha de découvrir la répartition des familles et espèces dominantes et la distribution diamétrique, sous la forme de diagrammes (Figure 27). Cet état des communautés d'arbres est mis à jour avec l'ajout de chaque nouvelle parcelle de 1 ha.

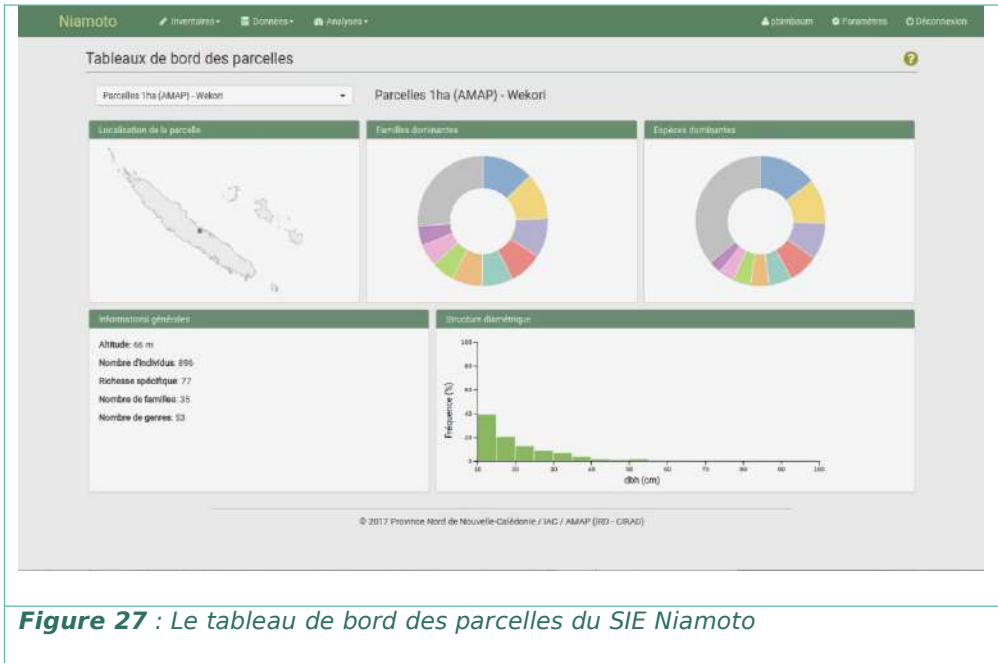


Figure 27 : Le tableau de bord des parcelles du SIE Niamoto

Il existe également un tableau de bord des habitats forestiers (Figure 28). La cartographie des forêts au 1:3000 est accessible depuis son interface avec notamment la possibilité d'ajouter des points de commentaires.

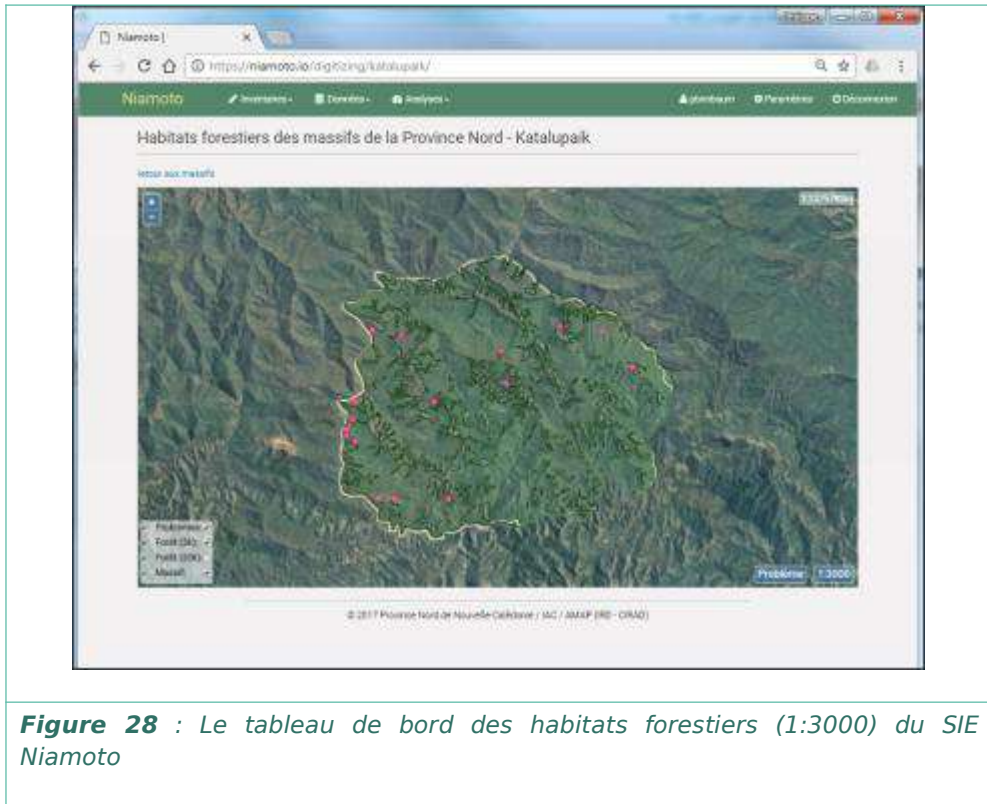
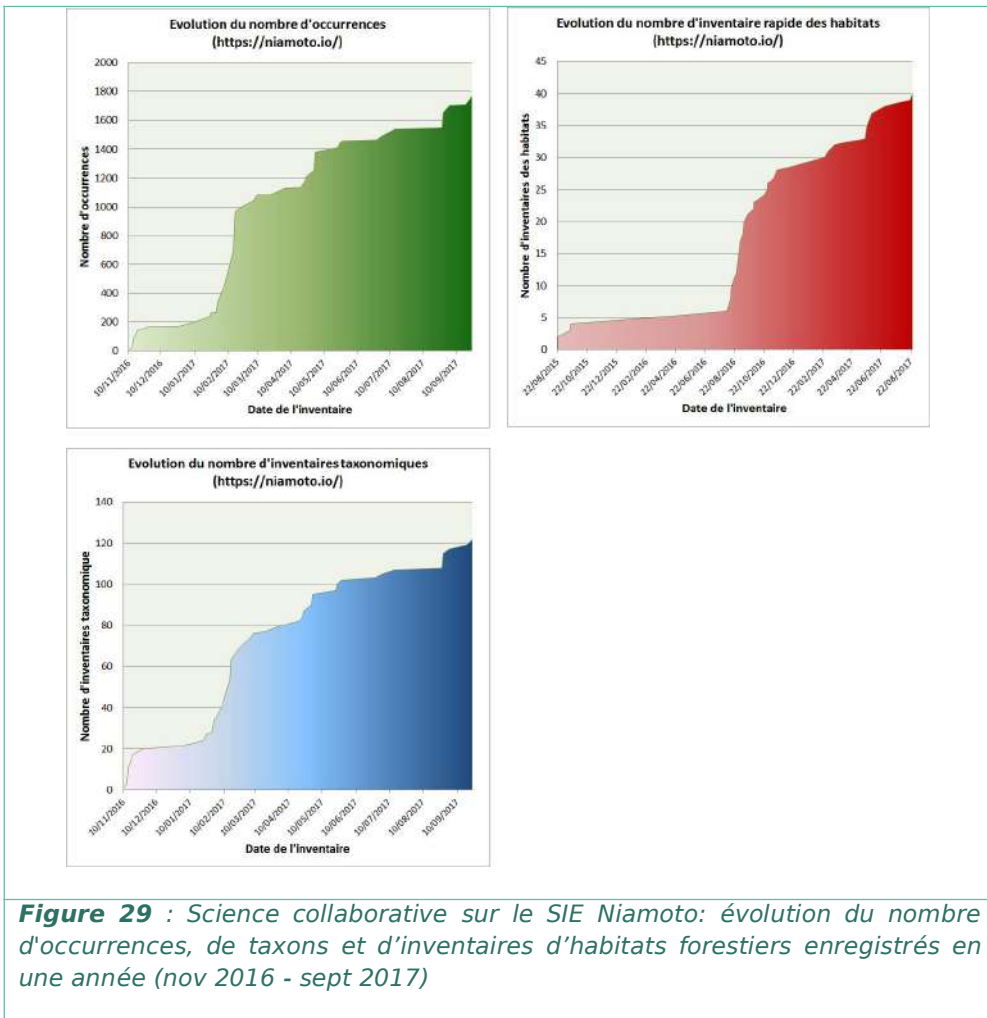


Figure 28 : Le tableau de bord des habitats forestiers (1:3000) du SIE Niamoto

6.4. La science collaborative

Le portail Niamoto est également devenu un site collaboratif qui permet à chacun de participer à l'amélioration des connaissances en ajoutant des observations, simples ou complexes, acquises sur le terrain. D'un côté les botanistes ou les amateurs confirmés peuvent saisir la liste des espèces observées dans le milieu. De l'autre, les moins érudits peuvent accéder à une description simplifiée de l'habitat forestier au travers d'un formulaire dont la robustesse des questions a été évaluée par un groupe d'amateurs. L'opérateur décrit la forêt selon des critères structuraux simples (e.g. fermeture de la canopée, présence de gros arbres, de petits arbres, traces de perturbations...) ou la présence de plantes/formes remarquables (e.g. niaoulis, banyans, fougères, pandanus, palmiers, Araucaria, tamanous ou autres plantes faciles à reconnaître) qui sont autant d'indicateurs non-ambigus qui décrivent une image grossière de la végétation sur une superficie étendue.

C'est ainsi qu'en moins d'un an (nov 2016 - sept 2017), les inventaires collectés sur Niamoto représentent 40 inventaires rapides des habitats, 131 inventaires taxonomiques, comptant pour 1774 occurrences de 510 espèces d'arbres (Figure 29).



6.4. Traitement de l'information et aide à la décision

Dans les prochains mois, le portail Niamoto va profondément évoluer pour intégrer les nombreux retours utilisateurs. Il va surtout s'enrichir de fonctionnalités dédiées à l'aide à la décision. Il prendra alors sa véritable orientation d'un système d'information environnemental dédié à la conservation des forêts. Cette partie analytique en construction permet déjà aux utilisateurs de récupérer les informations disponibles au sein d'une empreinte géographique prédéfinie telle que les délimitations administratives (provinces, communes) mais également sous la forme d'une limite libre définie par l'utilisateur (Figure 30).

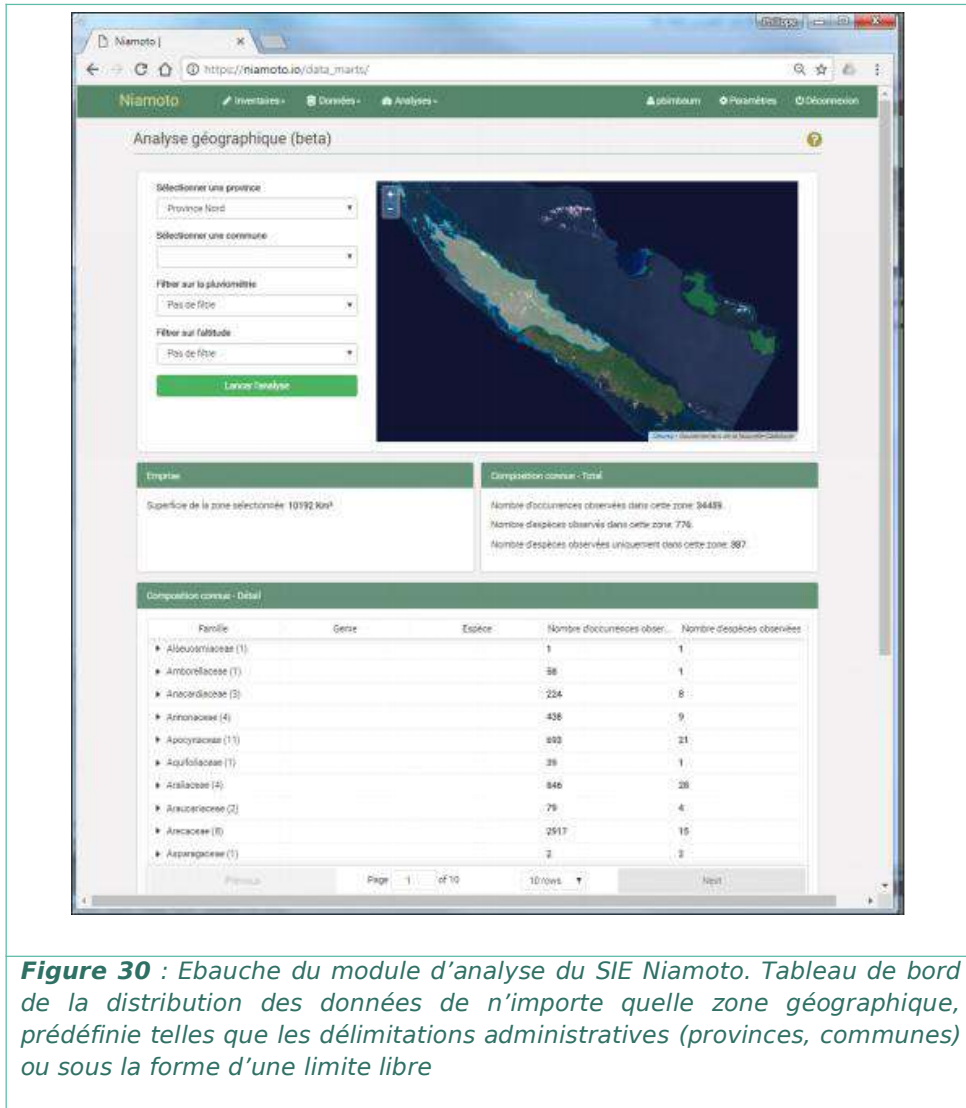


Figure 30 : Ebauche du module d'analyse du SIE Niamoto. Tableau de bord de la distribution des données de n'importe quelle zone géographique, prédéfinie telles que les délimitations administratives (provinces, communes) ou sous la forme d'une limite libre

Niamoto, une initiative calédonienne qui intéresse

Si Niamoto est né avec le projet COGEFOR et a d'abord été pensé pour les forêts de la province Nord de Nouvelle-Calédonie, il semblerait que la portée du projet puisse aller bien au-delà. En effet, de nombreux retours positifs nous ont été faits, et parmi ces retours certains viennent de loin : Australie et Guyane. Les problématiques liées à l'informatique et à l'aide à la décision dans la gestion des forêts semblent être partagées par différentes régions du monde, et le travail initié avec Niamoto pourrait ouvrir sur différentes collaborations internationales.

Perspectives pour la suite du projet

Si les bases sont posées, il reste encore beaucoup d'efforts à fournir pour que Niamoto soit à la hauteur des ambitions du projet. Parmi les prochains travaux envisagés, voici les principaux :

- Aller plus loin dans l'automatisation des procédures liées à la gestion, la mise à jour et le traitement des données
- Développer un module permettant de coupler le package SSDM avec Niamoto
- Enrichir la première version du module d'analyse géographique, en intégrant les données générées par SSDM et en mettant l'accent sur l'aide à la décision
- Mettre en place une application mobile pour la science collaborative avec Niamoto
- Développer une interface entre Niamoto et Endemia, notamment pour s'appuyer sur les statuts IUCN dans le module d'analyse géographique
- Enrichir l'entrepôt de données avec de nouvelles sources
- Continuer le développement et la documentation de Niamoto-core,

Pour en savoir plus

- Arrhenius, O. (1921) Species and area. *Journal of Ecology*, **9**, 95–99.
- 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, Nouvelle-Calédonie, ISBN 978-2-919253-05-0, 116p.
- Birnbaum P., Mangeas M., Maggia L., Ibanez T., Despinoy M., Marmey P., Hequet V., Gomez C., Bideau G., Chambrey C., Vandrot H., and Blanchard E. (2016) - Caractérisation des connectivités structurelle et fonctionnelle des paysages fragmentés sur sols ultramafiques. Projet CoRiFor. *Rapport final CNRT "Nickel et son environnement"*, 85p.
- Blanchard E. (2016a). *Diversité structurale des forêts denses humides de la province Nord de Nouvelle-Calédonie: de l'arbre au paysage*. Thèse de doctorat ès Science de l'Université de Montpellier, Spécialité « Écologie, Evolution, Ressources Génétique, Paléobiologie », 267 p.
- Blanchard E, Birnbaum Ph, Ibanez T, Boutreux T, Antin C, Ploton P, Vincent G, Pouteau R, Vandrot H, Hequet V, Barbier N, Droissart V, Sonké B, Texier N, Guy Kamdem N, Zebaze D, Libalah M, et Couteron P. (2016b). Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. *Trees*, **30**: 1953-1968
- Colwell, R.K., Lees, D.C. (2000) The mid-domain effect: geometric constraints on the geography of species richness. *Trends in Ecology and Evolution*, **15**:70–76.
- Fitzpatrick M.C., Gove A. D., Sanders N. J. & Dunn R. R. (2008). Climate change, plant migration, and range collapse in a global biodiversity hotspot: The Banksia (Proteaceae) of Western Australia. *Global Change Biology*, **14**: 1337–1352.
- Fortini L.B., Price J., Jacobi J., Vorsino A., Burgett J., Brinck, K. W., Amidon F., Miller S., Sam `Ohukani`ohi`a Gon III, Koob G. & Paxton E. (2013) A landscape-based assessment of climate change vulnerability for all native Hawaiian plants. *Technical Report 044, Hawai'i Cooperative Studies Unit*. University of Hawai'i, Hilo, 141p,
- He K. S., Bradley B. A., Cord A. F., Rocchini D., Tuanmu M.-N., Schmidtlein S., Turner W., Wegmann M. & Pettorelli N. (2015). Will remote sensing shape the next generation of species distribution models?. *Remote Sens Ecol Conserv*, **1**: 4–18.
- Ibanez T, Grytnes JA, et Birnbaum Ph. (2016a). Rarefaction and elevational richness pattern: a case study in a high tropical island (New Caledonia, SW Pacific). *Journal of Vegetation Science*, **27**: 441-451
- Ibanez T, Chave J, Barrabé L, Blanchard E, Boutreux T, Trueba S, Vandrot H, et Birnbaum Ph. (2016b). Community variation in wood density along a bioclimatic gradient on a hyper-diverse tropical island. *Journal of Vegetation Science*, **27**: 441-451
- Ibanez T., Blanchard E., Hequet V., Keppel G., Laidlaw M., Pouteau R., Vandrot H. & Birnbaum P. (2017). High endemism and stem density distinguish New Caledonian from other high-diversity rainforests in the Southwest Pacific, *Annals of Botany*, mcx107.
- Liang, J. et al. (2016) Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, 354, aaf8957.
- Magallón, S., Gómez-Acevedo, S., Sánchez-Reyes, L. L. and Hernández-Hernández, T. (2015), A metacalibrated time-tree documents the early rise of flowering plant phylogenetic diversity. *New Phytol*, **207**: 437–453.
- Midgley G.F., Hannah L., Millar D., Thuiller W. & Booth A. (2003) Developing regional

- and species-level assessments of climate change impacts on biodiversity in the Cape Floristic Region. *Biological Conservation*, **112**: 87–97.
- Ogawa-Onishi Y., Berry P. M. & Tanaka N (2010) Assessing the potential impacts of climate change and their conservation implications in Japan: A case study of conifers. *Biological Conservation*, **143**: 1728–1736.
- Pintaud J.-C., Jaffré T. & Puig, H. (2001) Chorology of New Caledonian palms and possible evidence of Pleistocene rain forest refugia. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences III*, **324**, 453–463.
- Poncet, V., Munoz F., Munzinger J., Pillon Y., Gomez C., Couderc M., Tranchat-Dubreuil C., Hamon S. & de Kochko A. (2013) Phylogeography and niche modelling of the relict plant *Amborella trichopoda* (Amborellaceae) reveal multiple Pleistocene refugia in New Caledonia. *Molecular Ecology*, **22**, 6163–6178.
- 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** : 1329–1338.
- Pouteau R., Trueba S., Feild T. S. & Isnard S. (2015), New Caledonia: a Pleistocene refugium for rain forest lineages of relict angiosperms. *Journal of Biogeography*, **42**, 2062–2077.
- Pouteau, R., Birnbaum, P. (2016) Island biodiversity hotspots are getting hotter: vulnerability of tree species to climate change in New Caledonia. *Biological Conservation*, **201**, 111–119.
- Schmitt S., Pouteau R., Justeau D., de Boissieu F. and 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*.
- Siqueira M. F. & Peterson A. T. (2003) Consequences of global change for geographic distributions of cerrado tree species. *Biota Neotropica*, **3**, 1–14.
- Webb, E.L., Seamon, J.O. & Fa'aumu, S. (2011) Frequent, low-amplitude disturbances drive high tree turnover rates on a remote, cyclone-prone Polynesian island. *Journal of Biogeography*, **38**, 1240–1252.
- Zimmerman, J.K., Everham III, E.M., Waide, R.B., Lodge, D.J., Taylor, C.M. & Brokaw, N.V.L. (1994) Responses of Tree Species to Hurricane Winds in Subtropical Wet Forest in Puerto Rico: Implications for Tropical Tree Life Histories. *Journal of Ecology*, **82**, 911–922.

