



Parc national
de la Guadeloupe

En collaboration avec :



Forêt dense humide de Guadeloupe

Rapport d'Analyse

Placettes forestières permanentes

Suivi dendrométrique

Bilan 2010 - 2020

Table des matières

1	Introduction	3
2	Matériels et Méthodes	7
2.1	Présentation de la forêt de Guadeloupe	7
2.1.1	La notion internationale de Forêt	7
2.1.2	La flore des Antilles	7
2.1.3	La flore en Cœur de Parc	8
2.1.4	Contexte Géo-Pédo-Climatique	8
2.1.5	Les espaces boisés de Guadeloupe et du Parc national	13
2.2	Explication du dispositif de suivi de croissance FDH	14
2.2.1	Objectifs généraux	14
2.2.2	Fonctionnement du dispositif	15
2.2.3	Spatialisation	21
2.3	Démarche analytique	31
2.3.1	Analyse descriptive	32
2.3.2	Analyse exploratoire	35
2.3.3	Tester et Modéliser	37
3	Résultats	39
3.1	Descriptions des placettes et de la population étudiée	39
3.1.1	Visualisation topographique des placettes	39
3.1.2	Description du peuplement	44
3.1.3	Diversité	49
3.1.4	Structure du peuplement	52
3.2	Communauté en présence	58
3.2.1	Analyses factorielles choisies pour l'étude des communautés	58
3.2.2	Résultats de l'AFC	60
3.2.3	Résultats de l'AFDM	66
3.3	Dynamique	76
3.3.1	Mortalité et recrutement	76
3.3.2	Évolution des accroissements sur 3 campagnes	78
3.3.3	Comparaison entre les accroissements et l'évolution de la surface terrière	82

4 Discussion	91
Annexes	99
Bibliographie	106
Table des figures	109
Liste des tableaux	111

Chapitre 1

Introduction

Le dispositif des placettes permanentes de Guadeloupe est encore récent en terme d'accumulation de données (10 ans). En comparaison, des stations expérimentales en écologie forestière tropicale telles que **Paracou** en Guyane ou **BCI** (Barro Colorado Island) au Panama, accumulent près de 40 ans de données.

Sans compter la taille et le nombre de placettes étudiées sur ces sites de renommée mondiale, ces stations sont également le lieu d'innombrables projets de recherches qui au fil des ans, accumulent et structurent la connaissance disponible sur la biologie générale (génétique, biologie des organismes, biochimie, physiologie, botanique, zoologie, écologie, ethologie) et la physico-chimie environnementale (géologie, pédologie, hydrologie, climatologie).

Il s'agit ici d'un immense puzzle de la compréhension de la physique et du vivant au sein des systèmes forestiers. Bien qu'il ne sera jamais possible de le terminer, les pièces de ce puzzle peuvent désormais, grâce aux outils informatiques, plus facilement se regrouper. Comme toute science, des champs nouveaux se créent au fur et à mesure que les techniques progressent (notamment la génétique). Tous ces champs d'études doivent nous permettre de retranscrire le plus fidèlement possible les processus naturels complexes sous-jacents, qui conduisent à la réalité observée. L'émergence d'ordinateurs de plus en plus puissants a permis de franchir un cap dans la recherche, en permettant la mise en relation des observations (le monde empirique) et des théories (mathématiques principalement) afin d'aboutir à l'essor actuel de la modélisation des systèmes écologiques.

Actuellement, l'enjeu prédominant de la recherche en écologie est de prédire les évolutions du monde naturel. Ce monde qui, répétons-le encore, nous nourrit, nous protège par sa résilience, nous divertit et nous surprend par sa beauté et sa complexité. La prise de conscience des impacts humains sur les milieux naturels ces 30 dernières années a été déterminante et un moteur majeur en ouvrant de nouvelles thématiques d'études : pollutions, stockage carbone, changements globaux, érosion de la biodiversité, rôles écosystémiques,

etc... Malgré cette prise de conscience, nous continuons d'altérer ce monde de plus en plus vite, du fait du poids de l'inertie des consciences. D'où cette nécessité de protéger de manière foncière ces espaces, en développant le réseau des aires protégées tels que les Parcs nationaux, mais aussi de veiller à l'évolution de ces espaces.

Les aires protégées ont donc deux rôles essentiels. *De facto*, elles doivent maintenir la biodiversité survivante aux actions de l'homme. Cette biodiversité, quelles que soient son échelle et sa nature, est mal connue car quasi infinie selon le référentiel choisi (macro, micro, nano-scopique), mais il n'en demeure pas moins évident qu'elle est le carburant de la résilience des écosystèmes, du fait des millions d'années d'évolution qui ont permis de répondre à chaque déséquilibre majeur. Deuxièmement, les aires ont un rôle de sentinelle et doivent par conséquent endosser le rôle d'indicateur de santé de nos milieux naturels. Elles doivent être la référence (le témoin en statistique) de toute mesure de changement (positifs ou négatifs).

Ce rôle implique donc d'acquérir de la connaissance à de nombreux niveaux du fait de la complexité de la structuration et du fonctionnement des écosystèmes. En d'autres termes, ces aires doivent servir de support de recherche pour, par la suite, informer les pouvoirs publics dans leur prise de décision en suivant l'adage "*Mieux connaître pour mieux protéger*", et ainsi parvenir à leur objectif premier, **la préservation du patrimoine naturel**.

Le Parc national de la Guadeloupe (PNG) a initié en 2007 le projet de suivi forestier par placettes forestières permanentes, à vocation recherche, au sein de sa forêt dense humide primaire. Forêt exceptionnelle ne serait-ce que par ce critère qui en devient marginal de nos jours, spécifiquement en milieu insulaire tropical. L'année 2009 marque le début de l'installation du dispositif qui aura demandé d'importants investissements humains et financiers.

Depuis 2018, les données de ce dispositif ont été intégrées dans la base de GUYAFOR en Guyane, qui intègre notamment les données de la station de Paracou. Il faudra attendre encore de nombreuses années de données et d'études préliminaires avant de voir le corps scientifique intégrer les données guadeloupéennes dans leurs modèles de recherches. Il n'en demeure pas moins, que ce type de dispositif est très peu développé sur les milieux forestiers insulaires tropicaux et qui plus est montagneux. La recherche fondamentale est donc une priorité. Il est évident que la communauté scientifique voudra intégrer ces nouvelles pièces de puzzle dans leurs modèles prédictifs dans les décennies à venir. Néanmoins, l'année 2020 symbolise les dix ans du suivi sur ce dispositif, signifiant que toutes les placettes ont été inventoriées au minimum par trois campagnes de mesures. Ce rapport a pour objectif de synthétiser les premiers résultats qu'apporte ce suivi et de discuter des perspectives d'avenir.

Bien qu'il soit difficile de connaître l'horizon lointain de ce dispositif, la présence et parfois

la collaboration sur le territoire guadeloupéen des organismes tels que :

- **Le Parc national de la Guadeloupe** (PNG),
- **l'Office national des forêts** (ONF),
- **l'Université des Antilles** (UA),
- **l'Unité Mixte de Recherche sur L'Ecologie des Forêts Guyanaises** (EcoFog),
- **l'Institut Physique du Globe de Paris** (IPGP),
- **l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe** (OVSG)
- **l'Observatoire de l'Eau et de l'Erosion aux Antilles** (OBSERA),
- **Le Centre Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement** (CIRAD)
- **l'Institut National de Recherche pour l'Agronomie, l'alimentation et l'Environnement** (INRAE)

laissent à penser qu'un pôle de recherche innovant peut s'articuler en Guadeloupe sur la thématique forestière (Biologie et Physico-Chimique). Ce dispositif, peut se révéler être un support de recherche commun, animé par ces différents organismes, pour que chacun apporte sa pièce à l'édifice de la compréhension de la dynamique du vivant et à sa préservation.

Les travaux actuels de l'OBSERA sur le site de Bras-David sont d'ailleurs très prometteurs et laissent déjà présager ce que peut apporter un tel dispositif et les compétences variées des différents organismes de recherches présents dans l'archipel. En imaginant les collaborations scientifiques qui pourraient voir le jour avec d'autres pays voisins de la Caraïbe, la Guadeloupe, avec son patrimoine naturel riche et singulier, a le potentiel de porter le suivi et la recherche en écologie forestière au sein des Petites Antilles.

Chapitre 2

Matériels et Méthodes

2.1 Présentation de la forêt de Guadeloupe

2.1.1 La notion internationale de Forêt

De quoi parle-t-on lorsque l'on utilise le terme "forêt" ? Afin de le mesurer, il est important de citer la définition qu'en donne la FAO¹. Celle-ci correspond à une surface minimum d'un demi hectare, dont la couverture arborée est supérieure ou égale à 10 % de cette surface (5).

Mais qu'est ce qu'un arbre puisqu'il définit la couverture arborée, et par conséquent une forêt ?

L'arbre est défini comme "une plante pérenne avec une seule tige (ou plusieurs si elle est recépée) atteignant au moins cinq mètres à maturité." (5)

On peut se permettre de commenter rapidement cette définition conventionnelle, sur laquelle se repose l'utilisation toujours plus grandissante de chiffres dans les rapports internationaux. Elle semble tout même très largement surestimer l'image qu'un humain lambda peut se représenter d'une forêt. A l'heure des chiffres, compensation, bilan carbone... Une telle définition peut très clairement embellir une situation en réalité mal engagée. Servant d'élément de contexte, les différentes descriptions des espaces forestiers à venir, devront donc être à relativiser.

2.1.2 La flore des Antilles

En 2007, *Alain ROUSTEAU* a rassemblé et synthétisé les connaissances existantes sur la botanique forestière afin d'en rédiger un recueil bibliographique spécifique au fonctionnement de la forêt dense humide au sein du Parc national de la Guadeloupe. La flore de l'archipel a été étudiée à de nombreuses reprises et ce depuis de très nombreuses décennies avec des

1. Food and Agriculture Organization

données datant du XVII^e siècle, notamment lors du voyage dans les Amériques de Charles PLUMIER², botaniste attiré, à l'époque, du roi Louis XIV.

S'en suivit un nombre important de naturalistes qui multiplièrent les inventaires. C'est le cas de : SWARTZ, JACQUIN, GRISEBACH, DUSS, URBAN. Plus contemporains, les travaux menés par HOWARD, puis finalement par FOURNET (2002), ont permis d'aboutir à la flore des Petites Antilles, référence actuelle qui, selon ROUSTEAU, est l'une des flores tropicales les mieux connues. Comme le précise ROUSTEAU dans son recueil, malgré la très bonne connaissance botanique, il n'en demeure pas moins que certains taxons méritent encore des recherches de systématique afin de compléter les quelques lacunes actuelles notamment le genre *Myrsine* et les familles des *Lauraceae*, *Myrtaceae*, *Melastomataceae* et *Bromeliaceae*. Malgré tout, le caractère remarquablement avancé de la connaissance de la flore guadeloupéenne incite à penser que de nouvelles recherches scientifiques peuvent s'appliquer à l'avenir tant dans la biologie, la génétique, la biogéographie et également dans la dynamique des communautés, d'où le travail actuel en guise d'introduction..

2.1.3 La flore en Cœur de Parc

Suite à tous ces travaux, notamment ceux de Jacques FOURNET et d'HOWARD, Alain ROUSTEAU (15) a pu quantifier que le cœur du Parc national de la Guadeloupe héberge :

- **811 Angiospermes** indigènes
- **274 Ptéridophytes** indigènes

En comparaison, HOWARD avait estimé à au moins 2 150, le nombre d'espèces de phanérogames et à 323, le nombre de ptéridophytes à l'échelle des Petites Antilles (13). La Basse-Terre (848 km²) représente 19 % de la surface terrestre des Petites Antilles (4 454,5 km²). Rapporté à la surface prise en compte, on ne peut qu'admirer la richesse potentielle qu'offre la forêt de Guadeloupe et plus particulièrement le Cœur du Parc national qui rappelons-le, ne s'étend que sur 187,3 km². On peut donc estimer que le Parc national de la Guadeloupe abrite 37 % des plantes à fleurs des petites Antilles sur seulement 4,2 % de ce même territoire³!

2.1.4 Contexte Géo-Pédo-Climatique

La richesse floristique de Guadeloupe est exceptionnelle. Si l'on se réfère au temps géologique, la Basse-Terre est extrêmement jeune, de 4 millions d'années dans le nord à 500 000 ans au sud au niveau du massif de la Soufrière. En comparaison, certaines aires continentales stables dites cratoniques dépassent les 2 milliards d'années (Guyane, Bretagne...).

2. Nova Plantarum Americanarum, Plumier (1703)

3. Les gymnospermes étant faiblement représentés dans les Petites-Antilles

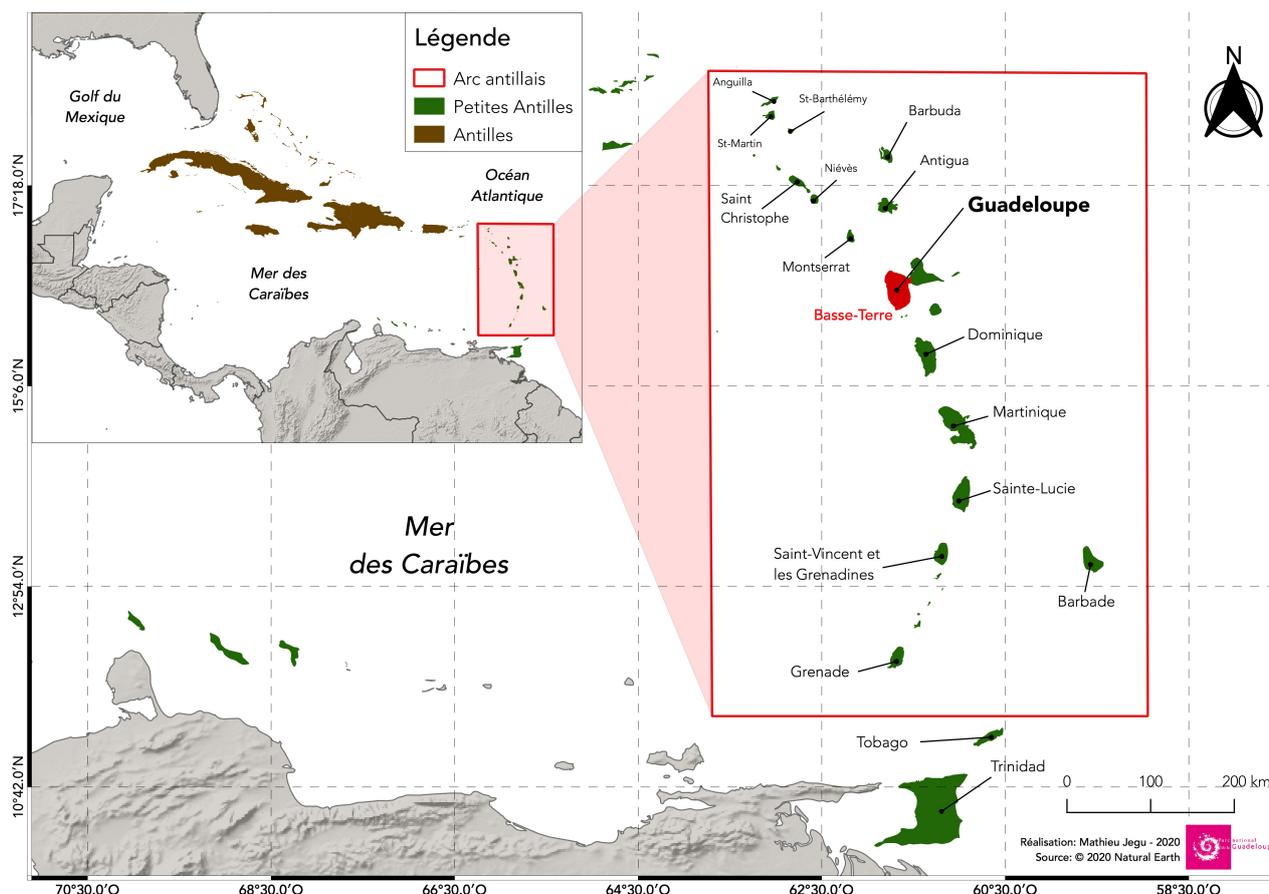


FIGURE 2.1: Localisation de l’archipel Guadeloupéen aux Antilles

Si l’on s’arrête à la notion stricte de potentiel évolutif, la Guadeloupe devrait donc souffrir d’un sacré train de retard. Cependant, comme certaines de ses îles voisines (Dominique, Martinique...), elle n’en demeure pas moins caractérisée par une végétation luxuriante. Pour rappel, la Guadeloupe, c’est un peu plus de 1 630 km², tandis que la France métropolitaine possède une superficie de 543 965 km². La Guadeloupe représente donc 0,3 % de la métropole, soit l’équivalent du département de l’Essonne. L’archipel possède pourtant 3 fois plus d’espèces d’arbres que la France métropolitaine (plus de 300 arbres contre une centaine en métropole) !

Cette richesse à l’affleurement est la conséquence de trois éléments majeurs caractérisant la Guadeloupe. Son climat (donc sa localisation géographique), sa géomorphologie et sa pédologie. Il est clair qu’il manque énormément d’informations sur ces trois éléments à l’heure actuelle. En effet, l’orographie a engendré un nombre important de micro-climats qui ne semblent pas avoir été caractérisés dans le détail. Le rapport Météo-France de 2013 (11) permet de jeter une première ébauche. Cette étude s’est intéressée à caractériser les conditions météorologiques à proximité des placettes en utilisant les données disponibles de l’époque : les cumuls de précipitations, la température et l’humidité relative.

Ces données proviennent d'un réseau de 35 stations, réparties dans 6 zones climatologiques en Basse-Terre. Les placettes forestières du réseau se localisent dans 4 d'entre elles : ZC 3B, ZC6, ZC4, ZC 5a (voir figure 2.2). Ces zones ont été déterminées par le signal pluviométrique moyen, et elles ne prennent donc pas en compte les autres critères tels que la température, le vent et l'humidité relative, critères indissociables d'un climat local (11).

Concernant la pluviométrie, le rapport affirme clairement la difficulté de caractériser une pluviométrie type par site, puisque chaque zone climatologique semble posséder des valeurs extrêmement disparates, et particulièrement la ZC 3b (Choisy), la ZC4 (Quiock, Bras-David, Jules) et ZC 5a (La Digue, Moscou, Carbet, Bains-Jaunes). La ZC6 (Pointe-Noire) semble être relativement uniforme avec un climat à tendance sec (11). Étant donné ces suppositions et la localisation des stations par rapport aux placettes (bien souvent très éloignées de ces dernières), il semble peu vraisemblable que les caractéristiques pluviométriques des zones climatiques soient extrapolables aux localités des placettes. D'autant plus que la majorité des placettes est localisée en bordure de zones climatiques.

Connaissant la pluviométrie intense en Guadeloupe, il est fort à penser que les températures (donc l'altitude) ainsi que l'humidité relative sont davantage les facteurs limitants. En effet, malgré des différences notables des précipitations entre placettes (4 m/an à Quiock contre 9 m/an à Bains-Jaunes), la disponibilité en eau reste très importante et n'est sans doute pas un facteur limitant important. En revanche, concernant les placettes plus au Nord (Pointe-Noire et Choisy), il serait intéressant d'approfondir les recherches.

Il n'en demeure pas moins que l'ensoleillement global peut également être un facteur non négligeable lissé sur l'année, puisque l'ombrage apporté par les couvertures nuageuses sur la côte au vent (donc indirectement la pluviométrie) peut être potentiellement plus intense et significatif vis-à-vis de la photosynthèse et donc de la vigueur des arbres.

Enfin, la figure 2.3 ci-dessous expose sans rentrer dans le détail, les différentes formations géologiques en Basse-Terre. Cette représentation est en réalité simplifiée, puisque chaque unité est en fait constituée de sous-unités plus complexes. Les cartographies en trois dimensions de la partie 2.2.3 permettront de mieux visualiser ces unités et leurs localisations par rapport aux placettes.

Zone Climatologique

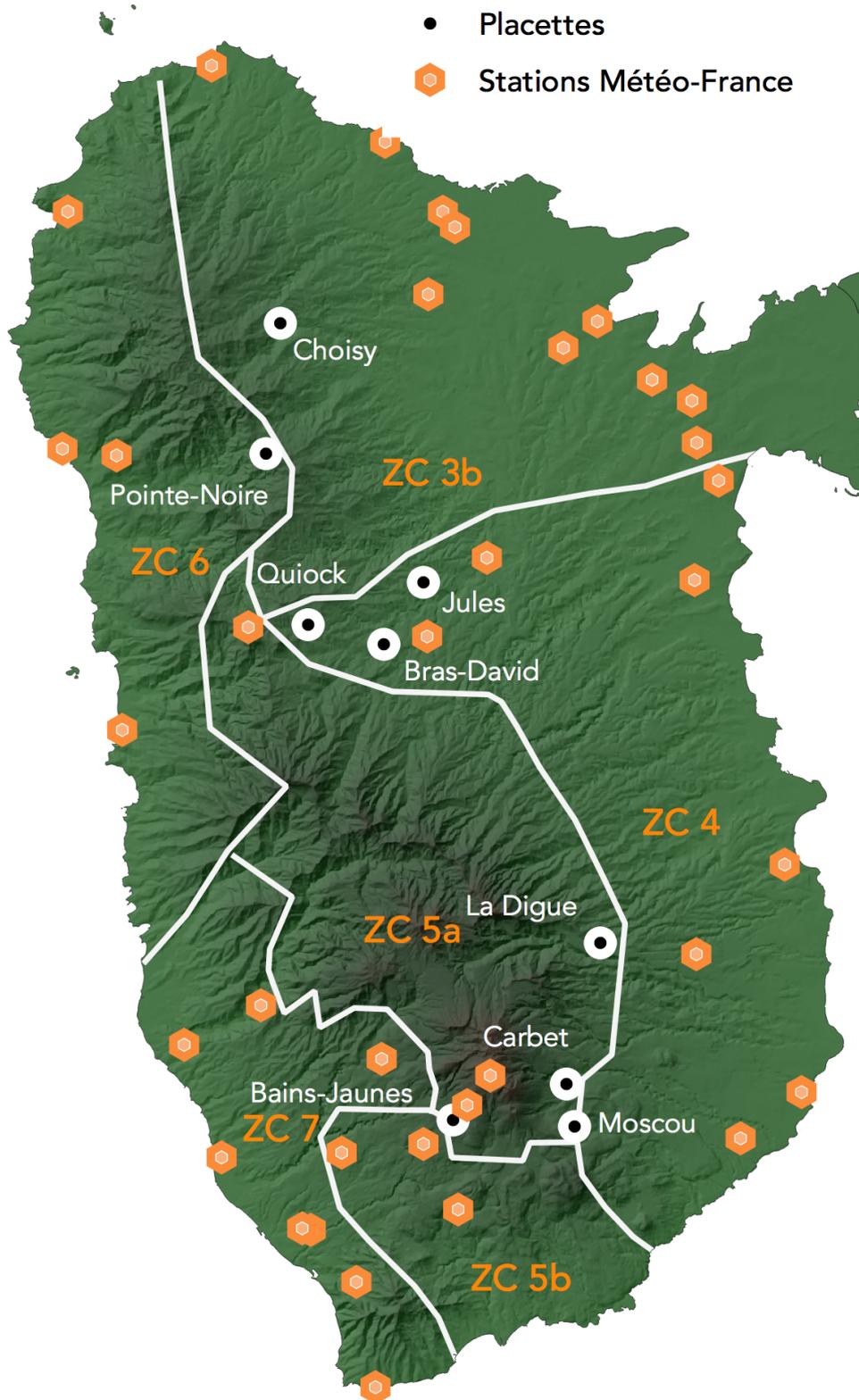


FIGURE 2.2: Zone climatologique de Basse-Terre

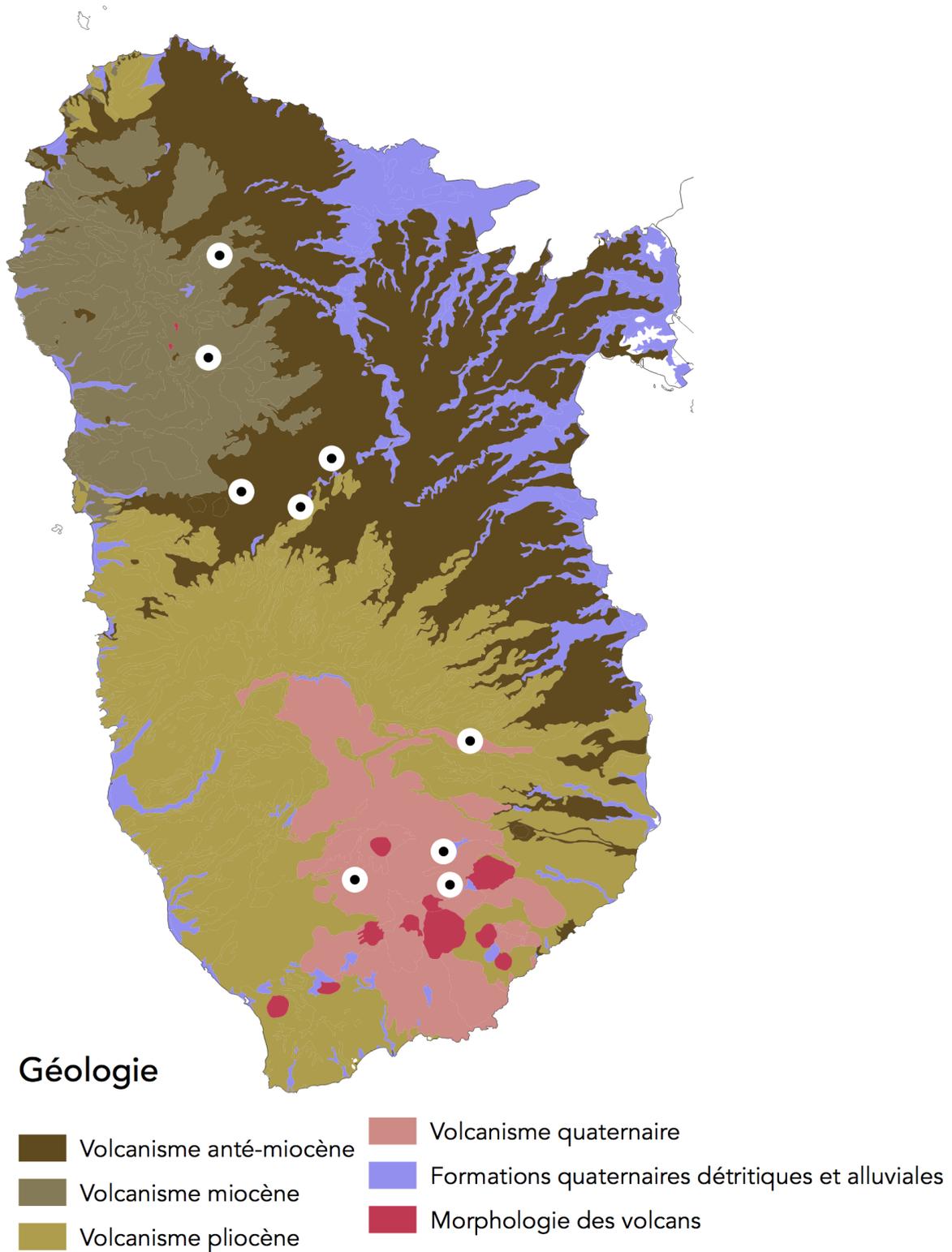


FIGURE 2.3: Géologie de la Basse-Terre

2.1.5 Les espaces boisés de Guadeloupe et du Parc national

Le tableau 2.1 permet de bien visualiser la composition des formations boisées en Guadeloupe et de rendre compte du rôle important joué par les forêts ombrophiles, ne serait-ce qu'en terme surfacique. Avec ses 28 158 ha, la forêt dense humide représente 36 % des espaces boisés de l'archipel, dont une grande partie peut être considérée comme primaire (*a minima* les 11 100 ha du Parc national, soit 40 % de la FDH). Ce tableau permet donc de comprendre l'intérêt d'étudier cette formation puisque :

- elle abrite la diversité floristique la plus importante, et potentiellement faunistique (entomofaune, pédofaune).
- il s'agit de l'écosystème majeur de Guadeloupe et probablement le plus influant sur la physico-chimie de la Guadeloupe, c'est-à-dire la qualité de l'eau, de l'air et du sol.
- il s'agit du seul macro-habitat encore primaire et qui permet donc la recherche fondamentale en écartant la possibilité d'une perturbation humaine.
- elle se localise sur divers ensembles géographiques caractéristiques, ce qui laisse à penser que des communautés végétales peuvent émerger en son sein. On peut lister :
 1. **La latitude** : La géomorphologie très hétérogène avec des sols anciens au Nord de Basse-Terre et très jeune au Sud
 2. **L'altitude** : Des étages de végétation du fait de l'amplitude de l'altitude (100 à 1000 m)
 3. **Le versant** : L'impact micro-climatique fort sur Basse-Terre (pluviométrie, température, vent) engendré par le relief suivant un quasi axe Nord/Sud, qualifié généralement par la dualité *côte au vent* et *côte sous le vent*
 4. **L'activité volcanique** : Les placettes au sud peuvent être exposées à des quantités de soufre atmosphérique non négligeables et des ruissellements d'eau chaude et soufrée (de surface ou aquifère) impactant probablement la croissance des arbres ou les communautés elles-mêmes.
- il s'agit de l'unique macro-habitat protégé à 40 % et donc propice à endosser le rôle de sentinelle face aux changements globaux.
- il s'agit du Corridor et Réservoir de biodiversité principal de la Guadeloupe.
- il s'agit d'un lieu emblématique de l'archipel, d'un moteur majeur du tourisme de l'île, de la raison première de la création du Parc national de la Guadeloupe, et que cet écosystème mérite donc d'être mieux compris afin d'être mieux respecté de tous.

TABLE 2.1: Localisation des surfaces forestières Guadeloupe

Secteurs du PNG	Superficie Totale (ha)	Dont Boisée (ha)
Cœur	18 729	17 784
AOA ⁴	93 736	42 637
AMA ⁵	1 324	1 061
Hors-PNG	49 805	16 653
GUADELOUPE	163 584	78 145

Espaces Boisés ⁶	Superficie Totale (ha)	Dont en Cœur (ha)
Bas fourré d'altitude	305	303
Fourré d'altitude	1 065	1 062
Forêt altimontaine	5 180	4 100
Forêt ombrophile	28 158	11 110
Forêt sempervirente saisonnière	6 309	93
Forêt semi-décidue	20 867	24
Forêt marécageuse	2 132	360
Mangrove	2 744	563
Autres	11 385	179
GUADELOUPE	78 145	17 784

⁴ Aire Optimale d'Adhésion

⁵ Aire Marine Adjacente

⁶ Données obtenues par analyse cartographique (Source : M.Jegu - ONF, 2019)

2.2 Explication du dispositif de suivi de croissance FDH

2.2.1 Objectifs généraux

Dans le cadre de l'Observatoire des écosystèmes forestiers, l'objectif originel de la mise place de ce dispositif fut l'étude de la dynamique forestière, avec la mortalité, le recrutement et l'accroissement comme priorité (6). A l'instar de RENECOFOR créé en 1992, réseau métropolitain de l'ONF dont la mission est de détecter d'éventuels changements dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers afin de mieux les comprendre. La différence entre

ces 2 réseaux réside dans la diversité des compartiments étudiés. En plus des suivis dendrométriques, RENECOFOR s'intéresse aussi aux compartiments sol et atmosphère⁷. Les pluies acides des années 80 ont été à l'origine de la mise en place du dispositif métropolitain, avec pour moteur, la crainte grandissante dans l'opinion d'un effondrement des espaces forestiers suite à ces pollutions. A titre comparatif, les pollutions atmosphériques en Guadeloupe peuvent être extrêmement fortes, confortant le fait qu'il faudra un jour imiter le réseau RENECOFOR en incorporant les autres compartiments, pour améliorer le rôle de sentinelle de ce dispositif.

En plus de cet objectif principal, nous pouvons lister cinq autres objectifs :

1. **Suivre** l'évolution de la dynamique de ces systèmes forestiers (Rôle Sentinelle décrit précédemment)
2. **Comprendre** l'organisation et le fonctionnement des forêts insulaires (Engendrées par des conditions abiotiques particulières)
3. **Rechercher** l'origine historique et fonctionnelle de la biodiversité (Géologie, Climat, Catastrophes Naturelles, Dispersion)
4. **Rechercher** des indicateurs plus précis de la santé de cet écosystème (carbone stocké par exemple ou plus largement les rôles écosystémiques)
5. **Promouvoir** l'étude de l'écosystème dans toutes ses dimensions (Arthropode, Orchidaceae, Bryophyte,...)

2.2.2 Fonctionnement du dispositif

Un choix de taille

Le réseau de placettes permanentes est composé de 9 placettes de 1 ha, sub-divisées en 25 placeaux de 400 m² chacun. La taille choisie d'un hectare correspond à une échelle standard, déjà utilisée dans d'autres réseaux de suivi en forêt tropicale tel que GUYAFOR en Guyane. Il s'agit d'un compromis entre aspects pratiques, économiques et statistiques. En effet, une plus petite surface minimiserait la richesse spécifique réelle, bien que celle-ci soit impossible à obtenir du fait des espèces rares mais également parce qu'en Guadeloupe, il n'y a quasiment pas de limite d'espèces au niveau local dans des milieux aussi diversifiés notamment du fait des étages de végétation engendrés par les gradients altitudinaux. Nous l'observerons d'ailleurs dans le prochain chapitre, lors des tracés de courbes aire/espèce (SAC).



FIGURE 2.4: Panneau placette

7. <http://www1.onf.fr/renecofor/sommaire/renecofor>

Choix de l'emplacement du dispositif

Je n'ai pas pu avoir accès à des informations précises à ce sujet. Un compte rendu daté du 13-03-2009 (Rapporteur : Magali Rossi - ONF) mentionne les secteurs désirés à l'époque : *"Il est prévu dans le dispositif, l'installation de 7 placettes auxquelles s'ajoutent les 3 placettes témoins du dispositif INRA Forêt Dense Humide (La Digue, Choisy, Jules). Une nouvelle placette, Bains-Jaunes, a déjà été installée en 2008 au pied du massif de la Soufrière. Il reste donc 6 placettes à installer :*

- Deux au niveau de la Route de la Traversée : rivière Quiock, Providence (à confirmer),
- Une sur le site des chutes du Carbet, commune de Capesterre,
- Une au sein du projet de réserve intégrale versant rivière du Carbet,
- Une en côte-sous-le-vent en altitude,
- Une en forêt d'altitude de la Soufrière. "

La 10^e placette en forêt d'altitude n'a pas pu voir le jour. Probablement dû au fait qu'elle ne répondait pas aux objectifs spécifiques à la forêt dense humide.

Les arbres équipés

La totalité des arbres de plus de 10 cm de diamètre (31,4 cm de circonférence), mesurés à hauteur de poitrine (~1,3 m) ont été équipés sur chaque placette. Encore une fois, il s'agit d'un standard, qui répond aux mêmes aspects cités précédemment. Alain Rousteau (16) estime d'ailleurs qu'un inventaire total des tiges avoisinerait les 660 000 individus!

L'équipement consiste à installer un dendromètre, c'est à dire un ruban métallique en inox, poinçonné à deux extrémités afin d'y tendre un ressort. La mesure s'effectue en mesurant la distance (en millimètre) entre le trait vertical marqué lors du recrutement et l'extrémité de la découpe du ruban métallique.

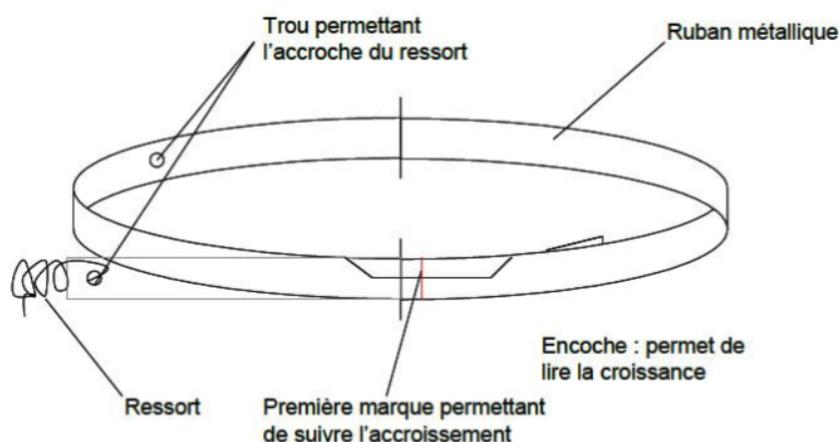


FIGURE 2.5: Schéma d'un dendromètre

Identification

Malheureusement, très peu de suivis écrits ont été à ma disposition et dans les archives du Parc. Alain Rousteau et Clément Lermyte sont d'aujourd'hui les principaux identificateurs connus. Sur les plus de 8 000 arbres équipés depuis 2009, près de 90% des arbres ont été déterminés. Un indice de sureté et un suivi des identifications (auteurs et date) seront clairement des éléments à prendre en compte pour augmenter la rigueur et la traçabilité de l'énorme travail effectué.

TABLE 2.2: Bilan des déterminations après la campagne 2020 (hors palmiers et fougères)

Site	Indéterminés	Déterminés	Total
Bains-Jaunes	147	1008	1155
Bras-David	84	1009	1093
Carbet	145	1091	1236
Choisy	32	853	885
Jules	153	704	857
La Digue	83	743	826
Moscou	129	810	939
Pointe Noire	70	599	669
Quiock	125	953	1078
Totaux	968	6692	7660

Progression *in situ*

La méthode d'inventaire sur le terrain est intuitive et suit les codes d'un martelage classique. Malgré tout, un hectare nécessite *a minima* deux journées entières, impliquant le travail de 6 agents (figure 2.6). Les principales difficultés (Photos : Figure 2.9) résident dans :

- La prise de repère en sous-bois, du fait de la luxuriance des sites,
- La difficulté de progression sur certains sites à très fort dénivelé et/ou à sous-bois dense,
- L'état des parcelles (chablis), obligeant le rééquipement des arbres, étape très chronophage,
- Le vieillissement du dispositif, amenant à une difficulté de visibilité des points de repères. (poteaux PVC, cordes délimitatrices)
- Les coordonnées approximatives nécessitant des corrections et qui compliquent la progression

L'apurement progressif sur site à chaque année de campagne et donc dans la base de données va progressivement simplifier et optimiser le travail des agents de terrain. C'est d'ailleurs l'intérêt des cartes de spatialisation (figure 2.7), qui permettent de coordonner la progression en ligne des agents au sein des différents placeaux.

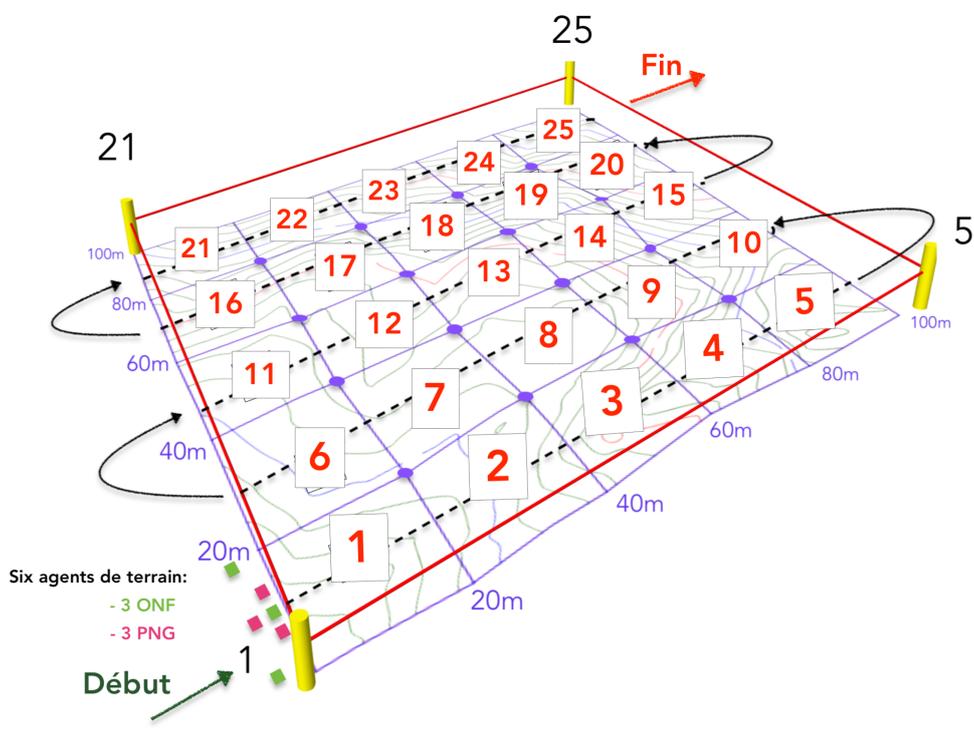


FIGURE 2.6: Méthode de progression au sein des placeaux lors d'un suivi annuel de placette

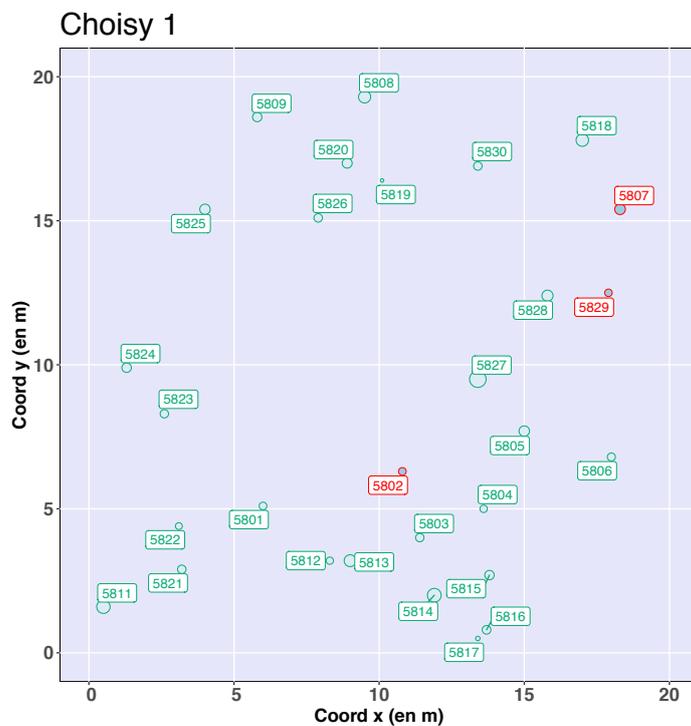


FIGURE 2.7: Exemple d'une carte de spatialisation pour le placeau 1 à Choisy

En terme de répartition des tâches, sur les 6 agents :

- un agent prend les notes
- trois agents mesurent et vérifient la santé des arbres équipés
- un agent se charge d'équiper les arbres nouvellement recrutés, ainsi que de la réparation des dendromètres endommagés
- un agent se charge de l'orientation grâce aux cartes de spatialisation.

Il peut être nécessaire, selon l'état de la placette, d'augmenter le seuil de 6 agents présents sur site. Cela fut le cas sur la placette de Pointe-Noire pour l'année 2020. Cette placette, particulièrement pentue, a nécessité trois jours de terrain et 7 personnes furent nécessaires à chaque fois. L'équipement des arbres peut donc parfois nécessiter la présence de deux agents.

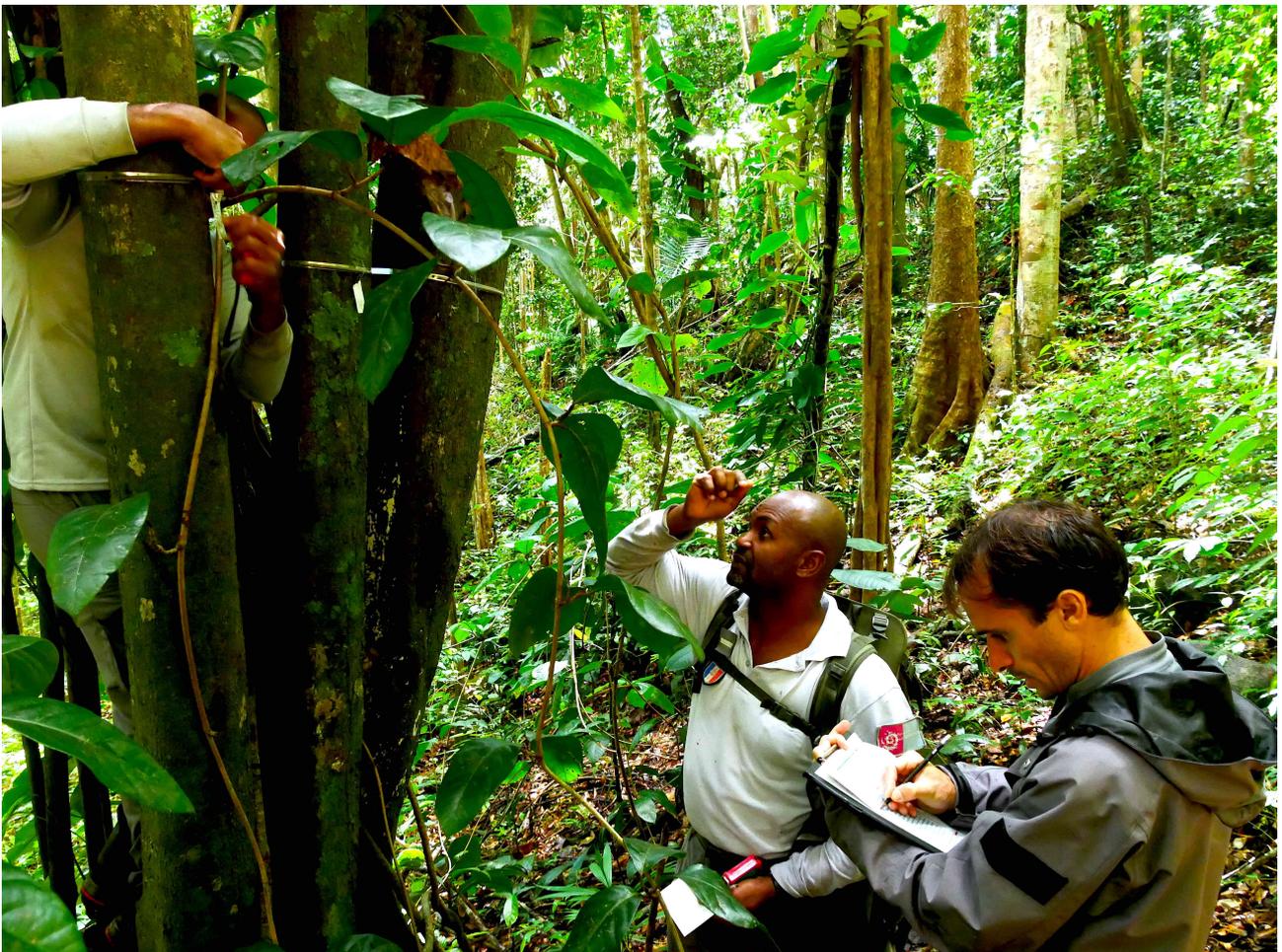


FIGURE 2.8: Agents du PNG sur la placette de Choisy (M. Valy, F. Bastaraud, X. Kieser - 2020)



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 2.9: (a) Densité du sous-bois - La Digue (N.Liagre / PNG) (b) Chablis post-cyclonique - Bains-Jaunes (c) Matériels de délimitations toujours visibles - Moscou (d) Contraintes pluviométriques même durant le carême (M.Gayot / ONF)

2.2.3 Spatialisation

Un seul document retrouvé à ce jour témoigne d'une réalisation en 2015, effectué par Vincent PAUTRET et Saad ZAGDOUNI. Le matériel utilisé fut une station TCRP 1205 de LEICA pour la totalité des placettes, mis à part celle de Carbet où le matériel fut un théodolite optique et un mètre ruban.

Les arbres se sont vus attribuer des coordonnées euclidiennes, relatives à la coordonnée (0,0) soit l'extrémité du Placeau 1 sur chaque placette. Il n'y avait donc pas encore de coordonnées UTM à proprement parler, et donc impossibilité de rattacher des variables telles que la pente et l'altitude pour chaque arbre.

Le Parc national de la Guadeloupe a initié début 2020 un nouvel inventaire des points géographiques des placettes (c.a.d les quatre extrémités de chaque placette). En effet, il était indispensable de disposer du placement et de l'orientation de chaque placette, afin d'obtenir la localisation de chaque arbre la plus précise possible. Ce sans quoi, des analyses plus avancées, telle que les analyses spatiales, peuvent être limitées. La détection d'agrégation/répulsion au sein du peuplement d'arbres est l'un des critères principaux, témoignant de l'action de mécanismes écologique et/ou biologique sur les stations⁸ considérées. Comprendre ces agrégations impliquent donc de connaître le contexte stationnel (local), d'où la nécessaire précision de localisation des sites et non pas que des arbres entre eux. Cette spatialisation est d'ailleurs indispensable pour analyser les données qui découlent du récent passage du LIDAR en Guadeloupe⁹.

Une fois cette délimitation terminée, il était nécessaire de faire évoluer les coordonnées euclidiennes de chaque arbre, pour qu'elles coïncident avec les coordonnées réelles des placettes et donc de leur orientation bien souvent décalé de l'axe Nord/Sud.

Pour cela, il a fallu déterminer la localisation de l'origine (toujours l'extrémité du placeau 1) par rapport aux points cardinaux. Autrement dit, répondre à la question "l'extrémité du placeau 1, est-elle au sud-est, sud-ouest, nord-est ou nord-ouest?"

On a comme équation, dans le cas d'une origine en Sud-Est, les coordonnées suivantes pour un arbre i :

$$x_i = \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times x_{utmSE} + \frac{x_{ii}}{x_{kmax}} \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times x_{utmNE} + \frac{y_{ii}}{y_{kmax}} \times \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times x_{utmSO} + x \times \left(\frac{y_{ii}}{x_{kmax} \times y_{kmax}}\right) \times x_{utmNO} \quad (2.1)$$

8. En biogéographie, portion d'un territoire naturel définie par un ensemble de facteurs biologiques, climatiques, géologiques, géomorphologiques et pédologiques

9. télédétection par laser

$$y_i = \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times y_{utmSE} + \frac{x_{ii}}{x_{kmax}} \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times y_{utmNE} + \frac{y_{ii}}{y_{kmax}} \times \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times y_{utmSO} + x \times \left(\frac{y_{ii}}{x_{kmax} \times y_{kmax}}\right) \times y_{utmNO} \quad (2.2)$$

et dans le cas d'une origine en Sud-Ouest, rien ne change à l'exception des points aux extrémités, afin d'opérer la nouvelle rotation. Les coordonnées pour un arbre i sont donc :

$$x_i = \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times x_{utmSO} + \frac{x_{ii}}{x_{kmax}} \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times x_{utmSE} + \frac{y_{ii}}{y_{kmax}} \times \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times x_{utmNO} + x \times \left(\frac{y_{ii}}{x_{kmax} \times y_{kmax}}\right) \times x_{utmNE} \quad (2.3)$$

$$y_i = \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times y_{utmSO} + \frac{x_{ii}}{x_{kmax}} \times \left(1 - \frac{y_{ii}}{y_{kmax}}\right) \times y_{utmSE} + \frac{y_{ii}}{y_{kmax}} \times \left(1 - \frac{x_{ii}}{x_{kmax}}\right) \times y_{utmNO} + x \times \left(\frac{y_{ii}}{x_{kmax} \times y_{kmax}}\right) \times y_{utmNE} \quad (2.4)$$

où :

- x_i = l'abscisse x de l'arbre i calculé et projeté (EPSG :4559)
- x_{ii} = l'ancien abscisse x de l'arbre i (ancien jeu de donnée)
- x_{kmax} = l'abscisse maximum que peut prendre un arbre potentiel k sur la placette
- y_i = l'ordonnée y de l'arbre i calculée et projetée (EPSG :4559)
- y_{ii} = l'ancienne ordonnée y de l'arbre i (ancien jeux de donnée)
- y_{kmax} = l'ordonnée maximum que peut prendre un arbre potentiel k sur la placette
- x_{utmSO} = l'abscisse de l'extrémité en sud-ouest de la placette considérée (EPSG :4559)
- x_{utmSE} = l'abscisse de l'extrémité en sud-est de la placette considérée (EPSG :4559)
- x_{utmNO} = l'abscisse de l'extrémité en nord-ouest de la placette considérée (EPSG :4559)
- x_{utmNE} = l'abscisse de l'extrémité en nord-est de la placette considérée (EPSG :4559)
- y_{utmSO} = l'ordonnée de l'extrémité en sud-ouest de la placette considérée (EPSG :4559)
- y_{utmSE} = l'ordonnée de l'extrémité en sud-est de la placette considérée (EPSG :4559)

- y_{utmNO} = l'ordonnée de l'extrémité en nord-ouest de la placette considérée (EPSG :4559)
- y_{utmNE} = l'ordonnée de l'extrémité en nord-est de la placette considérée (EPSG :4559)

Grâce à cette localisation désormais plus précise, il nous est possible d'associer de nouvelles variables individuelles : la **pente** et l' **altitude** (effectué sous R : package sf). Sur le tableau récapitulatif 2.3, on remarque clairement une hétérogénéité sur ces deux critères. Certaines placettes possèdent de très fort dénivelé, à l'instar de Moscou, et à l'inverse, une quasi planitude pour Bras-David par exemple.

Autre point intéressant, il nous est désormais possible de représenter spatialement et en trois dimensions le contexte géomorphologique et paysager des placettes (Figure 2.10, 2.11, 2.12).

Nous pouvons également représenter individuellement chaque placette (figure 2.13) et même chaque arbre (figure 2.14) dans leur paysage et toujours en trois dimensions, à l'image de Bains-Jaunes.

Enfin derniers avantages mais non des moindres, la spatialisation permet de simplifier le travail de terrain en simplifiant la progression en ligne, en corrigeant les imprécisions directement sur site et en obtenant les coordonnées des nouveaux arbres recrutés. Les cartes de spatialisation sont généralement utilisées par un seul des agents sur le terrain afin qu'il guide les cinq autres. A l'image de la figure 2.7, on peut très facilement indiquer les arbres (en rouge) présentant des besoins spécifiques (vérifier l'espèce, les coordonnées, la circonférence, le numéro ...).

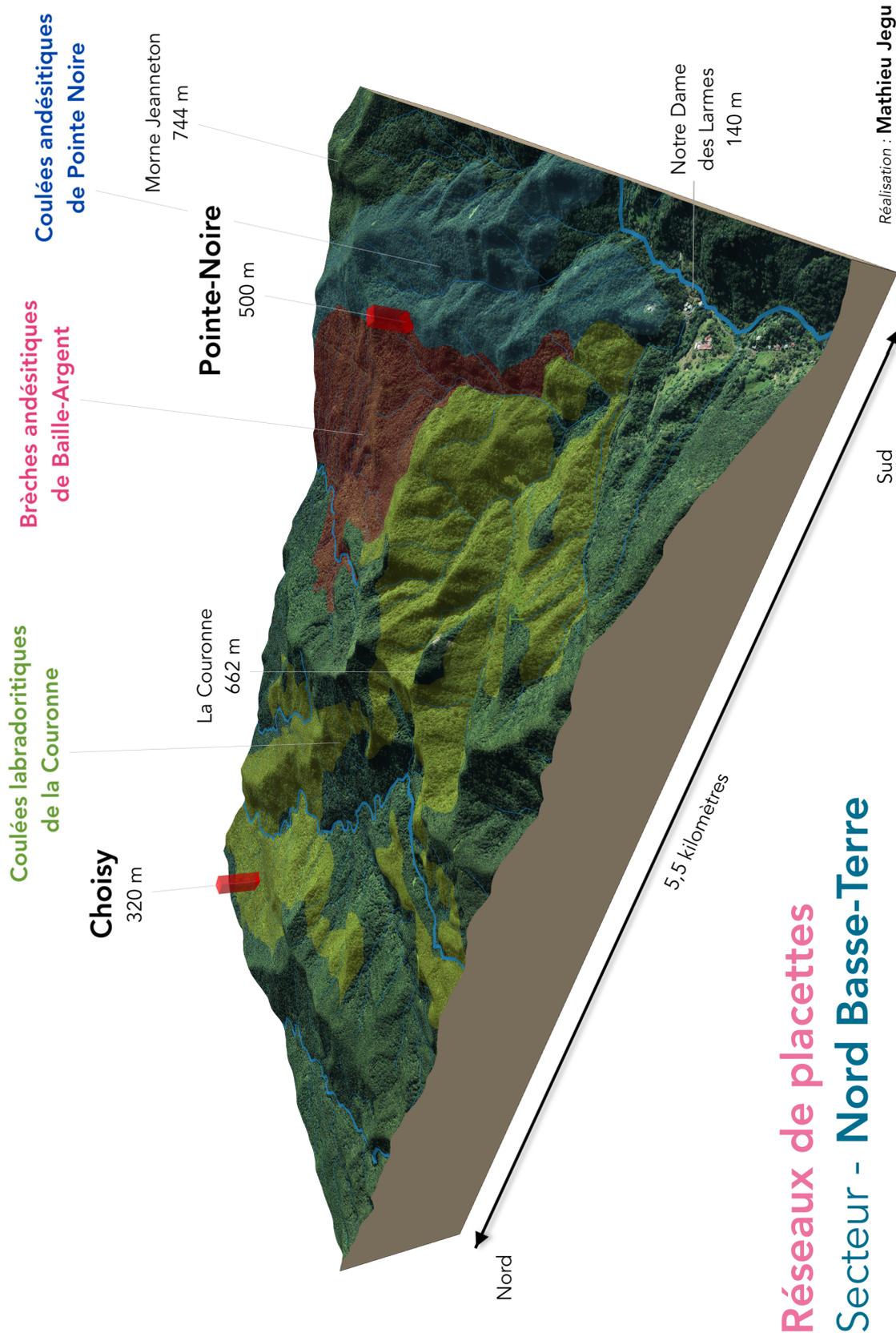


FIGURE 2.10: Carte 3D : Secteur Nord Basse-Terre

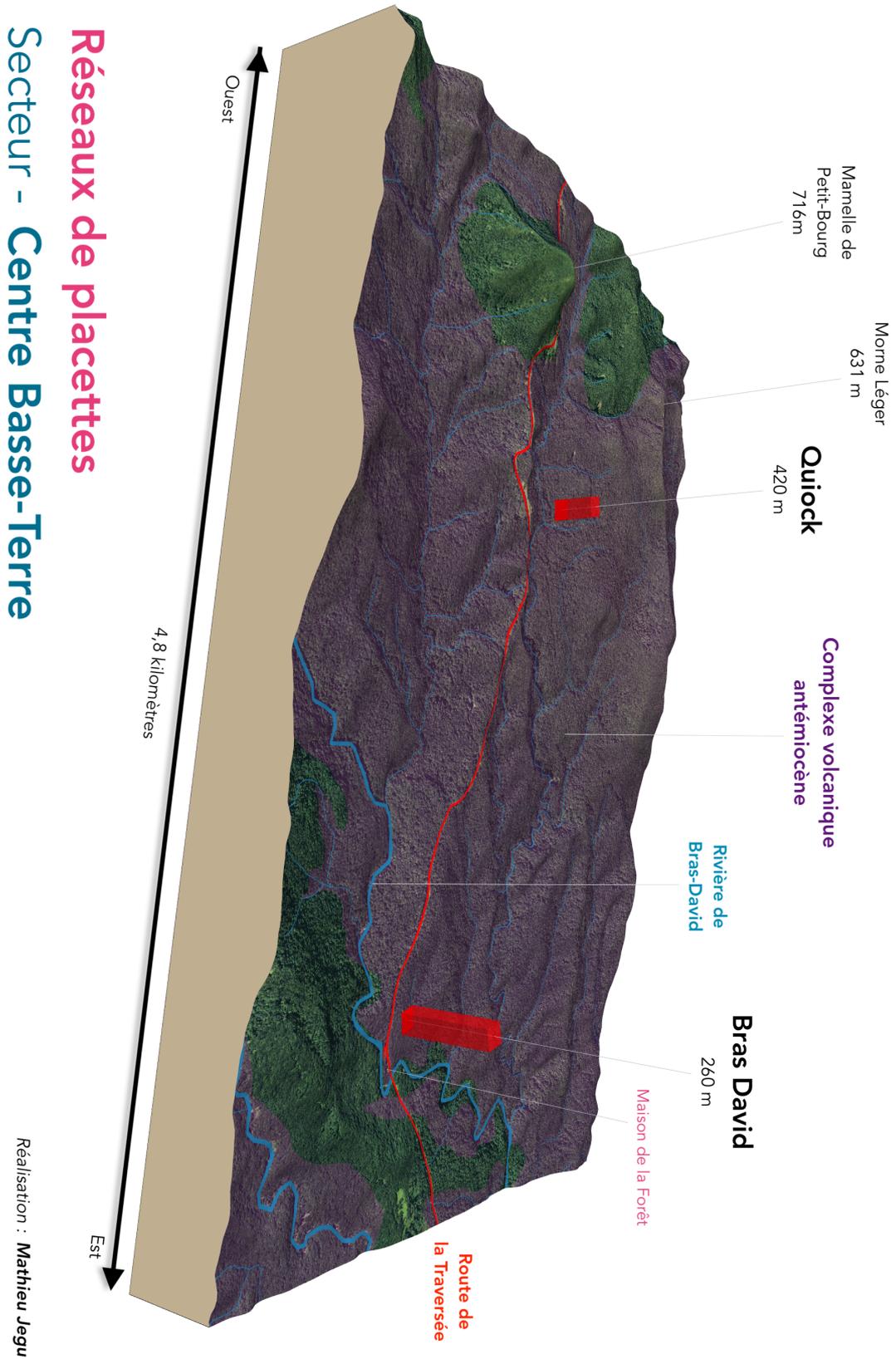


FIGURE 2.11: Carte 3D : Secteur Centre Basse-Terre

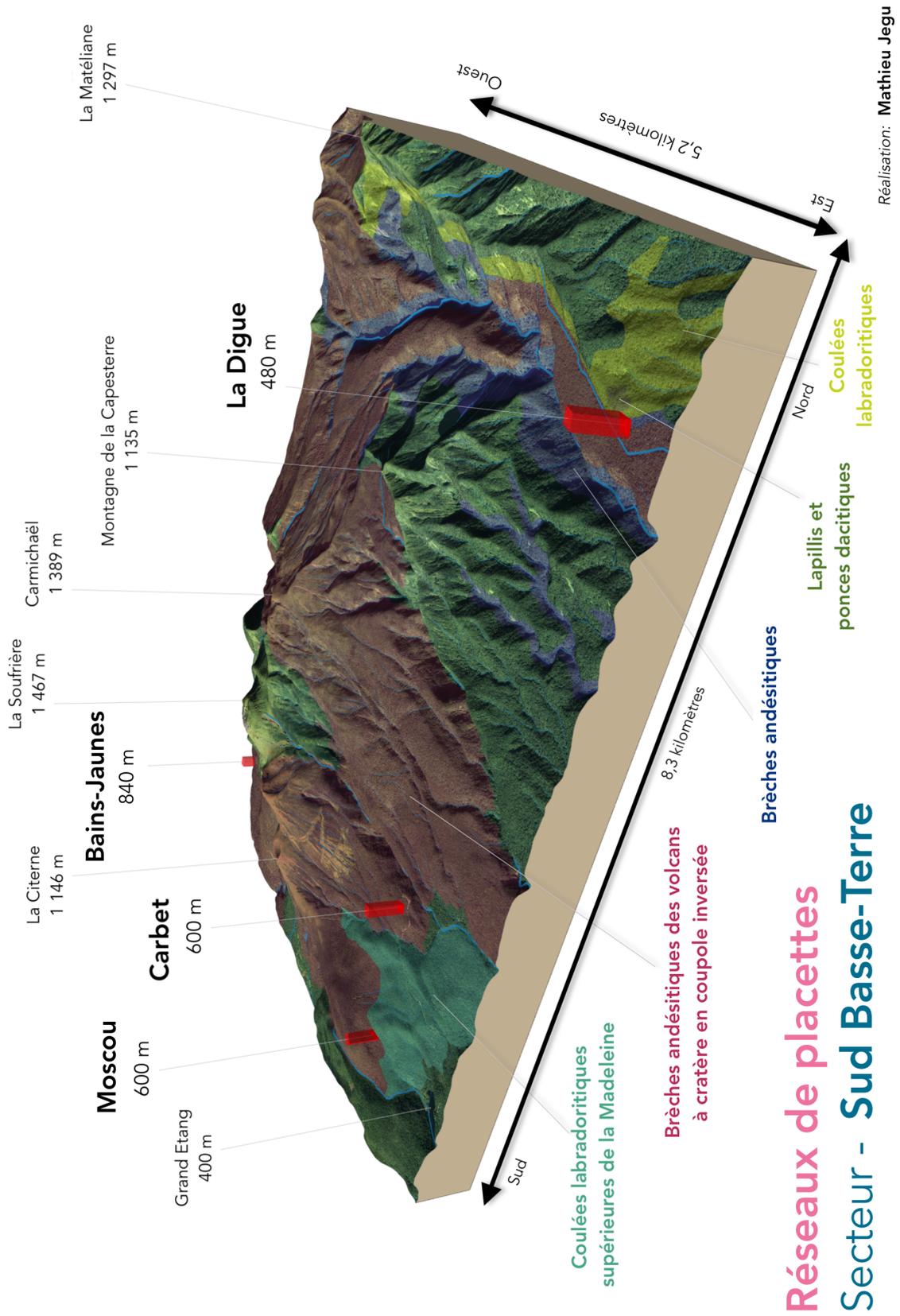


FIGURE 2.12: Carte 3D : Secteur Sud Basse-Terre

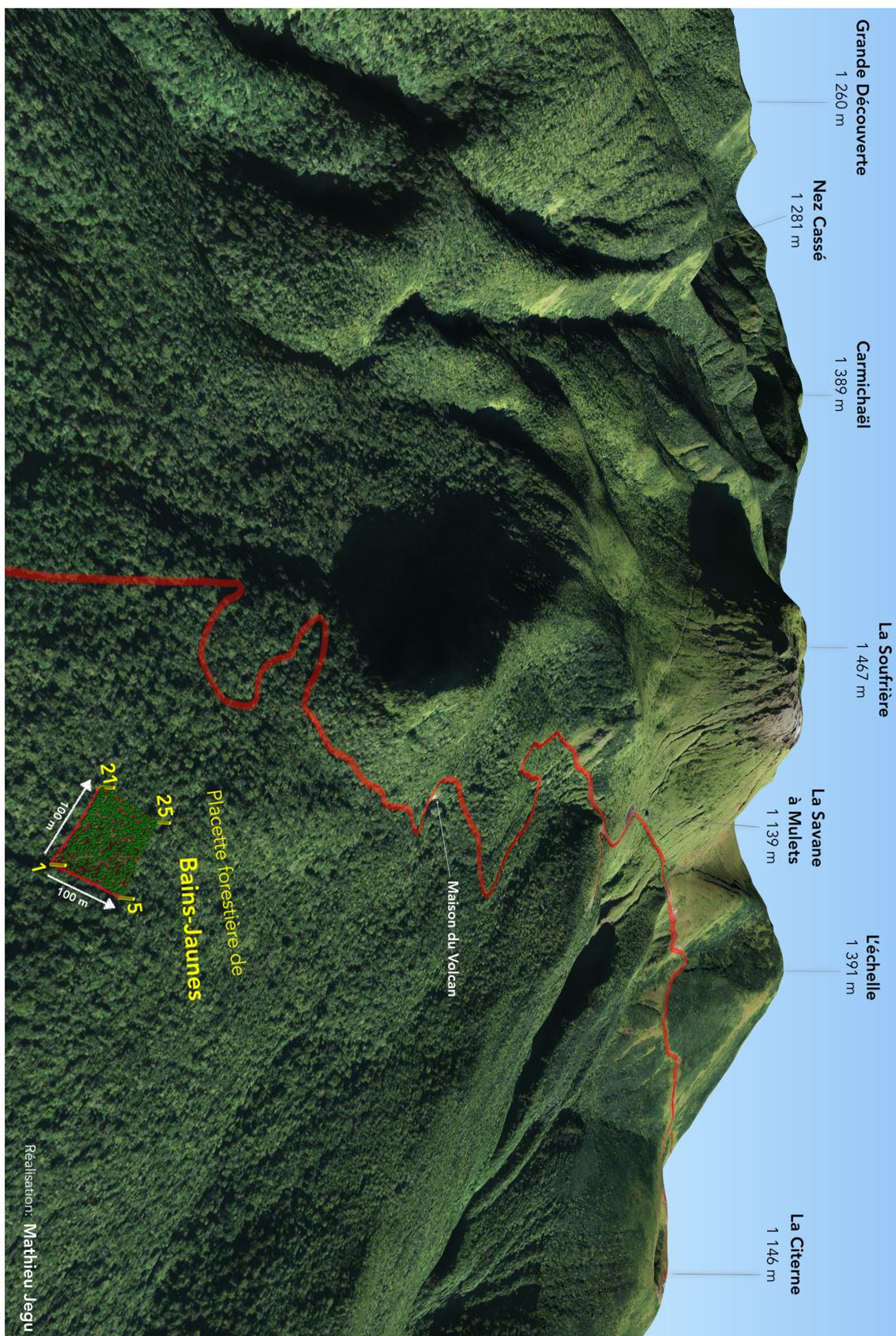


FIGURE 2.13: Spatialisation de la placette de Bains-Jaunes dans le massif de la Soufrière

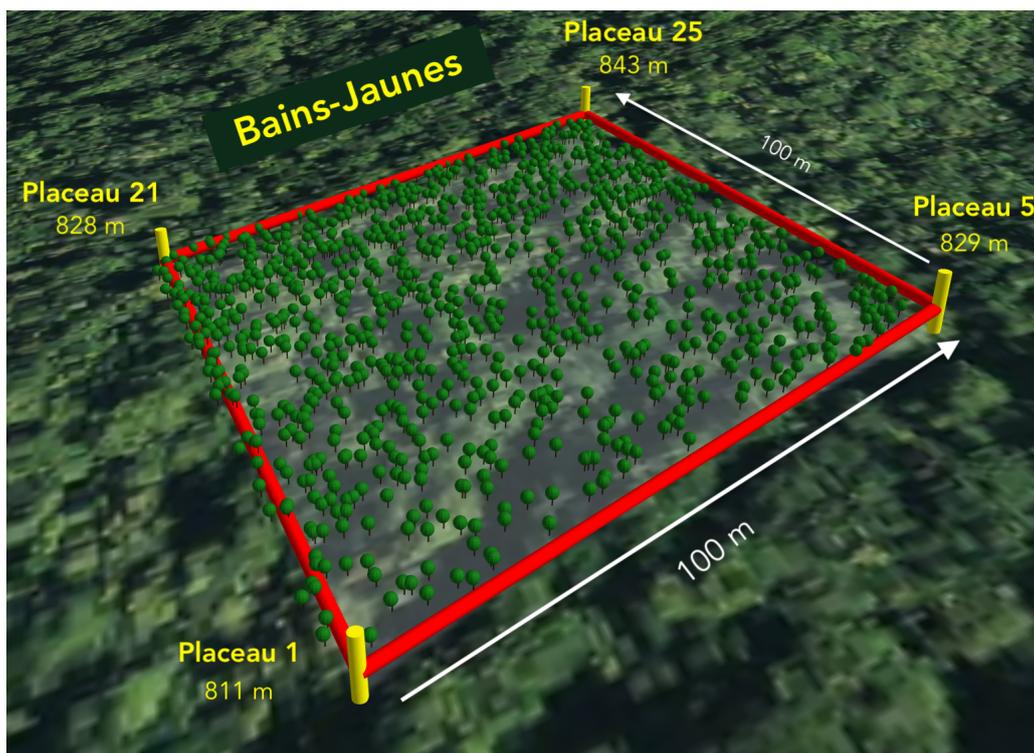


FIGURE 2.14: Spatialisation des arbres de la placette de Bains-Jaunes dans le massif de la Soufrière

TABLE 2.3: Liste des coordonnées GPS des extrémités de chaque placette

	Altitude et Dénivelé	EPSG :4559 Est (X)	EPSG :4559 Nord (Y)	EPSG :4326 Longitude (x)	EPSG :4326 Latitude (y)
Bains-Jaunes	$D^+ = 32\ m$				
1	811 m	641744	1772704	- 61,675088	16,029974
5	829 m	641840	1772730	- 61,674189	16,030207
21	828 m	641729	1772800	- 61,675224	16,030843
25	843 m	641820	1772824	- 61,674367	16,031057
Bras-David	$D^+ = 12\ m$				
1	254 m	639433	1788809	- 61,695736	16,175670
5	251 m	639527	1788844	- 61,694856	16,175975
21	249 m	639407	1788904	- 61,695973	16,176525
25	242 m	639500	1788937	- 61,695104	16,176818
Carbet	$D^+ = 29\ m$				
1	593 m	645679	1773892	- 61,638238	16,040481
5	592 m	645654	1773987	- 61,638470	16,041349
21	619 m	645587	1773861	- 61,639107	16,040213
25	621 m	645563	1773956	- 61,639325	16,041068
Choisy	$D^+ = 47\ m$				
1	292 m	636074	1799756	- 61,726510	16,274796
5	298 m	636079	1799854	- 61,726458	16,275678
21	305 m	635979	1799765	- 61,727402	16,274880
25	339 m	635989	1799860	- 61,727307	16,275744
La Digue	$D^+ = 40\ m$				
1	475 m	646572	1778747	- 61,629598	16,084310
5B	479 m	646548	1778862	- 61,629809	16,085353
22	482 m	646470	1778765	- 61,630552	16,084481
25B	515 m	646448	1778880	- 61,630744	16,085519
Moscou	$D^+ = 57\ m$				
1	613 m	645840	1772435	- 61,636830	16,027310
5	600 m	645887	1772510	- 61,636386	16,027986
21	657 m	645753	1772471	- 61,637641	16,027640
25	640 m	645799	1772555	- 61,637200	16,028390

Pointe-Noire	$D^+ = 43\ m$				
1	507 m	635594	1795322	- 61,731264	16,234746
5	521 m	635666	1795373	- 61,730590	16,235202
21	480 m	635541	1795394	- 61,731750	16,235406
25	478 m	635607	1795445	- 61,731134	16,235863
Quiock	$D^+ = 31\ m$				
1	422 m	636986	1789487	- 61,718584	16,181934
5	415 m	637083	1789515	- 61,717669	16,182180
21	446 m	636955	1789581	- 61,718863	16,182787
25	431 m	637050	1789604	- 61,717974	16,182987



FIGURE 2.15: Mesures et équipements des arbres par les agents de l'ONF (Mathieu Jegu, Noémie Videau) et du PNG (Maurice Valy)

2.3 Démarche analytique

Afin de mesurer les possibilités d'évolution de ce dispositif, il est nécessaire de passer par différentes étapes d'analyse. On peut résumer un ordre logique d'analyse pour progresser dans la compréhension des données recueillies :

1. *L'analyse descriptive* : Résumer des données grâce à des calculs ou des graphiques simples.
2. *L'analyse exploratoire* : Plonger facilement dans un gros jeu de données **sans obligation d'avoir une question** précise derrière la tête.
3. *Le test* : Accepter/rejeter une hypothèse bien précise en assumant un risque d'erreur.
4. *Modéliser* : Chercher à **comprendre comment évolue un phénomène** en fonction d'un ensemble de paramètres.

Sur la figure 2.16, on observe les principaux niveaux hiérarchiques qui permettent de re-situer les étapes de l'ordre logique d'analyse vue précédemment. La demande du Parc national étant de réaliser :

- La description : Richesse spécifique, abondance/distribution, mortalité, recrutement
- La comparaison des accroissements intégrant les deux placettes nouvellement inventoriées
- La comparaison de l'évolution des surfaces terrières (pondérer les accroissements par la taille des arbres)
- Améliorer les analyses de communautés
- Analyser des classes de circonférences

On se situe donc dans des analyses de types descriptives et exploratoires, ce qui semble prioritaire étant donné le caractère jeune du dispositif. La modélisation ne fera pas partie de ce rapport mais sera abordée en discussion en complément de l'analyse de ces résultats.

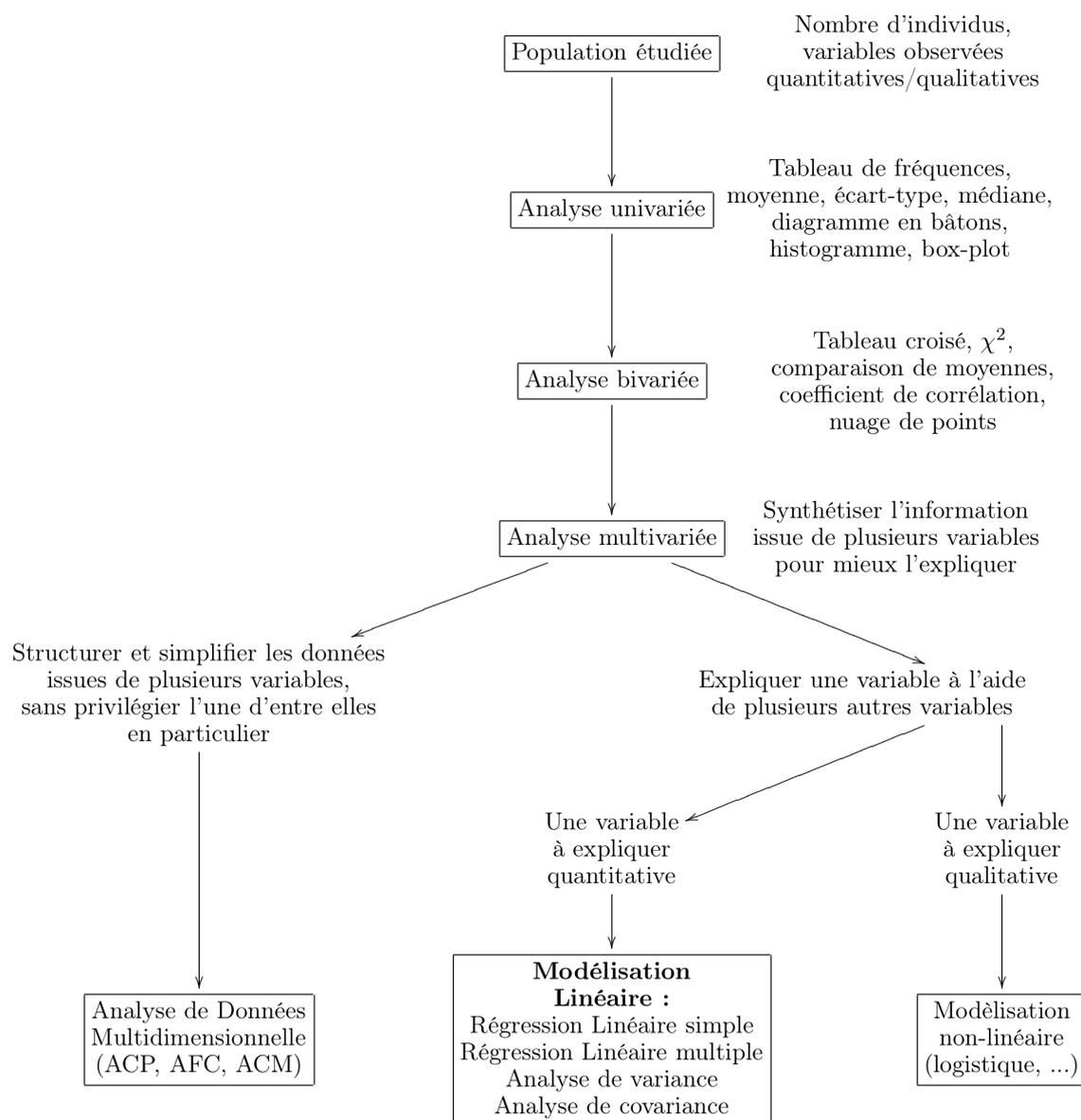


FIGURE 2.16: Schéma de la démarche statistique (C.Chouquet, 2010)

2.3.1 Analyse descriptive

Structure du peuplement

Il s'agira ici de résumer le dispositif dans des descriptions visuelles synthétiques. Le carte ci-dessous permet de situer géographiquement chaque placette. Du fait du non suivi de la placette de Jules pour cause de perturbations anthropiques sur site et donc du caractère trop dégradé de la placette, cette dernière sera sortie des différents résultats à l'exception de certaines descriptions synthétiques.

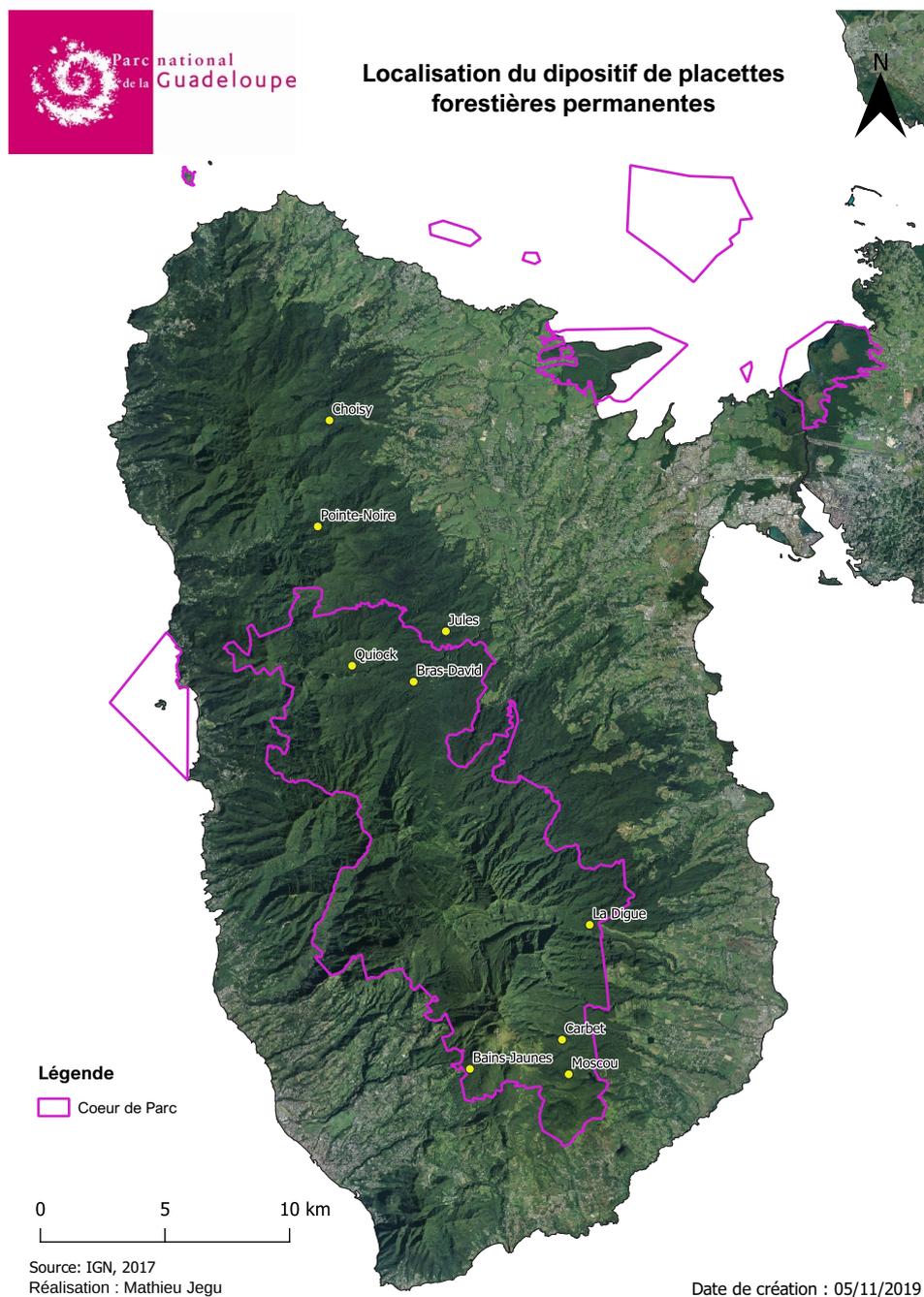


FIGURE 2.17: Carte des 9 placettes du dispositif

Afin de décrire plus finement le peuplement, notamment par rapport à la surface terrière et la densité, les arbres seront classés par catégories de tailles de la manière suivante :

1. PB : Petit Bois (< 22,5 cm)
2. MB : Moyen Bois (22,5 - 47,5 cm)
3. GB : Gros Bois (47,5 - 67,5 cm)
4. TGB : Très Gros Bois (> 67,5 cm)

Ces quatre classes sont les classes standards utilisées par l'IGN dans le cadre des inventaires forestiers nationaux. Enfin, nous analyserons plus spécifiquement les distributions diamétriques sous différents angles (Espèces, Sites, Altitudes).

Description du peuplement et des sites

Une description de la composition taxonomique au sein du dispositif sera exposée ici avec une mise à jour des noms scientifiques et des familles botaniques. Un aspect rapide de la réglementation de certaines espèces sera également abordé.

Concernant les sites, il s'agira de décrire principalement les caractéristiques physiques des sites notamment les données d'altitudes et de pentes nouvellement obtenues.

Mesures neutres de la diversité

Mesurer la diversité est une tâche compliquée qui repose sur des concepts mathématiques difficiles à appréhender. Le caractère neutre de ces mesures signifie qu'aucun poids n'est donné à une espèce en particulier. Les mesures de diversité se limitent généralement à un taxocène (10), c'est-à-dire un sous-ensemble des espèces d'une communauté reliées taxonomiquement. Les arbres par exemple.

Les indices classiques de diversité sont ceux de Shannon et de Simpson, et la richesse spécifique. Ils peuvent être estimés à partir des données d'inventaire tels que le réseau de placettes de Guadeloupe. L'estimation de la richesse est une science en perpétuelle évolution. Pour cette partie, nous nous inspirerons d'un manuel référence rédigé par Eric Marcon, chercheur au sein de l'UMR EcoFog en Guyane (10). Les estimateurs non-paramétriques (Chao et Jackknife) sont les plus utilisés et facile à mettre en place grâce aux outils informatiques. Nous les utiliserons donc en plus des indices de Shannon, Simpson et Pielou.

Plusieurs types de mesures de diversité existent : diversité α , β et γ). Nous nous concentrerons ici sur les diversités les plus simples α et γ . En effet, la diversité β est dépendante des découpages de systèmes étudiés et donc de la définition même de l'habitat (10), ce qui est ici difficile puisque nous étudions la forêt dense humide de Guadeloupe en tant qu'un seul et même habitat. Chaque placette ne correspond donc pas nécessairement à un habitat différent des autres. Quid de la définition d'un habitat, macro-habitat ou encore de communauté et méta-communauté. Dans ce document nous prendrons la définition de Marcon, avec comme postulat que "la communauté est le niveau de découpage concernant la diversité α (la placette) et méta-communauté le niveau de regroupement pour l'estimation de la diversité γ " (le réseau de placettes comme sous-échantillon de la FDH).

2.3.2 Analyse exploratoire

Analyses multivariées

Afin d'étudier les communautés en présence, seules les données de la première campagne (premiers arbres équipés) ont été sélectionnées, soit 8449 individus. Les arbres de Jules et toutes les espèces représentées par moins de 30 individus ont également été écartés pour les besoins de cette analyse. **Cela représente donc 7 232 individus** répartis en **25 espèces** sur les **71 espèces de départ** (plus *Indéterminés*). Enfin, pour des questions visuelles, d'allègement du traitement et pour les besoins de l'analyse factorielle, seules 5 variables ont été gardées sur le jeu de données de départ :

- **Site** : 8 modalités
- **Taxon** : 25 modalités
- **Altitude** : 4 modalités, classées de la manière suivante :
 - B : Entre 0 et 340 m
 - M : Entre 340 et 520 m
 - H : Entre 520 et 660 m
 - T : Au delà de 660 m
- **Pente** : 8 modalités, classées de la manière suivante :
 - 0° : Pente faible comprise entre 0 et 2.5° (4.37%)
 - 2,5° : Pente faible comprise entre 2.5° et 5° (8,75%)
 - 5° : Pente moyenne comprise entre 5° et 10° (17,63%)
 - 10° : Pente moyenne comprise entre 10° et 15° (26.79%)
 - 15° : Pente forte comprise entre 15° et 20°(36,4%)
 - 20° : Pente forte comprise entre 20° et 25° (46.63%)
 - 25° : Pente très forte comprise entre 25° et 30° (57.75%)
 - >30° :Pente très forte supérieur à 30° (max 138.65% ou 54,2°)
- **Taille diamétrique** : 4 modalités (IFN)

Deux analyses seront réalisées (Package FactomineR) . Il s'agira pour la première d'une AFC, comme celle effectuée en 2016 par Aurélien BESNARD pour le CEFE de Montpellier. La base ayant évolué tant par l'apurement que par l'ajout de nouvelles données, il semblait donc nécessaire de relancer la même analyse. Enfin, il s'agira d'effectuer une AFDM dans

un second temps.

- L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) qui s'effectuera sur le tableau de contingence des variables *Site* et *Taxon* (Les variables *Pente* et *Taille* resteront en variables supplémentaires). Il s'agit donc d'un tableau à double entrée (Taxon/Site) avec les effectifs croisés (tel un tableau de croisée dynamique). L'analyse se porte sur le poids des modalités de chaque variable en analysant la variance expliquée (l'inertie).
- Une Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM) sera réalisée. Il est vrai que dans le cas de notre jeu de données, nous possédons plusieurs variables avec de nombreuses modalités (notamment la variable *Taxon*), ce qui, dans le cas d'une analyse factorielle, dissipe davantage l'inertie du fait du grand nombre de dimensions (2). En effet, l'analyse se porte cette fois-ci sur un tableau disjonctif complet, avec en double entrée le couple Individus/Modalités. Comme pour l'AFC, du fait de la sensibilité des analyses factorielles pour les modalités faiblement représentées (espèces rares), le même tableau à l'origine a été utilisé afin d'obtenir une image globale du dispositif.

L'avantage de cette analyse est qu'elle permet l'intégration de plus de 2 variables qualitatives, mais également l'intégration de variables quantitatives. Bien souvent, il est nécessaire de grouper les données quantitatives en classes pour les intégrer dans une ACM (Analyse des Correspondances Multiples). Or, avec l'AFDM on conserve l'information originale, et on combine donc l'analyse factorielle (ACM) sur les données qualitatives (Taxon, Site), avec l'analyse en composante principale (ACP) sur les données quantitatives (Diamètre, Pente, Altitude). Il n'y aura donc pas de variable supplémentaire, mais uniquement des variables actives.

Autre avantage, l'AFDM permet de visualiser le nuage de points de tous les individus sur des plans factoriels, et non pas seulement les variables, contrairement à l'AFC.

Enfin dernier avantage, l'analyse sur les individus permet d'utiliser un autre outil permettant de gérer les données manquantes, ici les indéterminés, grâce au package "**missMDA**" (FactomineR). Cet outil prend en compte à la fois les ressemblances globales entre individus et les liaisons entre variables. L'algorithme utilisé, dit "ACP Itérative régularisé", va compléter le tableau de données originales par des valeurs qui n'ont pas d'influence sur le résultat de l'ACP par imputation par la moyenne. En d'autres termes, les valeurs imputées (*Taxon*) n'apportent pas d'information et ne modifient pas l'analyse, mais cela permet de conserver et d'analyser le reste de l'information existante de ces indéterminés (*Site, Taille, Pente, Altitude*).

Ces deux analyses ont donc pour objectif d'explorer les communautés (variables qualiti-

tatives) en les transformant en variables quantitatives et de faire émerger des correspondances entre modalités actives sur des plans factoriels. La comparaison des deux analyses permettra d'observer si des similitudes ou différences s'observent.

Classification

A la suite des analyses factorielles, il sera possible d'y attribuer une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), fonctionnant sur un calcul de distance par le critère de Ward (implémenté dans la fonction HCPC() de FactomineR) et de voir des tendances au regroupement. Dans le cas de l'AFDM, la classification étant moins stable que sur une AFC, un renforcement par l'algorithme de partitionnement *K-means* sera utilisé. Bien que cette méthode perd l'information de classe à l'origine (c.a.d les individus ou les numéros d'arbres), celle-ci permet de consolider la classification et d'améliorer l'émergence de tendance au regroupement par classe. Et c'est ce qui nous intéresse ici, c'est-à-dire, est-ce que l'ajout de variable explicative supplémentaire (ici la pente) augmente le nombre de classe en comparaison à l'AFC, et donc témoigne de processus sous-jacents supplémentaires ?

2.3.3 Tester et Modéliser

Dynamiques

Il sera question ici de présenter les premiers résultats d'évolution des accroissements sur tous les sites. En effet, toutes les placettes (sauf Jules) ont été inventoriées à 3 reprises, ce qui nous permet de comparer 2 périodes d'accroissements successives. Chaque accroissement sera pondéré par le delta de temps précis entre chaque inventaire. Puisqu'il s'agit de la variable à expliquer principale de ce dispositif, un test de rang pourra être effectué pour savoir si une évolution significative est observée (accélération ou ralentissement de l'accroissement).

Il sera également intéressant de pondérer une nouvelle fois ces accroissements par les surfaces terrières. Autres points d'exploration, la mortalité et le recrutement y seront également traités.

Analyse spatiale

N'étant pas l'objectif de ce rapport, cette partie sera traitée en discussion avec une présentation d'un résultat obtenu avec le package spatstat, grâce à l'analyse d'agrégation par la fonction K de Ripley sur le site de Bains-Jaunes. Il sera davantage question d'illustrer les possibilités qu'offre la spatialisation du dispositif.

L'objectif principal de cette première approche est de déterminer si les arbres (sans distinction d'espèces) se disposent aléatoirement dans l'espace ou non. Comprendre les patterns de points (motifs de points), c'est à dire la disposition des arbres entre eux, est essentiel dans l'analyse de la dynamique forestière.

Chapitre 3

Résultats

3.1 Descriptions des placettes et de la population étudiée

3.1.1 Visualisation topographique des placettes

Dans le chapitre précédent, on a expliqué comment le travail de spatialisation précis des placettes nous permettrait d'ouvrir la porte à des analyses spatiales plus poussées en associant d'autres variables grâce à de nouveaux outils (LIDAR, station météo locale...). En amont, il paraît intéressant de visualiser et interpréter graphiquement les caractéristiques spatiales de chaque placette.

Grâce au package `sf` (R) et en utilisant le MNT(1m) de l'IGN, il était possible de passer d'un fichier raster à un fichier maillé proche du m^2 , c'est-à-dire d'intégrer dans chaque m^2 de chaque placette une valeur *Altitude* et une valeur *Pente* (en °), rendant possible la visualisation des distributions de densité pour chacun de ces paramètres. On peut également rendre compte de ces données sous forme de tableau.

TABLE 3.1: Synthèse topographique des placettes

Site	<i>Altitude (m)</i>				<i>Pente (en °)</i>			
	Moyenne	Ecart-type	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Bains-Jaunes	825.8	7	810.3	844.8	13.8	5.3	1.3	34.5
Bras-David	249	3.4	240.1	255.9	7.2	3.7	0.1	25.6
Carbet	606.4	9.1	587.4	626	17.3	3.9	1.3	33.5
Choisy	314.5	10.2	291.5	340.1	25.7	5.9	0.5	51.7
La Digue	485.5	9.8	473.9	521.5	16.3	10.1	0.1	54.3
Moscou	627.2	17.8	589.8	660.3	25.4	4.1	10.3	53.4
Pointe Noire	494.6	15.7	465.6	528.8	26.5	9.8	0.6	64.9
Quiock	429	7.3	413.3	451.9	14.7	5.8	0.1	37

Distribution des altitudes en densité pour chaque placette

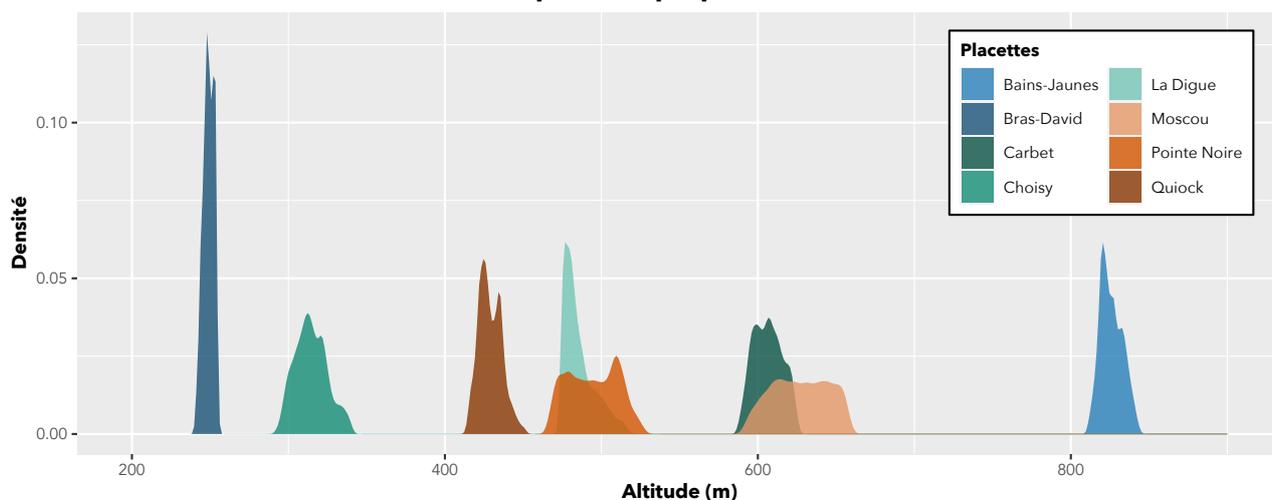


FIGURE 3.1: Distribution altitudinale au sein du réseau

Distribution en densité de la pente pour chaque placette

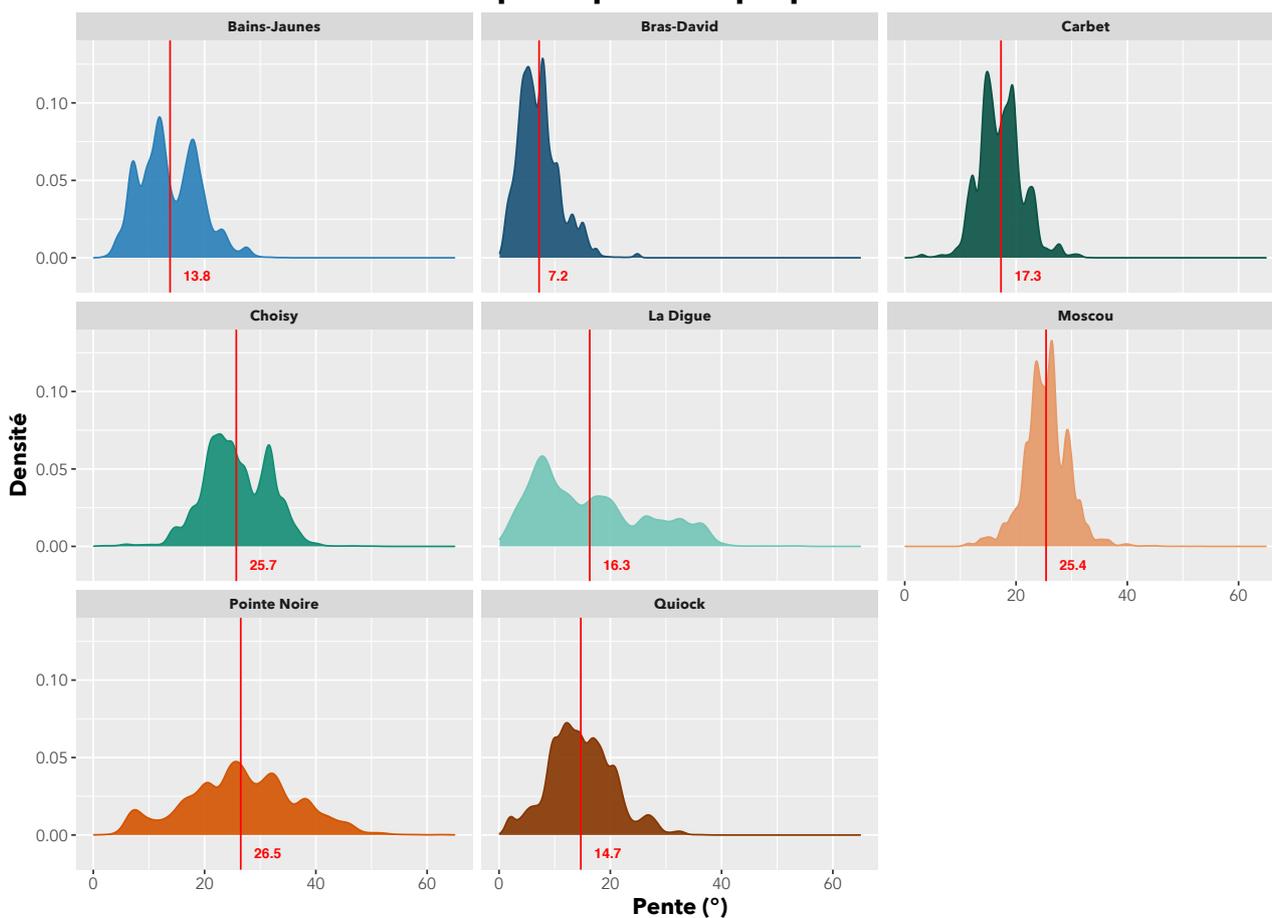


FIGURE 3.2: Distribution topographique au sein du réseau

Bien que le travail de terrain permet de se donner une idée rapide de la topographie *in situ*, la visualisation graphique et chiffrée permet clairement de décrire chacune des placettes et de les distinguer. Sur la figure 3.1, on observe 4 groupes de placettes en terme d'altitude :

1. **Bras-David / Choisy** (240 m - 340 m)
2. **Quiock / Pointe-Noire / La Digue** (410 - 520 m)
3. **Carbet / Moscou** (585 - 660 m)
4. **Bains-Jaunes** (Au-delà de 800 m)

Ce qui est intéressant avec la distribution en densité du paramètre *Altitude*, c'est qu'il permet assez rapidement de distinguer le caractère plat ou pentu d'une placette. Or, toujours sur la figure 3.1, on remarque que pour les 3 premiers groupes, on retrouve différents types topographiques de placette. Bras-David est clairement un plateau, la quasi-totalité de la distribution se focalise aux environs de 250 m avec un écart type de 3,4 m. Pour rappel, chaque placette est étudiée sous forme d'un maillage d'environ 10 000 mailles (ou m^2). En comparaison, Choisy avec des altitudes voisines (groupe 1), montre une distribution totalement différente, témoignant d'une topographie nettement plus pentue et répartie sur toute la placette. Autrement dit, sur la figure 3.1, plus la densité est large sur l'axe des abscisses, plus la pente est forte, et plus la densité est étroite sur l'axe des abscisses, moins la pente est forte.

Si l'on regarde le groupe 2, on retrouve 2 profils différents, avec Pointe-Noire représenté par une distribution étalée en comparaison de Quiock et La Digue. Pour le groupe 3, on distingue 2 profils, avec Moscou qui a une amplitude altitudinale très élevée, avec une distribution deux fois plus étendue que Carbet. Sur le tableau 3.1, on voit que sur une longueur potentielle de 141 m, c'est à dire la diagonale centrale de la placette correspondant à la distance linéaire maximale au sein d'une placette de 1 hectare, la placette de Moscou a un dénivelé de 70 m !

Le tableau 3.1 et la figure 3.2 rentrent plus en détail en prenant cette fois-ci la pente comme paramètre. Ce paramètre permet en partie de vérifier l'analyse du paragraphe précédent. Des écarts importants s'observent avec par exemple, Pointe-Noire et Bras-David. Pointe-Noire possède une moyenne de $26,5^\circ$ et un écart-type de $9,8^\circ$. On retrouve donc sur Pointe-Noire de nombreuses zones inclinées à plus de 30° (voir figure 3.3). Pour donner une idée, cela correspond à une pente de 70% !

Cependant, il faut faire attention entre le tableau 3.1 et la figure 3.2 car une pente extrême sur une faible distance n'aura pas d'impact sur le dénivelé et ne rendra pas bien compte de l'aspect général de la topographie de la placette. C'est pour cela que la figure 3.2 décrit de manière plus précise les placettes.

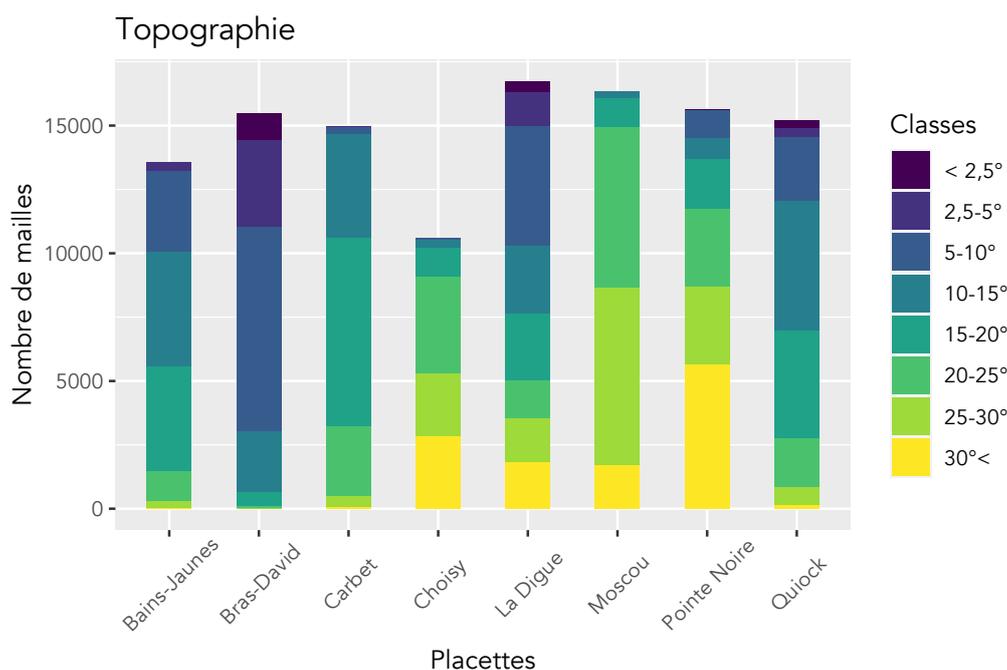


FIGURE 3.3: Synthèse topographique par placette

La figure 3.4 permet cette fois-ci de localiser ces pentes et donc de visualiser l'orientation du dénivelé des placettes de manière précise (et de localiser l'orientation des numéros de placeaux par la même occasion). On remarque d'ailleurs que les dénivelés de la figure 2.3 et ceux de la figure 3.1 diffèrent assez fortement. Ceci s'explique par la présence de fossés ou ravines à l'intérieur des placettes qui augmente le dénivelé mesuré en amont (Quiock et Moscou notamment).

Maintenant que nous possédons chaque pattern topographique pour chaque placette (figure 3.4 ci-dessous), il sera très intéressant de se focaliser sur l'influence de ces paramètres sur les communautés en place et les dynamiques individuelles.

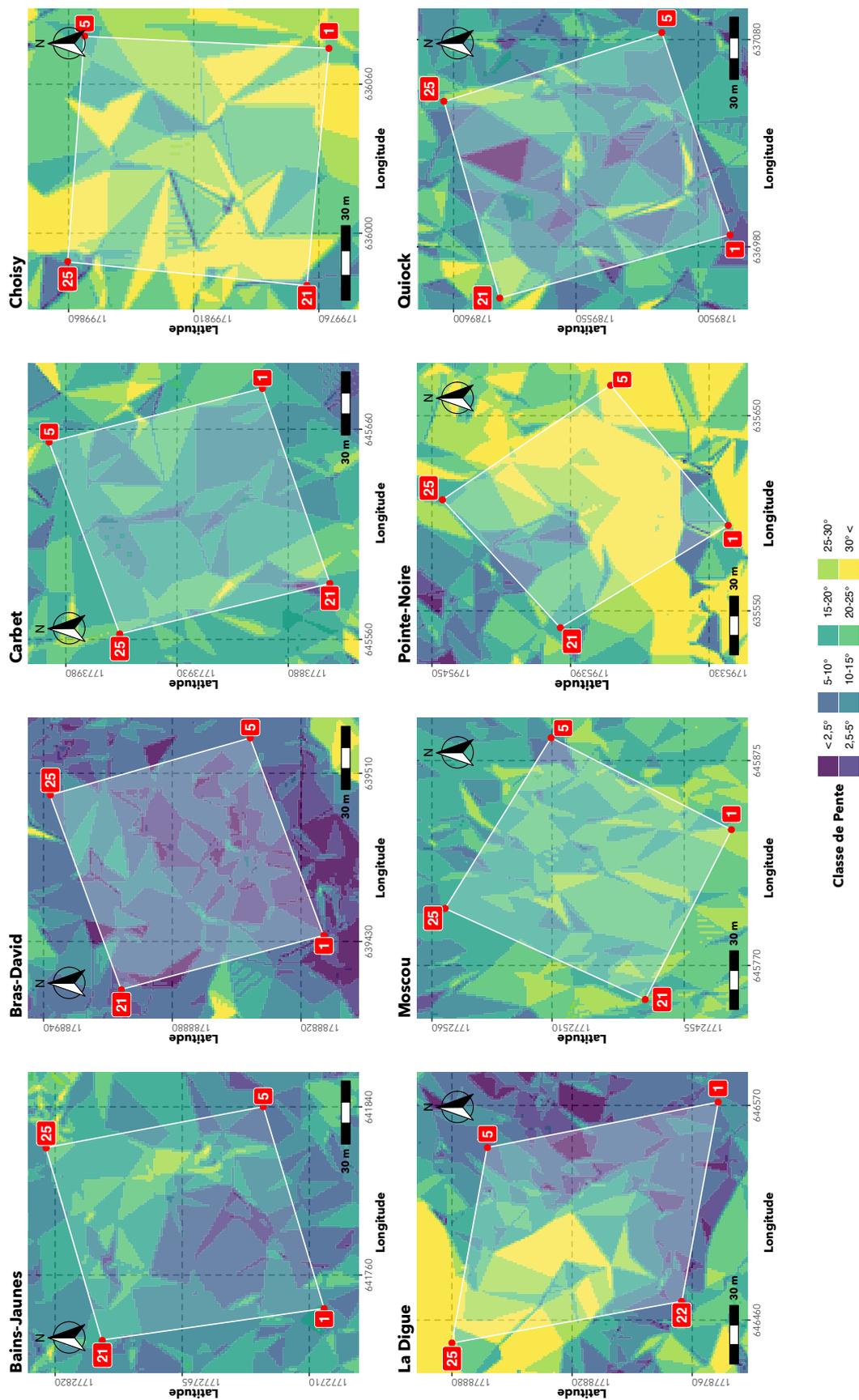


FIGURE 3.4: Visualisation des classes de pentes par placette

3.1.2 Description du peuplement

Répartition des espèces et familles botaniques

Avec ses 70 espèces, le dispositif se compose d'un nombre important d'espèces, réparties en 34 familles.

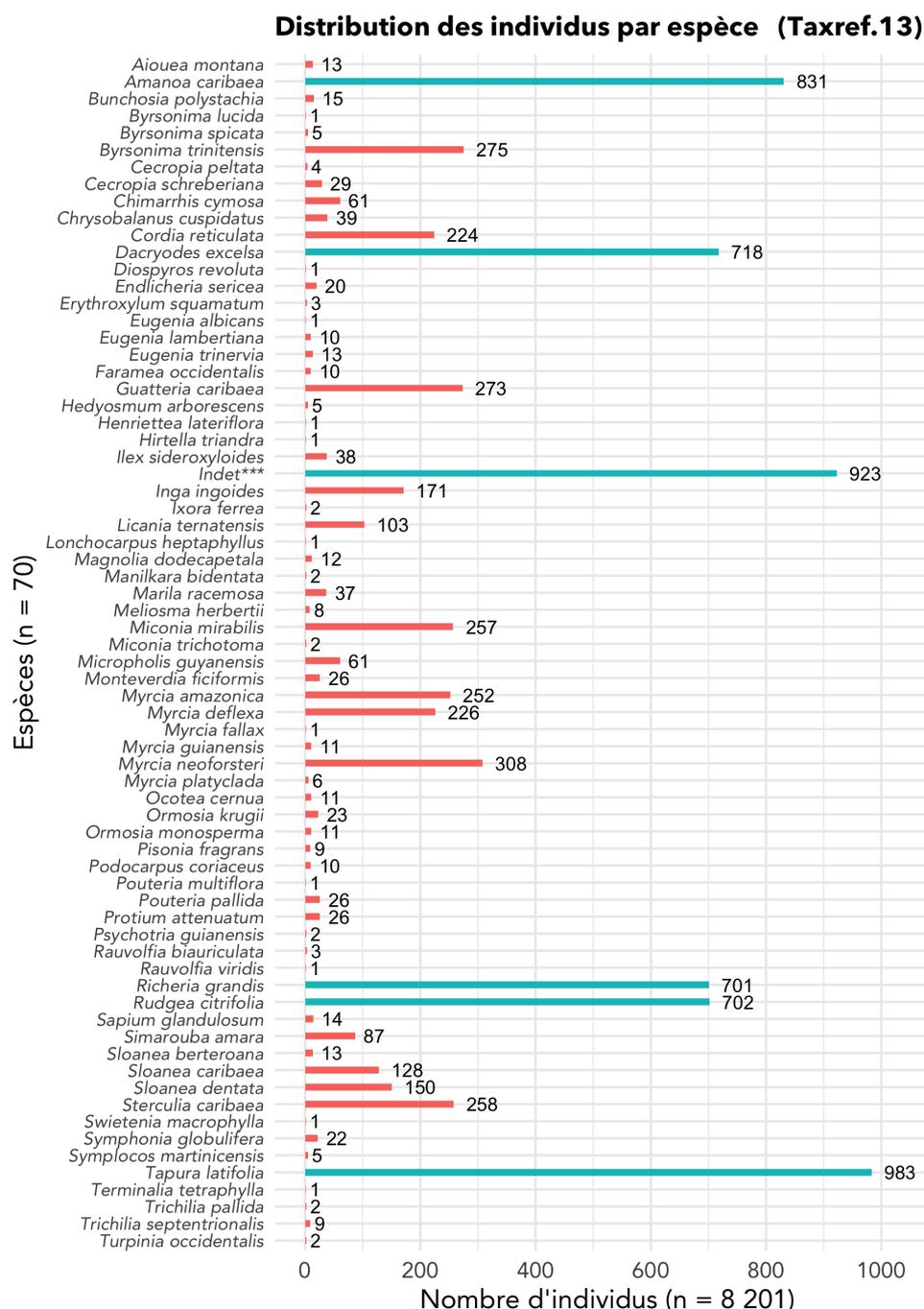


FIGURE 3.5: Distribution des individus par espèce

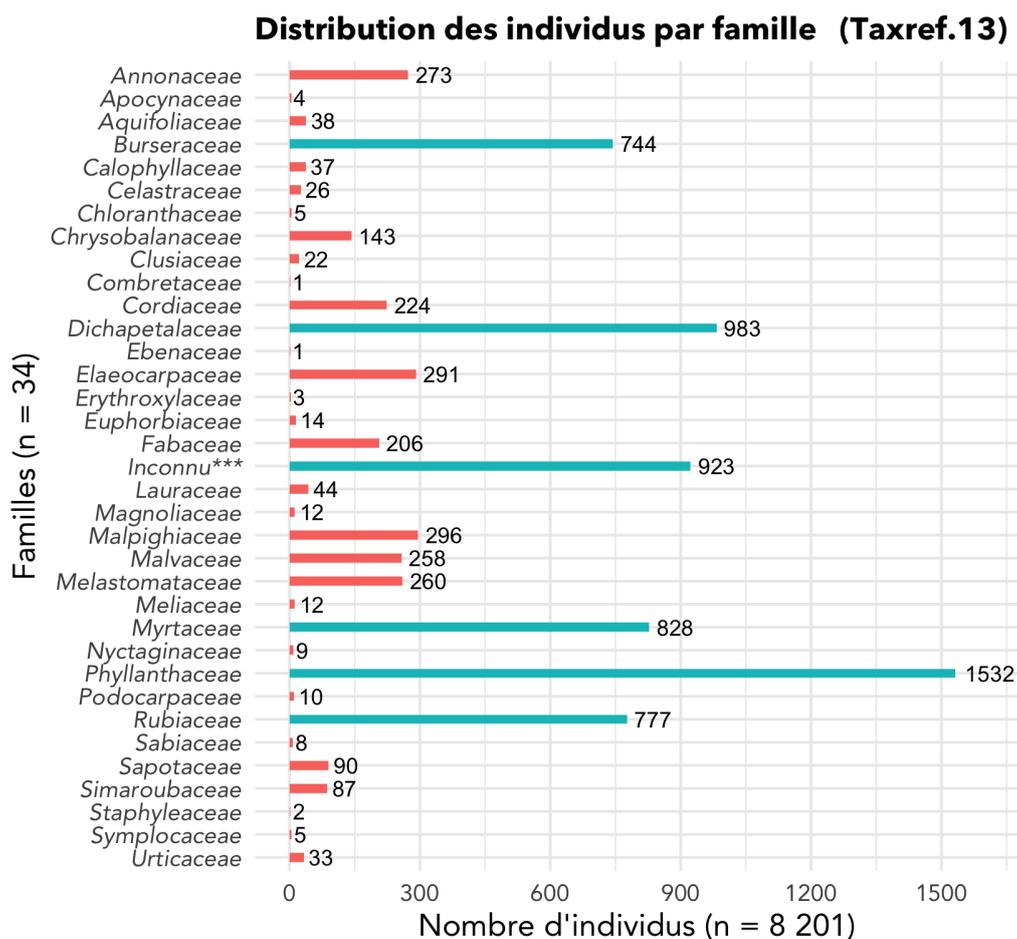


FIGURE 3.6: Distribution des individus par famille

D'un point de vue réglementaire, 2 espèces sont protégées : *Myrcia neoforsteri* et *Meliosma herbertii*. Concernant l'UICN, une seule espèce est classée **Vulnérable** : *Henriettea laterifolia* et 15 espèces sont de biogéographie de type subendémique.

UICN	CR	EN	VU	NT	DD	LC	
Guadeloupe				1	7	2	58
Dont :							
- Martinique		4	2	3			
- Mondiale			1	3		1	16
							Total
							68
BIOGEOGRAPHIE	CR	EN	VU	NT	DD	LC	
Sub-endémique				1	1		13
							Total
							15
STATUT	Guadeloupe	Martinique	Antilles				
Protection	1	1	1				
Introduit	1						

FIGURE 3.7: Statuts réglementaires des espèces au sein du dispositif

Il est important de souligner que plusieurs des espèces du dispositif disposent d'un statut fort en Martinique avec notamment 4 espèces en **Danger Critique (CR)** (*Byrsonima triniten-*

sis, *Protium attenuatum*, *Myrcia platyclada* et *Sloanea berteriana*), 2 espèces en **Danger (EN)** (*Myrcia amazonica* et *Terminalia tetraphylla*) et 3 espèces en **Vulnérable (VU)** (*Aiouea montana*, *Eugenia trinervia* et *Hirtella triandra*).

Autre représentation intéressante de ce peuplement, la proximité taxonomique entre les espèces par rapport à leur genre et leur famille botanique. Grâce au package Phylomaker (8) reposant sur les travaux de Smith et Brown (2018) (19), il est désormais possible de générer des arbres phylogénétiques spécifiques aux plantes vasculaires. Bien évidemment, cette représentation ne se veut pas d'être certaine, car l'immense base actuelle est en perpétuelle évolution, mais elle permet d'avoir une idée globale des proximités potentielles entre espèces au sein du dispositif.

Sur les deux pages suivantes, nous observons deux possibilités de représentation, la dernière permettant davantage l'observation des groupes taxonomiques selon la distance de découpage.

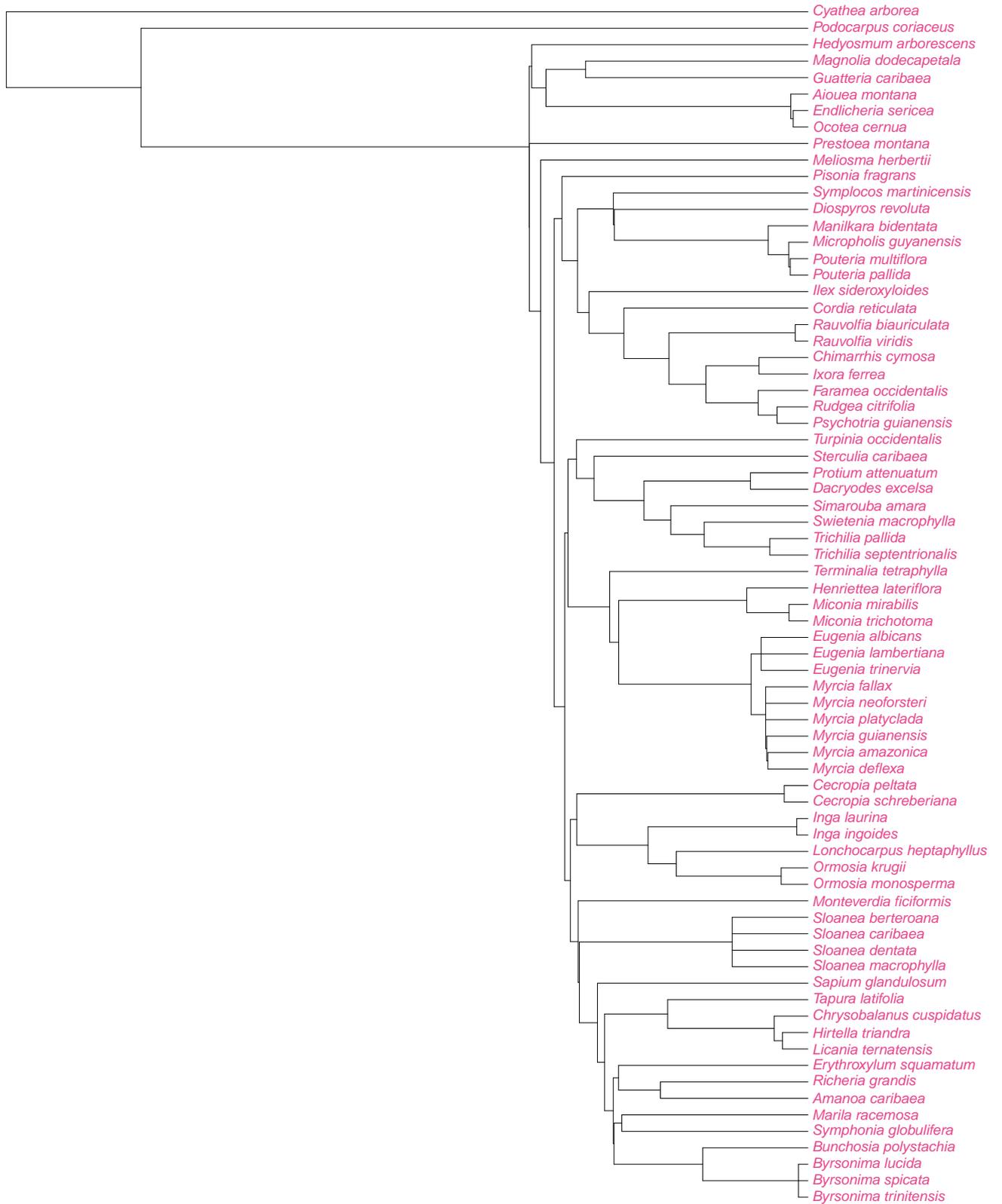


FIGURE 3.8: Phylogramme des espèces au sein du dispositif

3.1.3 Diversité

Courbe d'accumulation d'espèces

En 2009, au cours d'un atelier (6), il avait été préconisé d'établir la courbe aire/espèces afin de définir l'aire minimale des placettes. Mais dans notre cas cet outil n'est pas adapté car il n'y a pas de plafond dans des milieux très riches. En effet, les milieux sont compactés sur de très petites surfaces (gradients altitudinaux notamment), et il n'existe pas de zones homogènes suffisamment vastes pour permettre de définir une aire minimale. On le remarque sur les courbes d'accumulation d'espèces de la figure 3.10 ci dessous.

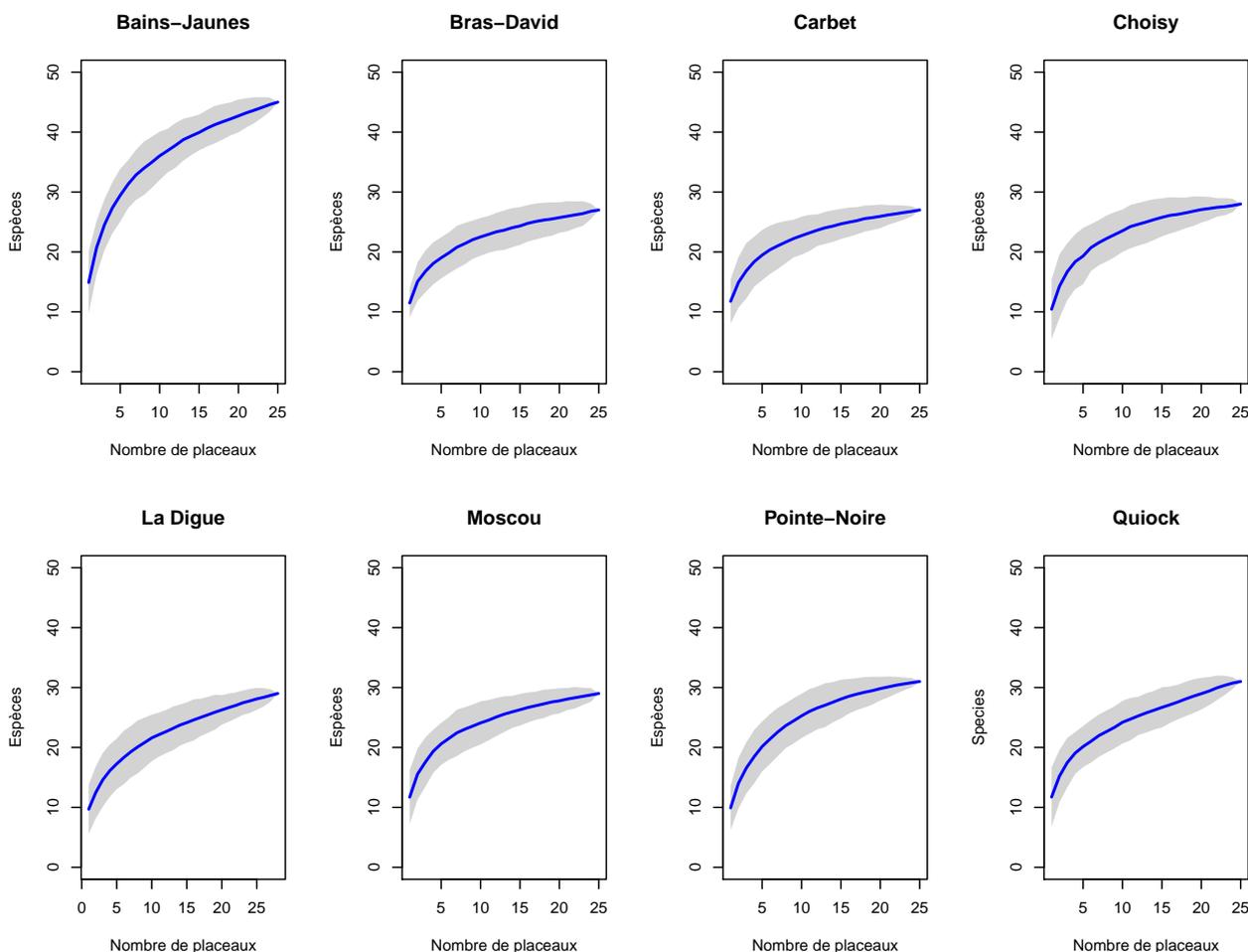


FIGURE 3.10: Courbe d'accumulation d'espèce par placette

Aucune des placettes ne semble parvenir à un seuil, ce qui corrobore les affirmations de l'atelier de 2009. Ces courbes donnent une idée des richesses locales, la diversité α . Si cette fois-ci on mesure cette même courbe en fonction du nombre d'individus échantillonnés, on remarque encore une fois que le seuil n'est pas atteint (figure 3.12).

Eric Marcon dans son manuel "Mesures de la Biodiversité" (10), explique également comment décrire de manière neutre cette diversité.

Richesse site	Bains-Jaunes	Bras-David	Carbet	Choisy	Jules	La Digue	Moscou	Pointe Noire	Quiock
	44	26	26	27	29	28	28	30	30

FIGURE 3.11: Richesse spécifique par placette

Richesse spécifique

Cette discipline très complexe, demande un travail à part entière mais nous pouvons tout de même utiliser quelques outils¹ pour caractériser notre richesse S . L'Indice α de Fisher (à ne pas confondre avec la diversité α) est souvent cité et permet de relier le nombre d'espèce S au nombre d'individus échantillonnés. Il s'agit d'un indicateur de biodiversité qui estime le nombre d'espèces nouvelles quand le nombre d'individus échantillonnés augmente de manière exponentielle. Dans son manuel, ce modèle semble adapté à des dispositifs avec de très grands nombres d'espèces et d'individus (Paracou, BCI).

L'autre solution concerne les estimateurs non paramétriques, Chao et Jackknif qui peuvent être intéressants sur notre jeu de données. Ces estimateurs estiment cette fois-ci le nombre d'espèces non observées, connaissant la richesse spécifique ($S = 70$ sp). Ces analyses se font bien sûr sans les indéterminés et son pool d'espèces potentiellement nouvelles.

L'estimation la plus basse (Package SPECIES) présente un potentiel de 82 espèces, soit 11 supplémentaires. L'estimation la plus élevée correspond à l'indice de Chao avec 92 espèces (Package VEGAN).

En imaginant une identification botanique du dispositif à 100 % (indéterminés compris), dont la richesse potentielle actuelle est estimée *a minima* à 82 espèces sur 8 ha inventoriés (0.03 % de la FDH), on peut raisonnablement penser que la forêt dense humide de Guadeloupe, avec ses 28 158 ha, réserve un pool de meso-macrophanérophyte² proche des 100 espèces.

1. Package "untb", "vegan" "SPECIES"

2. C. Raunkjær, The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography, being the collected papers of C. Raunkjær., Oxford University Press, 1934, p. 2-104.

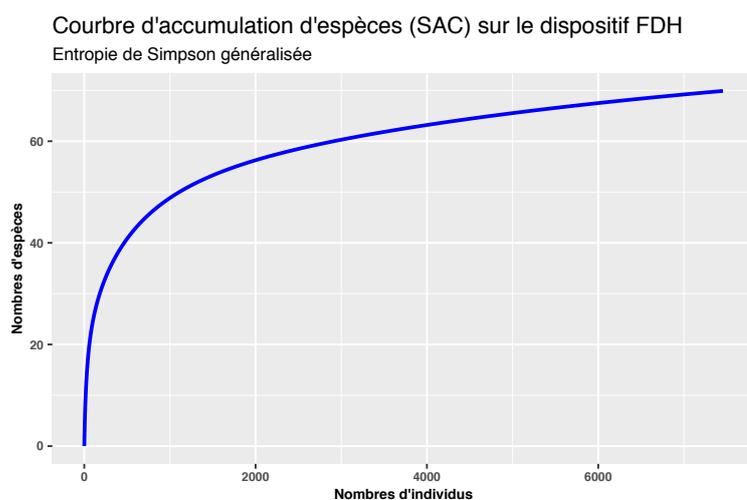


FIGURE 3.12: Effort d'échantillonnage du dispositif

```

##### VEGAN Package #####
> specpool(donnee)
  Species   chao   chao.se   jack1 jack1.se   jack2   boot   boot.se n
All       71  92.51111 12.32543 90.55556 13.64814 100.8611 79.89732 7.615703 9

##### SPECIES Package #####

> jackknife(AbdFreqCount(Ns))

Your specified order is larger than that determined by the test,
Therefore the order from the test is used.

$JackknifeOrder
[1] 1

$Nhat
[1] 82

$SE
[1] 4.690416

$CI
      lb ub
[1,] 73 91

```

FIGURE 3.13: Estimateurs de la richesse spécifique S

Indice de Shannon, Simpson et Pielou

L'indice de Simpson peut être interprété comme la probabilité que deux individus tirés aux hasard soient d'espèces différentes. Il est donc un bon indicateur de diversité. Ici on obtient sur le dispositif une probabilité élevée de 0,93, témoignant d'un dispositif riche.

```

## INDICE SIMPSON ##
> Ps <- as.ProbaVector(Ns)
> Simpson(Ns)
      None
0.9284304

## INDICE SHANNON ##
> Shannon(Ns)
UnveilJ
3.043966

## INDICE PIELOU ##
> Pielou <- H/log(S)
      None
0.712216

```

FIGURE 3.14: Indices de diversité

L'indice de Shannon (H) donne quant à lui une mesure de la biodiversité en tant que quantité d'information (l'entropie). Ici on obtient une valeur $H = 3,04$. En sachant que la valeur maximale de l'indice de Shannon est égale à $\ln(S)$ soit $H_{max} = 4,26$. Cette valeur maximal correspond à une distribution parfaitement régulière des individus au sein des espèces.

L'indice de Pielou (J) est un indice d'équitabilité qui correspond au ratio $\frac{H}{H_{max}}$. Celui-ci est égale à $J = 0,71$ et atteste d'une répartition régulière dans l'ensemble.

3.1.4 Structure du peuplement

Densité, taille, surface terrière et distribution diamétrique

Bien qu'une représentation des classes diamétriques sera faite par la suite, il semblait intéressant de représenter synthétiquement le dispositif avec un résumé de 3 niveaux d'informations pour chaque placette (la classe de taille, la densité et la surface terrière). Telle une carte d'identité du dispositif si l'on peut dire.

La figure ci-dessous permet de visualiser en un coup d'œil les différences structurelles des placettes. C'est le cas notamment entre Pointe-Noire et Carbet, qui possèdent des densités qui vont du simple au double, mais qui révèle pourtant une surface terrière quasi-identique. L'information apportée par le type de classes de taille diamétrique permet de donner un élément d'explication avec un apport très fort des gros arbres même peu nombreux comme dans le cas de Pointe-Noire. Pour donner un ordre d'idée, la catégorie TGB comprend pour Bains-Jaunes 18 individus, pour Choisy 19 individus, pour la Digue 33 individus et pour Pointe-Noire 25 individus. Cela signifie donc que pour Pointe-Noire, un quart de la surface terrière s'explique par seulement 4 % des arbres de la placette !

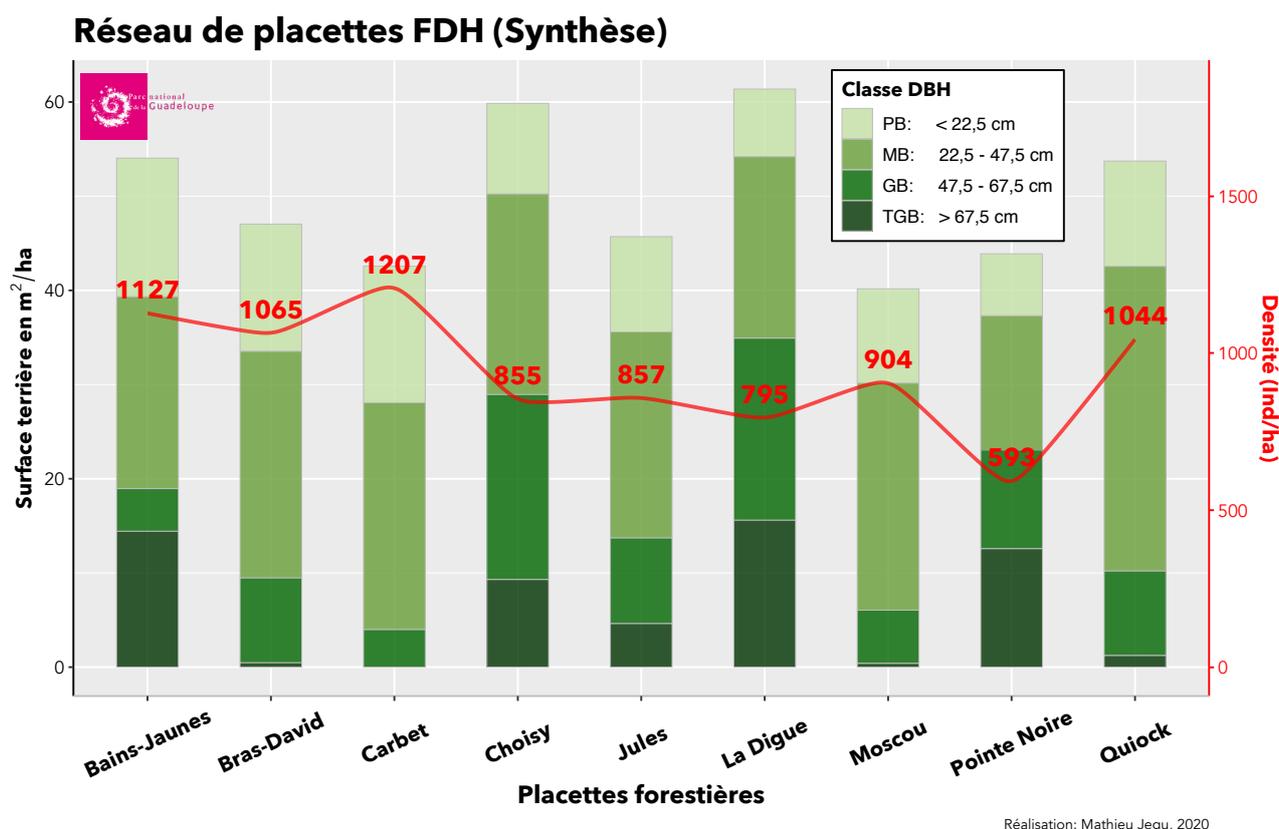


FIGURE 3.15: Comparaison entre densité et surface terrière au sein du dispositif

Si l'on prend l'ensemble des placettes, elles ont quasi-toutes des différences notables. Seuls les couples Bras-David/Carbet et La Digue/Choisy semblent être très proches structu-

rellement. Le tableau suivant permet de visualiser en détail la répartition des individus par classe de taille et donc leurs poids respectifs.

TABLE 3.2: Individus par classe de diamètre

Site	PB	MB	GB	TGB
Bains-Jaunes	794	296	19	18
Bras-David	718	308	38	1
Carbet	853	336	18	0
Choisy	513	243	80	19
La Digue	429	245	88	33
Moscou	587	291	25	1
Pointe Noire	360	164	44	25
Quiock	591	410	40	3
Jules	551	260	36	10

Concernant les surfaces terrières, elles sont très élevées, avec pour maximum La Digue³ avec plus de 60 m²/ha. Moscou se révèle être la placette la plus faible avec 40 m². A titre de comparaison, la moyenne nationale pour la forêt publique de métropole s'élève à 21,7 m²/ha (IFN, 2008).

Afin d'analyser les structures, il était important de diviser les diamètres par type de taille (les 4 classes de l'IFN). Pour analyser visuellement les circonférences, une division en classe égale est généralement utilisée.

Ci-dessous, un choix différent a été fait en représentant les diamètres non pas par classe (typiquement par tranche de 5 ou 10 cm), mais par densité. En effet, les classes de tailles sont souvent arbitraires et peuvent parfois mener à de fausses interprétations. Ici, tout est représenté par proportion avec des échelles d'axes identiques. Les lignes verticales rouges correspondent aux moyennes de diamètre. Toutes les placettes suivent globalement la même distribution avec une prédominance d'arbres de moins de 20 cm de diamètre. Seules les placettes de La Digue et Quiock présentent une courbe plus aplaniée témoignant d'une plus forte proportion en arbres plus âgés.

Enfin, on peut aussi remarquer que Bains-Jaunes et Carbet ont les plus fortes proportions d'arbres de moins de 20 cm mais également les plus faibles concernant les arbres de plus de 40 cm. L'effet altitude peut être une cause de ces structures.

3. Cette placette étant plus grande que les autres d'environ 1 000 m², une correction a été effectuée pour ramener le résultats à l'hectare

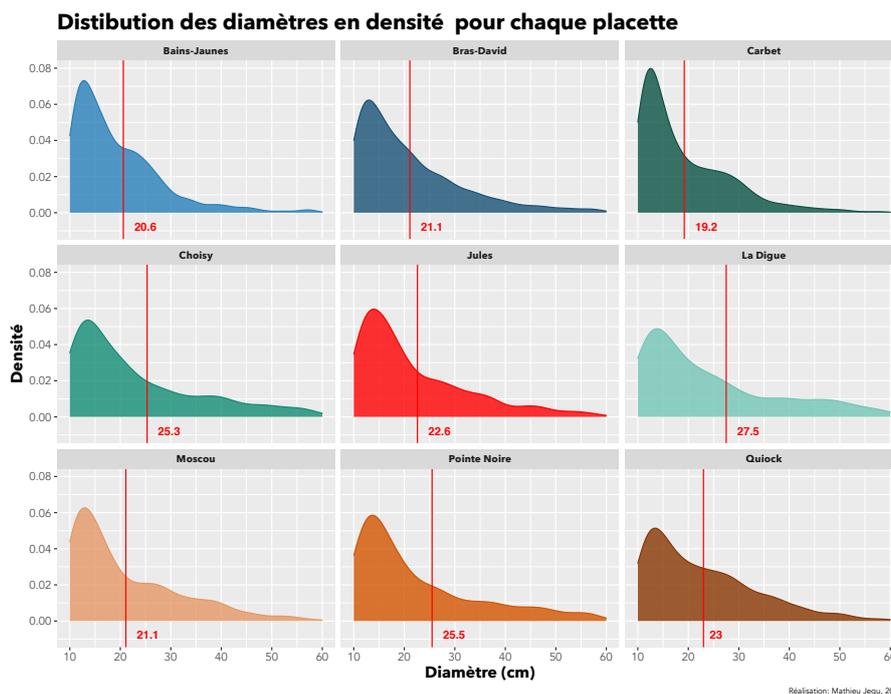
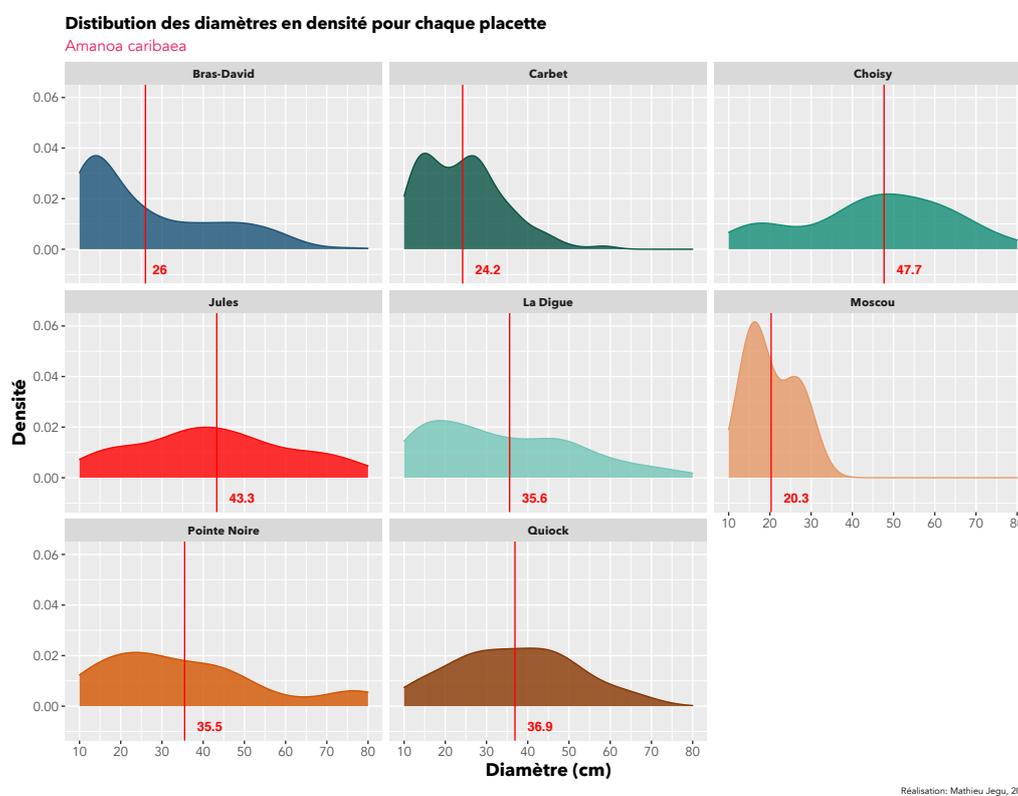


FIGURE 3.16: Distribution des diamètres par placette (M.Jegu, 2020)

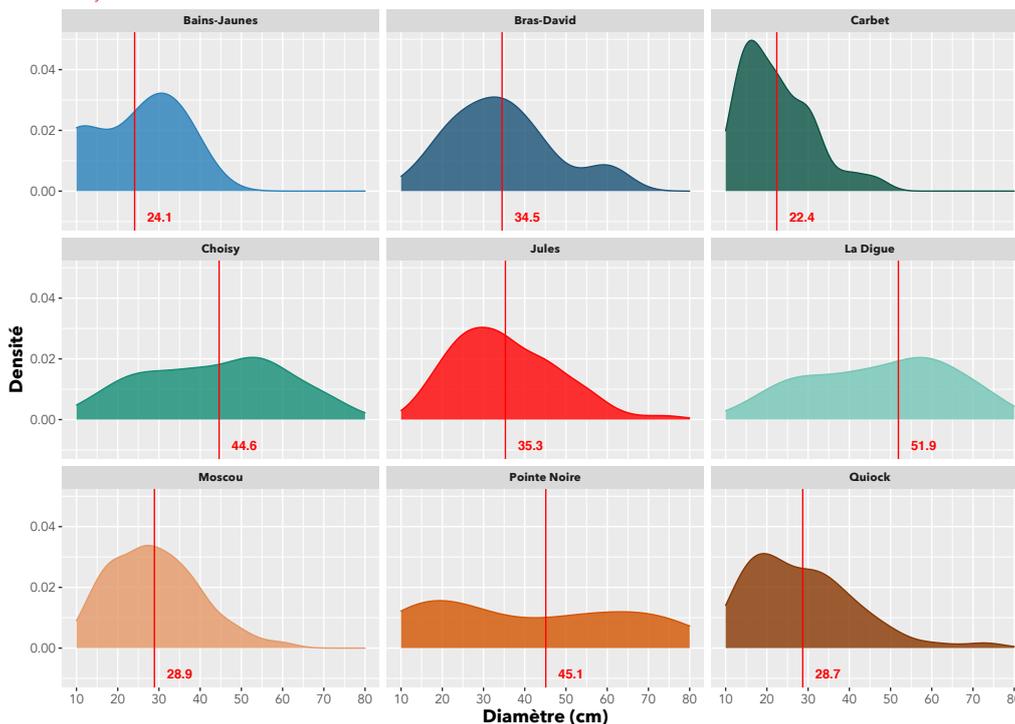
Si désormais on regarde plus particulièrement les quatre espèces dominantes selon les placettes, on obtient des distributions bien différentes (Figure 3.17 ci-dessous)



(a) *Amanoa caribaea*

Distibution des diamètres en densité pour chaque placette

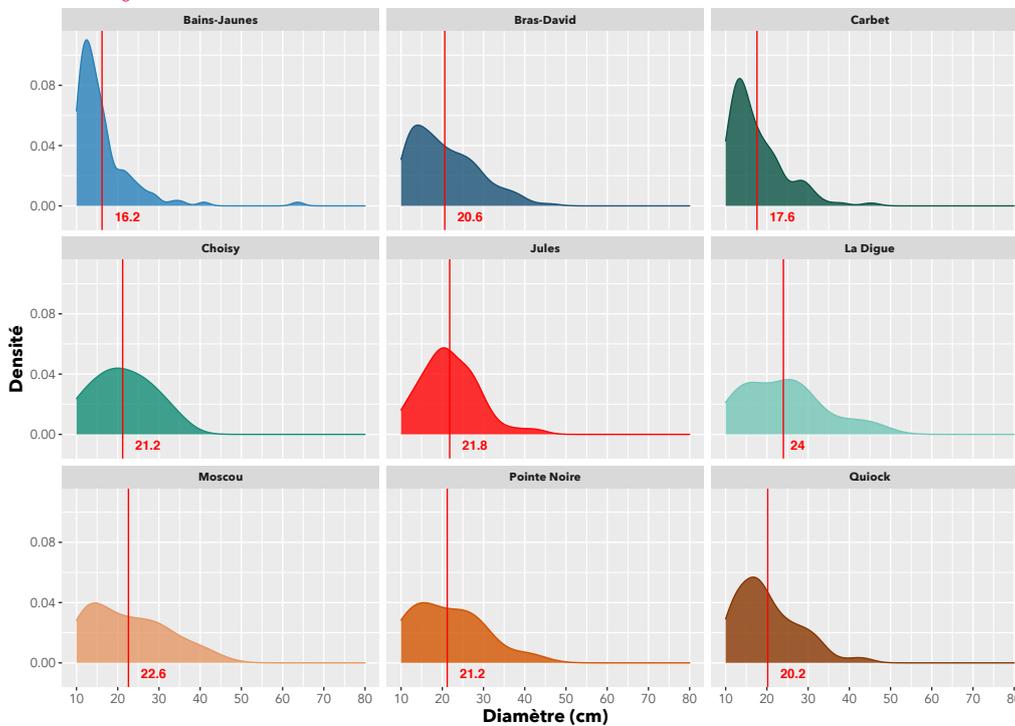
Dacryodes excelsa



(b) *Dacryodes excelsa*

Distibution des diamètres en densité pour chaque placette

Richeria grandis



(c) *Richeria grandis*

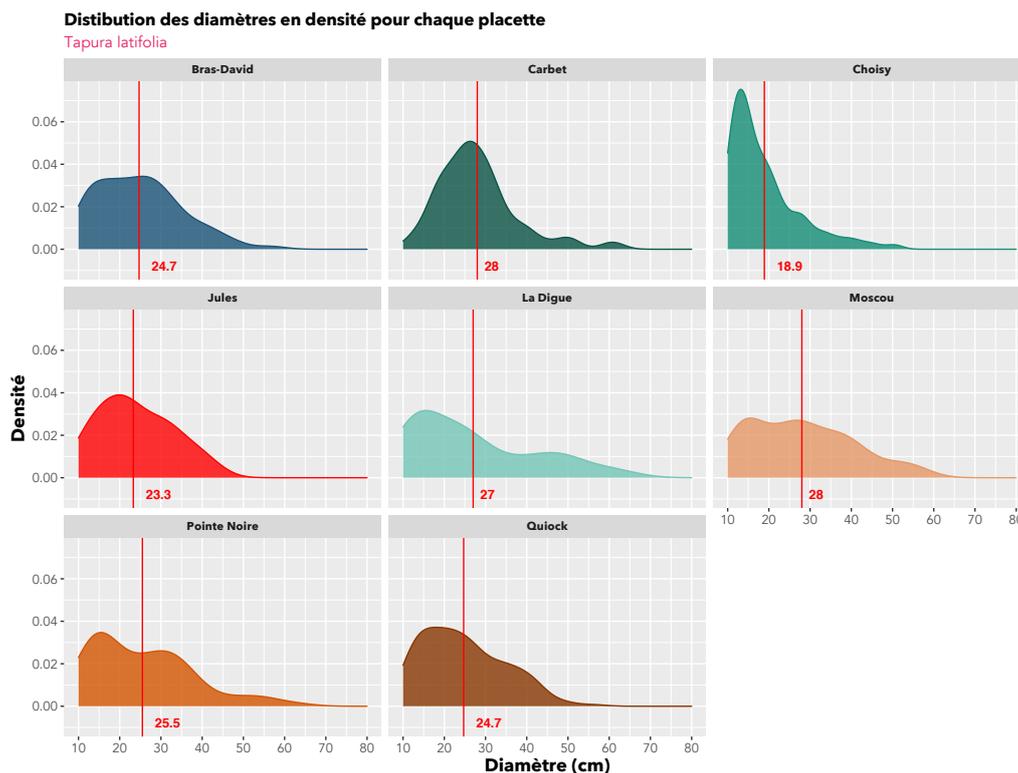
(d) *Tapura latifolia*

FIGURE 3.17: Distribution diamétrique pour quatre espèces et par placette

Si l'on commence par la figure 3.17 - a, on remarque deux patterns pour *Amanoa caribaea*. Carbet et Moscou possèdent une distribution avec un mode aux environs de 20 cm de diamètre. Les distributions de toutes les autres placettes sont nettement plus aplanies et dévoilent un large éventail de diamètres représentés. Il s'agit de groupes distincts en terme d'altitude, avec d'un côté Carbet et Moscou, qui sont les deux placettes les plus élevées (au-delà de 600 m), et de l'autre côté, les placettes restantes entre 200 et 550 m. On remarquera la non-présence d'*Amanoa caribaea* sur la placette de Bains-Jaunes (800 m).

FIGURE 3.18: *Amanoa caribaea* (Source : Guezennec)

Sur la figure 3.17 - b, on retrouve ces deux patrons pour *Dacryodes excelsa*, avec cette fois-ci, Choisy, La Digue et Pointe-Noire avec une large amplitude contre des distributions modales pour les autres placettes. On peut supposer un facteur pente expliquant davantage ces distributions.

Sur la figure 3.17 - c, cette fois-ci toutes les distributions de *Richeria grandis* semblent suivre la même tendance. Deux particularités tout de même pour les placettes de Bains-Jaunes et Carbet qui laissent présager une nouvelle fois d'un effet d'altitude qui tend à diminuer l'accroissement cambial.

Enfin sur la figure 3.17 - d, on remarque une distribution de *Tapura latifolia* très contrastée entre Choisy et le reste des placettes. Le caractère limitrophe de la placette de Choisy sur l'emprise de la forêt dense humide peut potentiellement expliquer un effet bordure écologique avec une atmosphère et pluviométrie moins humide dans ce secteur. On remarquera la non-présence de *Tapura latifolia* sur la placette de Bains-Jaunes (800 m).



FIGURE 3.19: *Richeria grandis* en fructification (Bains-Jaunes)

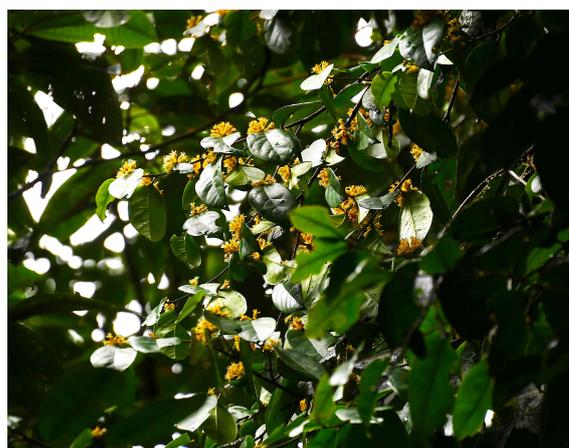


FIGURE 3.20: *Tapura latifolia* en floraison

Espèces dominantes du dispositif

Un peu à la manière de la figure 3.15, la figure 3.21 permet de mieux appréhender la structure globale du dispositif avec cette fois-ci, la structure taxonomique au sein du réseau. Grâce à cette représentation par site des 9 espèces les plus abondantes, on observe là aussi rapidement les divergences entre certains sites. Soit en terme de composition, Bains-Jaunes pour ne pas la nommer, soit en terme d'abondance d'individus. Par exemple, Moscou et Carbet sont géographiquement proches mais possèdent une divergence forte dans l'abondance en *Amanoa caribaea* (Bois rouge).

Pour le *Richeria grandis* (Marbri), les effectifs se concentrent principalement sur les placettes de Bains-Jaunes, Bras-David, Carbet et Quiock. Ces placettes sont relativement éloignées au sein du réseau. Or sur la figure 3.3, il s'agit des quatre placettes avec les plus faibles proportions en pentes fortes. On peut donc supposer que le Marbri ne soit pas une espèce bien adaptée à de fortes pentes. Étrangement, on observe que l'abondance en *Tapura latifolia*

est de loin la plus élevée sur Choisy, alors que dans la partie précédente, on soulignait la distribution diamétrique particulière de cette placette.

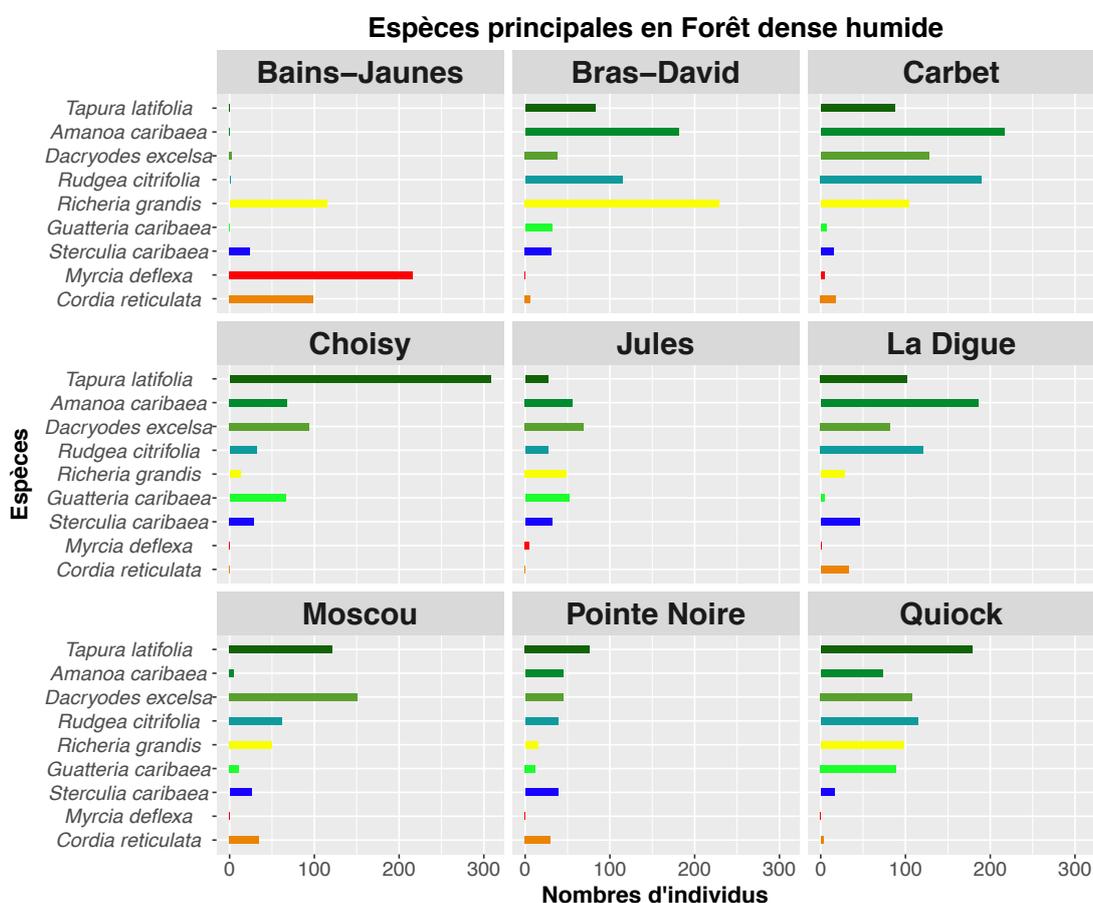


FIGURE 3.21: Répartition des espèces dominantes du dispositif

3.2 Communauté en présence

3.2.1 Analyses factorielles choisies pour l'étude des communautés

Bien que la communauté ait été définie dans la partie précédente, ici, on peut présenter la communauté sous deux formes possibles. La communauté comme définie auparavant (une communauté est égale à une placette à cause des conditions stationnelles). Ou la communauté au sens phytosociologique, c'est à dire une communauté correspond à l'agencement des individus d'une manière plus ou moins déterminée, reflet des conditions stationnelles certes, mais également des interactions biologiques tels des filtres environnementaux, qui font émerger des associations végétales. Ceci permet par la suite d'envisager une approche dite d'écologie fonctionnelle, qui va s'intéresser à des traits fonctionnels chez des individus d'espèces (semblables ou différentes) et de déterminer leurs relations avec leur environnement.

L'Analyse Factorielle de Correspondances (AFC)

L'AFC permet l'étude des communautés puisqu'elle recherche les correspondances (ou liaisons) par le calcul matriciel, en comparant la matrice observée (tableau en entrée) avec une matrice d'indépendance. La mesure se fait par la distance du χ^2 entre les deux matrices, afin de déterminer quels sont les axes de ces matrices qui expliquent le plus la variance (l'inertie).

Dans le cas des placettes, l'AFC se base sur les abondances d'individus par espèce et selon les sites. S'agissant de variables nominales, on parle alors de correspondances plutôt que de corrélations (dans le cas de variables numériques).

Concernant les variables numériques continues (Taille, Pente, Altitude), elles ne peuvent être utilisées sur une AFC, mais peuvent être ajoutées en tant que variables supplémentaires. En d'autres termes, elles ne permettent pas la construction des axes mais peuvent être malgré tout représentées et décrites. Étant donné que l'AFC fonctionne sur un tableau de contingence, il a donc été nécessaire de catégoriser chaque variable numérique. La pente en 8 catégories, l'altitude en 4 catégories et la taille en 4 catégories également (IFN).

Ce que l'on peut attendre des analyses factorielles c'est d'en ressortir des "Clusters" (i.e. groupe ou classe) qui sont, pour ainsi dire, des associations entre modalités. Ces clusters seront obtenus par classification ascendante hiérarchique⁴.

Le tableau de contingence utilisé pour cette AFC se trouve en annexe (sans les variables numériques catégorisées). Ce tableau a d'ailleurs un indice d'Hopkins de 0,845⁵. Cet indice (compris entre 0 et 1) permet de mesurer la tendance à la classification. Il est intéressant puisque les outils de classification offrent toujours un résultat de distance et donc de classification. L'indice est donc très bon car proche de 1, ce qui signifie que les potentiels "clusters" (\approx associations) seront significatifs.

L'Analyse Factorielle des Données Mixtes (AFDM)

De manière analogue à l'AFC, l'AFDM permet de visualiser les variables et les modalités qui construisent les différents axes sur les plans factoriels. Comme expliqué dans le chapitre précédent, l'AFDM a l'avantage de permettre l'incorporation de variables qualitatives (au delà de deux) et quantitatives supplémentaires et d'analyser l'ensemble des individus. On peut donc assimiler l'AFDM à une alliance entre l'ACM (Analyse des Correspondances Multiples) et l'ACP (Analyse en Composante Principale).

4. automatisé et intégré à la fonction HCPC() du package FactomineR, qui détermine les classes sur un résultat (objet) d'une analyse factorielle (fonction CA())

5. fonction utilisée : get-cluster-tendency() (Package **factoextra**)

Concernant les variables numériques, cette fois-ci, elles peuvent participer à la construction des axes, et donc à la phase de classification qui succède. L'avantage fort est qu'il n'est plus nécessaire de catégoriser ces dernières car elles sont analysées en totalité telle une ACP. Il y a donc moins de perte d'informations.

Malheureusement, sur un gros jeu de données avec de nombreux individus et des variables comprenant de nombreuses modalités (telles que les espèces), il y a une répercussion immédiate sur le nombre de dimensions et sur l'inertie associée à chacune d'elles. A titre d'exemple, sur la figure 3.22 ci-dessous, 4 dimensions⁶ sont nécessaires sur l'AFC pour expliquer 91,3 % de la variance alors que 7 dimensions⁷ pour l'AFDM en explique seulement 33 %.

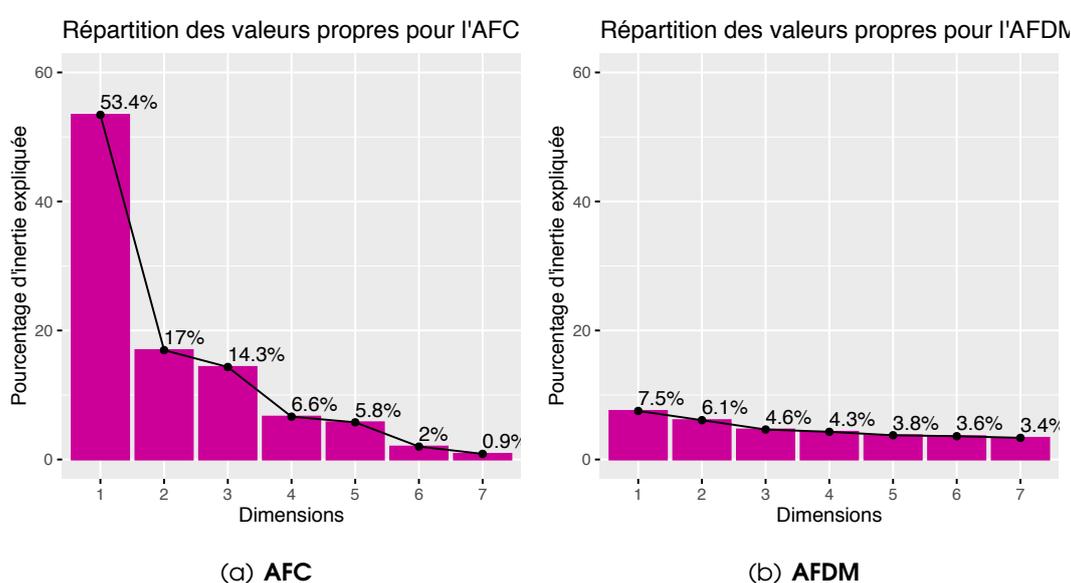


FIGURE 3.22: Répartition de l'inertie sur les deux analyses factorielles

Le choix des axes à conserver est assez arbitraire et l'effet "coude" est souvent recherché. On pourrait donc se satisfaire des deux premières dimensions. Cependant, afin de procéder à une classification hiérarchique, les quatre premières dimensions seront gardées pour l'AFC. En ce qui concerne l'AFDM, tous les axes ont été gardés.

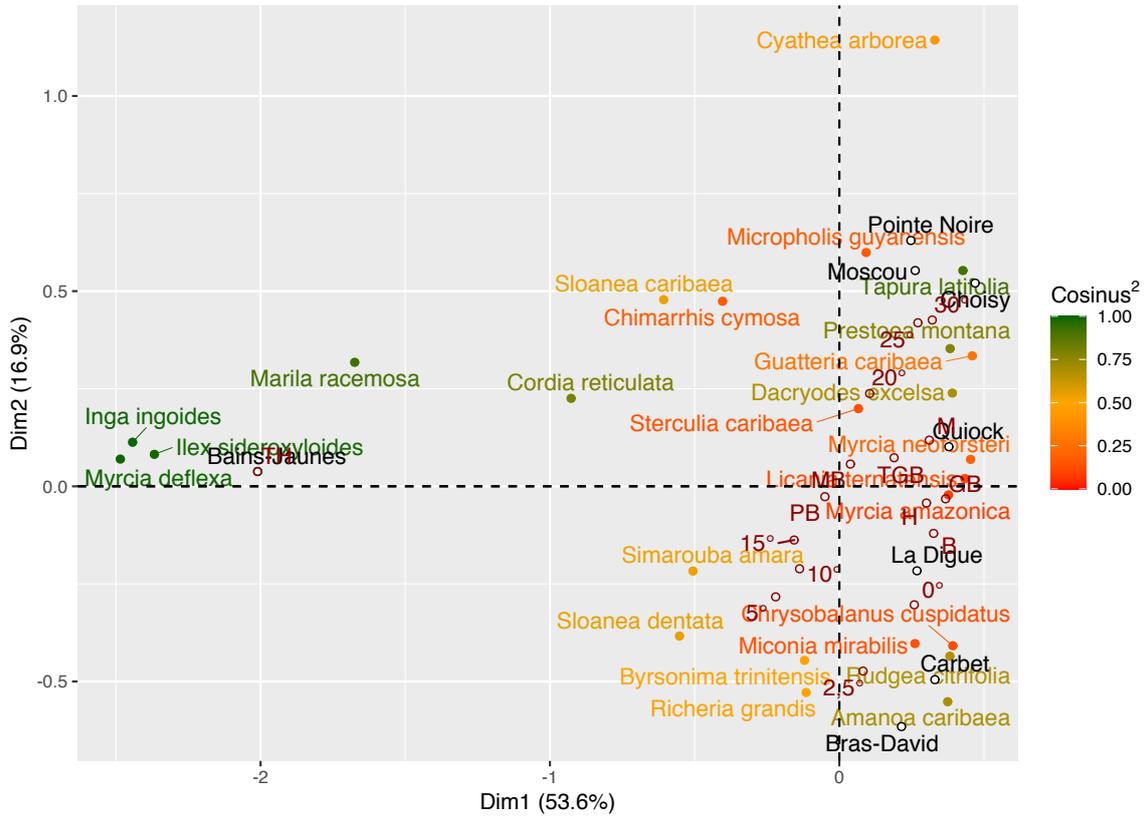
3.2.2 Résultats de l'AFC

Sur la figure 3.23, les éléments à \cos^2 élevé ($> 0,6$) sont dits "caractéristiques" ou "liés" aux dimensions. Sur les deux premiers axes (figure 3.23 - a), on observe donc les espèces potentiellement correspondantes à Bains-Jaunes (*Myrcia deflexa*, *Inga ingoides*, *Ilex sideroxyloides*, *Marila racemosa*, *Cordia reticulata*...), Moscou / Pointe Noire / Choisy (*Tapura latifolia*, *Dacryodes excelsa*, *Prestoea montana*), Carbet / Bras-David (*Amanoa caribaea*, *Rudgea citrifolia*) et Quiock semble mal représenté.

6. Sur un total de 7

7. Sur un total de 34

a Qualité des modalités (Taxon) de l'AFC - Axes 1 et 2



b Qualité des modalités (Taxon) de l'AFC - Axes 3 et 4

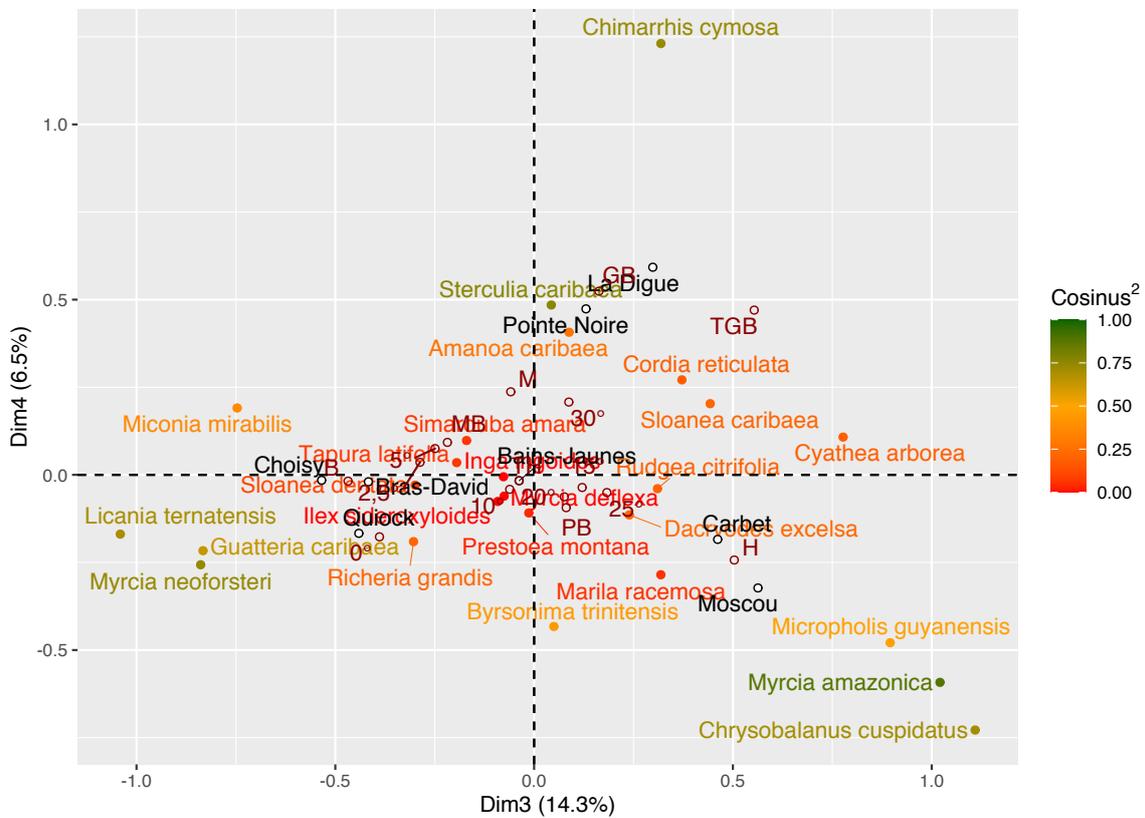


FIGURE 3.23: Qualité de représentation des modalités sur les deux plans factoriels

Sur la figure 3.23 - b, représentant le deuxième plan (axe 3 et 4), on distingue les espèces liées pour Pointe-Noire / la Digue (*Sterculia caribaea*, *Chimarrhis cymosa*), pour Choisy / Quiock (*Licania ternatensis*, *Myrcia neoforsteri*, *Guatteria caribaea*) et pour Moscou / Carbet (*Myrcia amazonica*, *Chrysobalanus cuspidatus*).

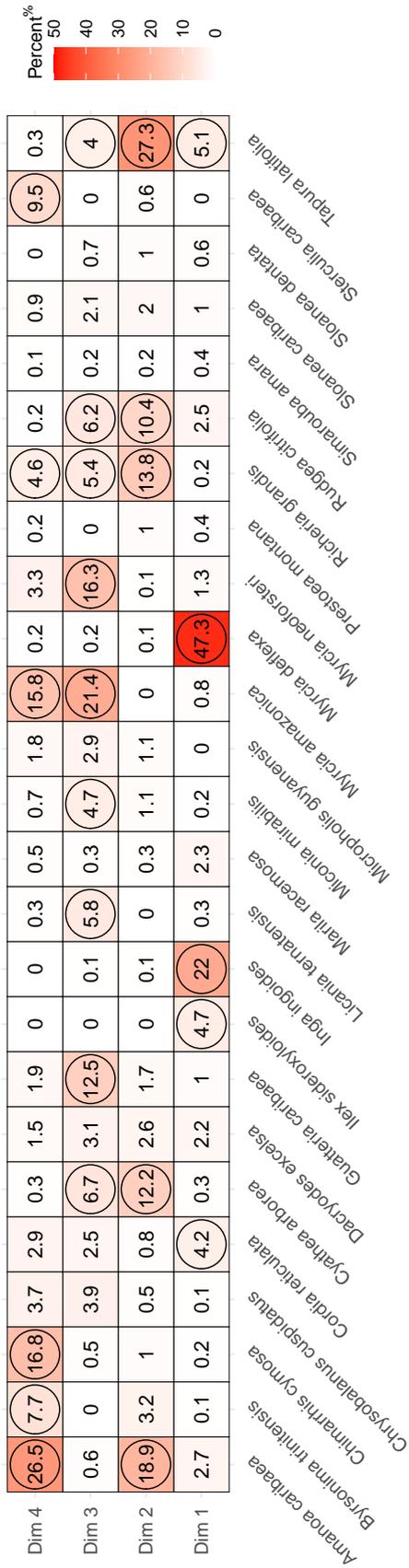
Autre manière d'illustrer les résultats, il s'agit de représenter les modalités les plus contributives à la formation des axes. Une modalité fortement représentée (typiquement dans toutes les placettes) aura donc une forte contribution, mais ne sera pas obligatoirement liée spécifiquement à une dimension.

Sur la figure 3.24, les modalités les plus contributives, tout axes confondus, sont *Amanoa caribaea*, *Chimarrhis cymosa*, *Cyathea arborea*, *Guatteria caribaea*, *Inga ingoides*, *Myrcia amazonica*, *Myrcia deflexa*, *Richeria Grandis*, *Rudgea citrifolia* et *Tapura latifolia*.

La partie qui suit découle des résultats de cette AFC, nous permettant de réaliser une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

Contribution à l'inertie

Mise en évidence des éléments les plus contributeurs, c.a.d supérieur à 4 %, seuil correspondant au poids d'une espèce (cellules entourées)



Qualité de représentation

Mise en évidence des éléments les plus représentatifs (~ caractéristiques) de la dimension concernée, c.a.d un cos² supérieur à 0,7 (max = 1)

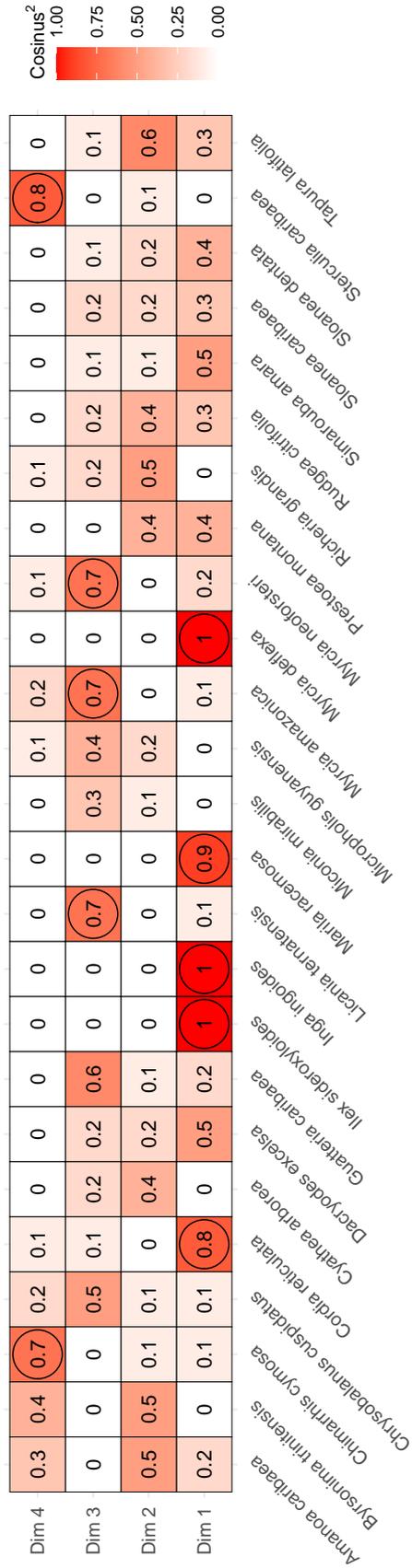


FIGURE 3.24: Tableau des contributions et représentations de l'AFC

Classification Ascendante Hiérarchique

Sans réelle surprise, Bains-Jaunes est de loin la placette la plus éloignée de toute en terme de communautés hébergées. Les plans factoriels précédents centraient l'information sur Bains-Jaunes et ses spécificités.

Plus étonnamment, l'analyse fait ressortir des correspondances entre Pointe-Noire / Moscou et Carbet / Bras-David, bien que ces placettes ne soient pas proches géographiquement voir même opposées (côte au vent et sous le vent), et à des altitudes relativement éloignées.

Classification Ascendante Hiérarchique

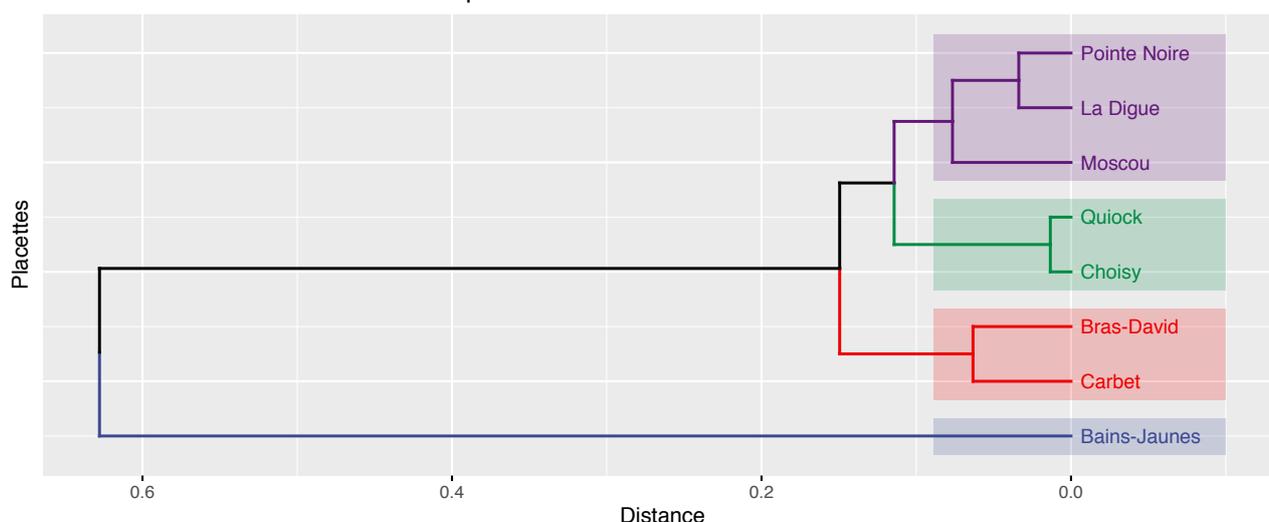


FIGURE 3.25: Classification Ascendante Hiérarchique suite aux résultats de l'AFC

On peut supposer, grâce aux résultats de l'AFC, que la correspondance avec la modalité *Cyathea arborera* peut par exemple expliquer un tel rattachement (Pointe-Noire/Moscou). En effet, ces 2 placettes sont certes éloignées sur de nombreux aspects, mais elles sont malgré tout proches topographiquement avec des pentes très fortes (figure 3.3).

Cette caractéristique correspond préférentiellement au développement des fougères, ou du moins ne les contraint pas autant que pour d'autres espèces. Ces zones sont source de chablis fréquents, créant des ouvertures dont profitent les espèces pionnières et plus particulièrement celles adaptées aux fortes pentes.



FIGURE 3.26: *Dacryodes excelsa*

Si l'on regarde les groupes formés par la CAH sur la figure 3.28, on observe davantage ces correspondances, avec un reflet indirect des conditions stationnelles.

Selon Alain Rousteau, *Dacryodes excelsa* est une espèce caractéristique de pente, bien que non-pionnière. Hors, on observe effectivement la présence de *Dacryodes excelsa* (en plus de *Cyathea arborea*) au sein du groupe 5 en vert de la figure 3.28. On remarque également la présence dans ce groupe de *Tapura latifolia*, déjà mis en évidence sur la figure 3.23 - a .

Concernant le cluster Bras-David / Carbet, on peut supposer, à l'inverse, que la pente faible permet l'établissement d'espèces moins adaptées aux pentes raides. En effet, on retrouve des caractéristiques similaires avec deux placettes très éloignées et sur des altitudes bien différenciées, mais qui malgré tout semblent être proches en terme de communautés, notamment par la présence en *Amanoa caribaea* et *Rudgea citrifolia*.



FIGURE 3.27: *Cyathea arborea*

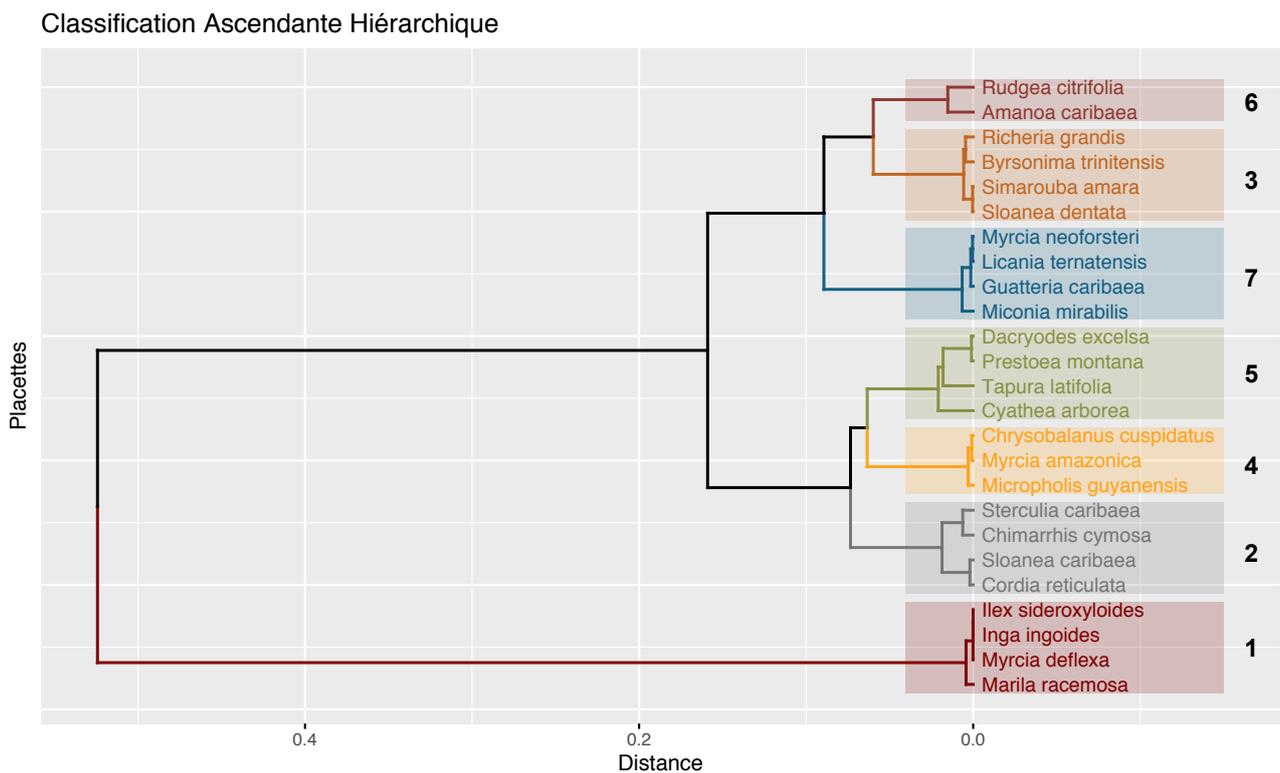


FIGURE 3.28: Classification Ascendante Hiérarchique des espèces

3.2.3 Résultats de l'AFDM

Pour cette AFDM, l'utilisation de toutes les variables a été nécessaire pour diminuer l'inertie expliquée, d'où le fait que l'on ne retrouve aucune variable supplémentaire. En effet, au regard de la figure 3.29 et 3.30, chacune contribue sur au moins l'un des 4 premiers axes, bien que pour la majeure partie des plans, la variable *Site* se trouve être la plus contributive suivit de la variable *Taxon*.

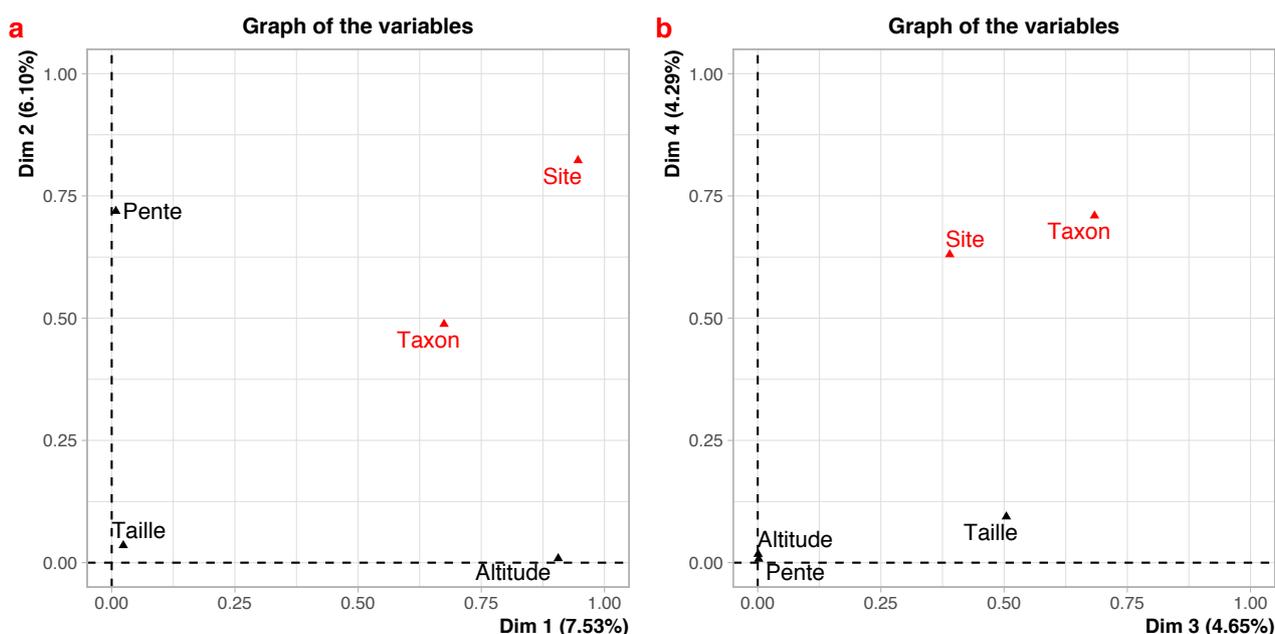


FIGURE 3.29: Variables actives sur les quatre premiers axes de l'AFDM

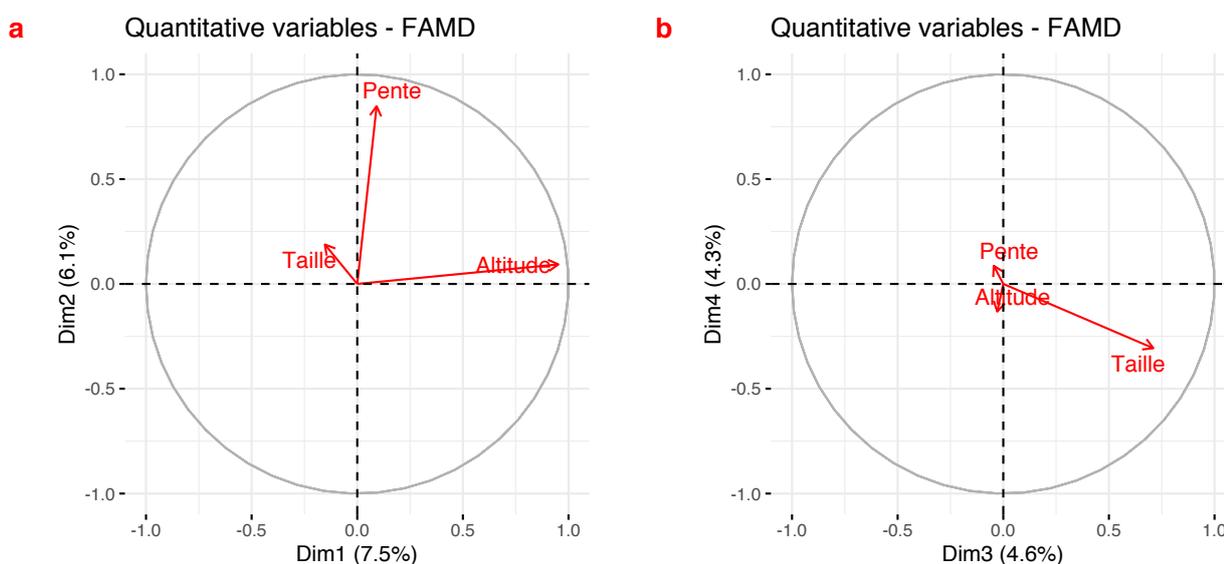


FIGURE 3.30: Cercle de corrélation des variables quantitatives sur les quatres premiers axes de l'AFDM

Sur cette même figure, les variables quantitatives sont en noir. Elles sont chacune positivement corrélées à leur axe notamment l'*Altitude* (axe 1) et la *Pente* (axe 2). La *Taille* est

quant à elle positivement corrélée à l'axe 3.

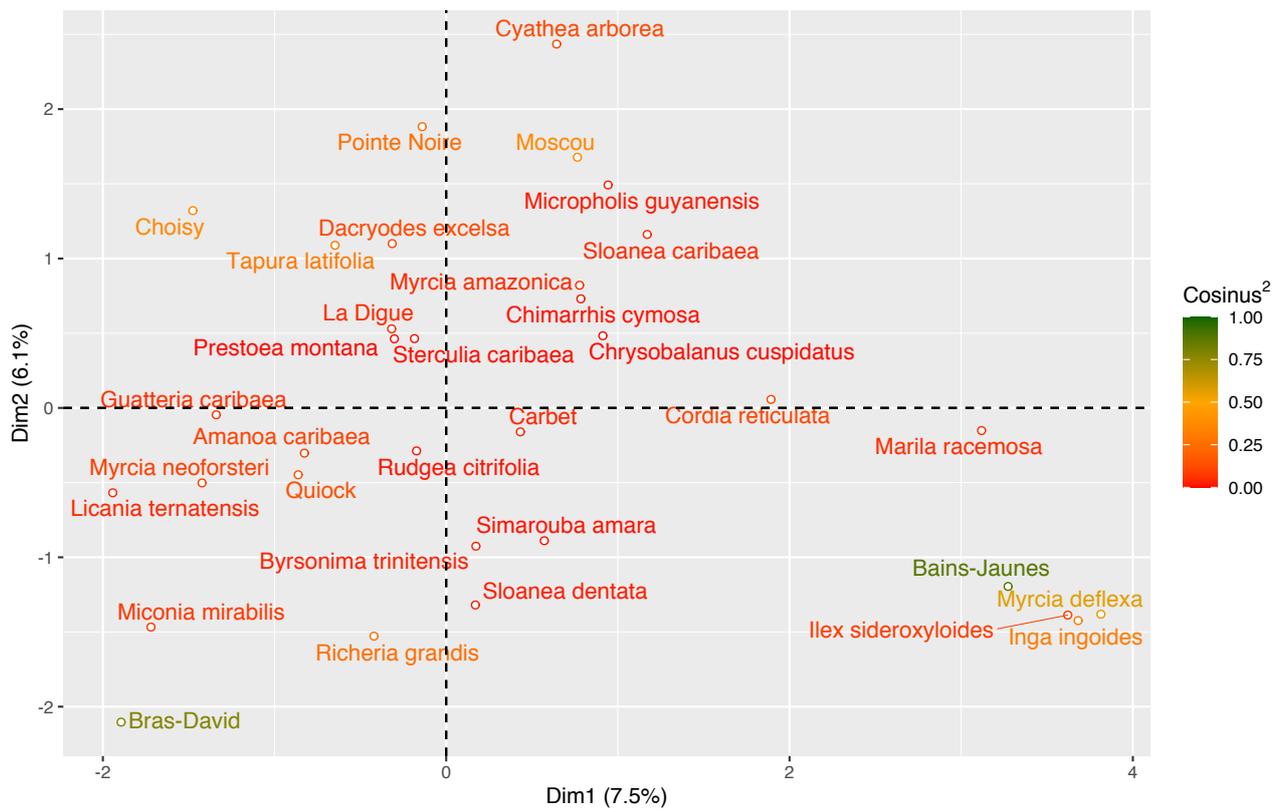
Cependant on ne peut pas dire sur ces deux plans que les variables sont corrélées entre elles, sauf pour le deuxième plan où l'on observe une correspondance entre la variable *Site* et *Taxon*. Ce qui ressort de cette figure, c'est que les individus sont davantage liés par le *Site*.

Enfin, de manière analogue à l'AFC, nous pouvons représenter les modalités. Ci-dessous, la figure 3.31 expose les 10 modalités les mieux représentées pour les axes 1 et 2 (figure a) et pour les axes 3 et 4 (figure b). On retrouve donc les mêmes modalités caractéristiques exposées par l'AFC, et d'une manière générale les sites expliquent davantage la répartition des individus. On a donc d'une certaine manière, une manifestation des conditions stationnelles qui s'expriment et qui déterminent le type d'individu.

On peut d'ailleurs l'observer sur le premier plan factoriel en représentant le nuage des individus. Les trois nuages ci-dessous sont identiques et représentent les mêmes axes (figure 3.32). Ici, on observe l'importance de la variable *Site* qui structure le nuage de points. Rappelons tout de même qu'il s'agit ici d'une représentation sur les deux premiers axes uniquement, certes ceux expliquant le plus l'information, mais ils n'expliquent clairement pas tout puisque cet AFDM est composée de 34 axes. La figure b centrale modère aussi cet aspect en présentant la qualité de l'information qui est très ponctuelle (Individus de Bains-Jaunes et Bras-David).

L'AFDM permet donc de rassembler beaucoup plus d'information, mais qu'il est beaucoup plus difficile de représenter graphiquement, d'où la seconde partie puisque c'est là que la classification se révèle être d'une grande utilité car elle va comparer tous les individus pour faire émerger de potentiels clusters. L'analyse est beaucoup plus gourmande en temps de calcul et il sera donc nécessaire de décrire les caractéristiques principales pour chaque groupe puisque qu'il faudrait 17 dendrogrammes et 17 plans factoriels pour représenter la totalité de l'analyse.

a Qualité des modalités de l'AFDM - Axes 1 et 2



b Qualité des modalités de l'AFDM - Axes 3 et 4

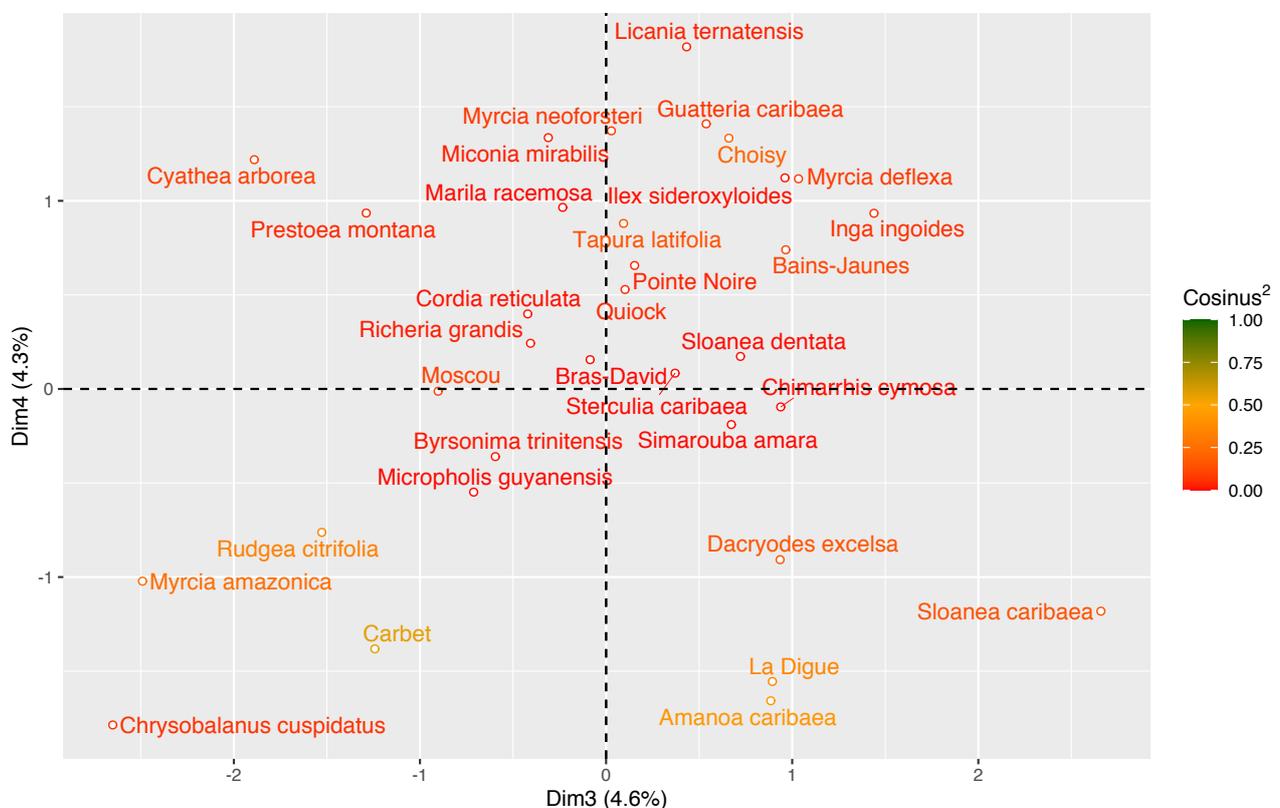


FIGURE 3.31: Représentation de la qualité des modalités actives sur les quatre premiers axes de l'AFDM

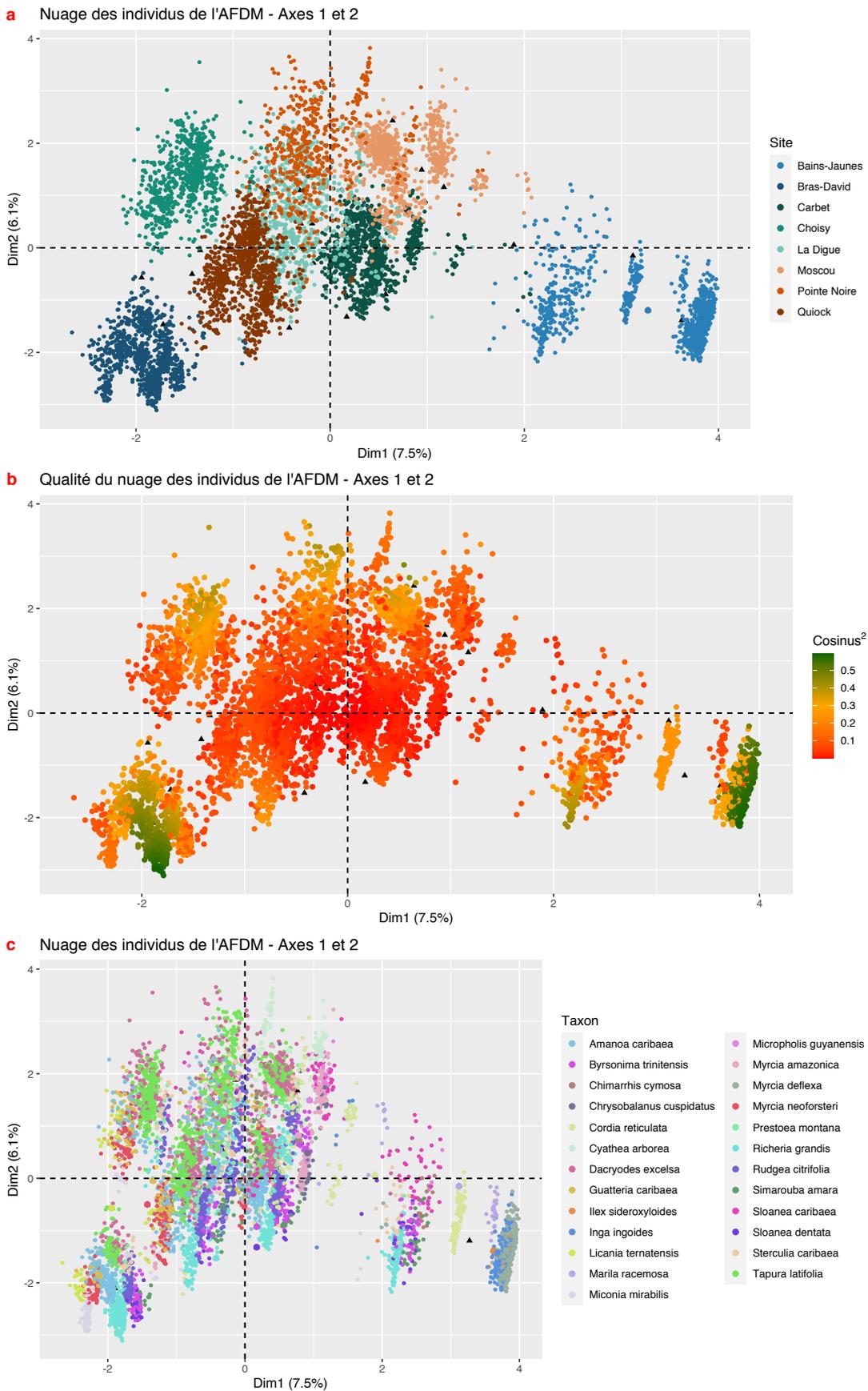


FIGURE 3.32: Nuage de points de l'AFDM

Classification Ascendante Hiérarchique

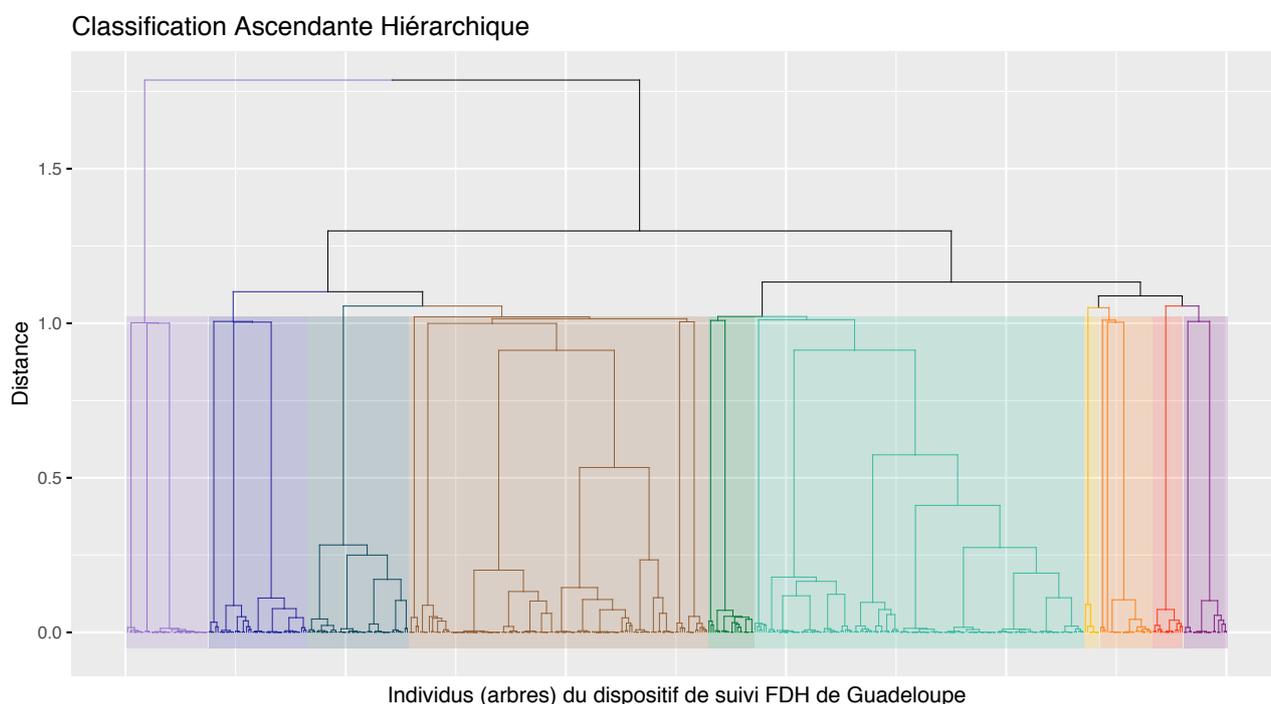


FIGURE 3.33: Dix clusters identifiés suite à la CAH de l'AFDM

Sur la figure 3.33, on observe donc les dix clusters. Ces derniers sont obtenus automatiquement en calculant la plus grande perte relative d'inertie (effet coude). Puisque cette fois-ci l'analyse s'effectue sur les individus, le dendrogramme obtenu est la représentation de tous les individus et de leur proximité/distance sur les 2 premiers axes factoriels. Pour des raisons de clarté et de temps de calcul, les labels de chaque individu (ex : BJ662, LD632...) n'ont pas été représentés sur ce dendrogramme.

Sur la figure 3.36, on observe une matrice en couleur décrivant chaque groupe en fonction des variables qualitatives ($n = 34$) et quantitatives ($n = 3$). L'interprétation se fait de la manière suivante :

- Pour les variables quantitatives, les cellules bleues signifient que la valeur moyenne de la modalité dans le cluster considéré est significativement plus faible ($p.val < 0.01$) que dans le jeu de données global (et en rouge pour significativement plus élevée).
- Pour les variables qualitatives, les cellules bleues signifient que la modalité est sous représentée et sur-représentée pour les cellules rouges.
- Dans les 2 cas, plus le degré de transparence est élevé moins la différence est significative (le maximum étant la couleur blanche).

En plus de cette figure, les figures 3.34 et 3.35 détaillent les caractéristiques chiffrées de ces résultats. La figure 3.36 est donc la synthèse visuelle de ces 2 tableaux.

Cluster 1 569	Cluster 2 893	Cluster 3 2066	Cluster 4 2001	Cluster 5 288	Cluster 6 135	Cluster 7 334	Cluster 8 128	Cluster 9 261	Cluster 10 557
Cluster	Variable	Cla/Mod	Mod/Cla	Global	v.test				
Cluster 1	Myrcia neoforsteri	100.0	49.7	3.9	Inf				
Cluster 1	Guatteria caribaea	100.0	38.8	3.1	34.8				
Cluster 1	Licania ternatensis	100.0	11.4	0.9	18.2				
Cluster 1	Choisy	21.9	31.1	11.2	13.5				
Cluster 1	Quiock	19.6	34.6	13.9	13.1				
Cluster 1	Bras-David	11.3	20.7	14.5	4.2				
Cluster 2	Amanoa caribaea	100.0	100.0	12.3	Inf				
Cluster 2	La Digue	31.2	27.3	10.8	15.0				
Cluster 2	Carbet	20.3	26.8	16.3	8.5				
Cluster 2	Bras-David	19.4	22.7	14.5	7.1				
Cluster 3	Tapura latifolia	100.0	62.5	17.9	Inf				
Cluster 3	Dacryodes excelsa	100.0	31.9	9.1	Inf				
Cluster 3	Choisy	55.1	21.6	11.2	16.9				
Cluster 3	Prestoea montana	100.0	5.4	1.5	16.7				
Cluster 3	Moscou	45.3	19.6	12.3	11.4				
Cluster 3	Pointe Noire	44.4	11.8	7.6	8.2				
Cluster 3	Quiock	39.5	19.3	13.9	8.1				
Cluster 4	Rudgea citrifolia	100.0	39.5	10.9	Inf				
Cluster 4	Richeria grandis	100.0	35.6	9.8	Inf				
Cluster 4	Byrsonima trinitensis	100.0	11.5	3.2	24.6				
Cluster 4	Bras-David	52.5	27.5	14.5	18.5				
Cluster 4	Miconia mirabilis	100.0	5.1	1.4	16.1				
Cluster 4	Sloanea dentata	97.9	4.7	1.3	15.0				
Cluster 4	Simarouba amara	100.0	3.6	1.0	13.5				
Cluster 4	Carbet	41.1	24.2	16.3	10.9				
Cluster 5	Sterculia caribaea	100.0	78.5	3.1	Inf				
Cluster 5	Chimarrhis cymosa	100.0	21.5	0.9	20.2				
Cluster 5	Pointe Noire	11.3	21.5	7.6	7.7				
Cluster 5	La Digue	8.3	22.6	10.8	5.9				
Cluster 6	Cyathea arborea	100.0	100.0	1.9	36.4				
Cluster 6	Pointe Noire	10.2	41.5	7.6	11.1				
Cluster 6	Moscou	7.4	48.9	12.3	10.5				
Cluster 7	Myrcia amazonica	100.0	75.1	3.5	Inf				
Cluster 7	Micropholis guyanensis	100.0	13.2	0.6	16.4				
Cluster 7	Chrysobalanus cuspidatus	100.0	11.7	0.5	15.4				
Cluster 7	Moscou	15.3	40.7	12.3	13.5				
Cluster 7	Carbet	12.1	42.8	16.3	11.8				
Cluster 8	Sloanea caribaea	100.0	100.0	1.8	35.7				
Cluster 8	Bains-Jaunes	4.4	33.6	13.4	5.9				
Cluster 8	Moscou	4.3	29.7	12.3	5.3				
Cluster 8	La Digue	3.6	21.9	10.8	3.7				
Cluster 9	Cordia reticulata	100.0	85.8	3.1	Inf				
Cluster 9	Marila racemosa	100.0	14.2	0.5	15.7				
Cluster 9	Bains-Jaunes	12.9	47.9	13.4	13.8				
Cluster 10	Myrcia deflexa	100.0	63.0	4.9	Inf				
Cluster 10	Bains-Jaunes	56.2	98.0	13.4	Inf				
Cluster 10	Inga ingoides	100.0	30.3	2.3	30.2				
Cluster 10	Ilex sideroxyloides	97.4	6.6	0.5	13.4				

FIGURE 3.34: Caractéristiques chiffrées des variables qualitatives des clusters

Cluster		v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall sd	p.value
Cluster 1	Pente	-3.708459	16.63761	17.98487	8.781827	9.027746	2.085247e-04
	Altitude	-18.453587	375.77540	508.11630	106.206024	178.210677	4.879616e-76
Cluster 2	Taille	19.151289	30.74571	22.60841	17.243863	13.561155	9.442097e-82
	Pente	-5.980803	16.29317	17.98487	8.875926	9.027746	2.220402e-09
	Altitude	-10.703610	448.35095	508.11630	134.994528	178.210677	9.788841e-27
Cluster 3	Pente	19.92953	21.33059	17.98487	8.865562	9.027746	2.256610e-88
	Taille	13.98408	26.13491	22.60841	14.998942	13.561155	1.949745e-44
	Altitude	-12.62589	466.27469	508.11630	125.582271	178.210677	1.520198e-36
Cluster 4	Altitude	-7.462744	482.82904	508.11630	184.378390	178.210677	8.473893e-14
	Pente	-16.250145	15.19550	17.98487	8.474179	9.027746	2.228361e-59
	Taille	-17.554436	18.08201	22.60841	8.066414	13.561155	5.501066e-69
Cluster 5	NULL						
Cluster 6	Pente	11.691525	26.98444	17.98487	8.357209	9.027746	1.408344e-31
	Altitude	3.271462	557.82667	508.11630	80.690985	178.210677	1.069929e-03
	Taille	-8.224010	13.09904	22.60841	2.196145	13.561155	1.968103e-16
Cluster 7	Altitude	8.411318	588.22635	508.11630	88.306458	178.210677	4.054275e-17
	Pente	5.780859	20.77395	17.98487	7.086599	9.027746	7.432030e-09
	Taille	-10.236326	15.18967	22.60841	6.786869	13.561155	1.363143e-24
Cluster 8	Taille	16.164236	41.81274	22.60841	28.03623	13.561155	9.014850e-59
	Altitude	7.585425	626.54609	508.11630	164.34150	178.210677	3.313983e-14
	Pente	3.087193	20.42656	17.98487	10.14666	9.027746	2.020561e-03
Cluster 9	Altitude	15.543976	676.47050	508.11630	157.92874	178.21068	1.747941e-54
	Taille	-9.978603	14.38419	22.60841	3.25608	13.56115	1.891100e-23
Cluster 10	Altitude	42.998676	820.06822	508.11630	41.076407	178.210677	0.000000e+00
	Taille	-6.424715	19.06150	22.60841	6.722331	13.561155	1.321164e-10
	Pente	-10.273077	14.20934	17.98487	5.747364	9.027746	9.318401e-25

FIGURE 3.35: Caractéristiques chiffrées des variables quantitatives au sein des clusters

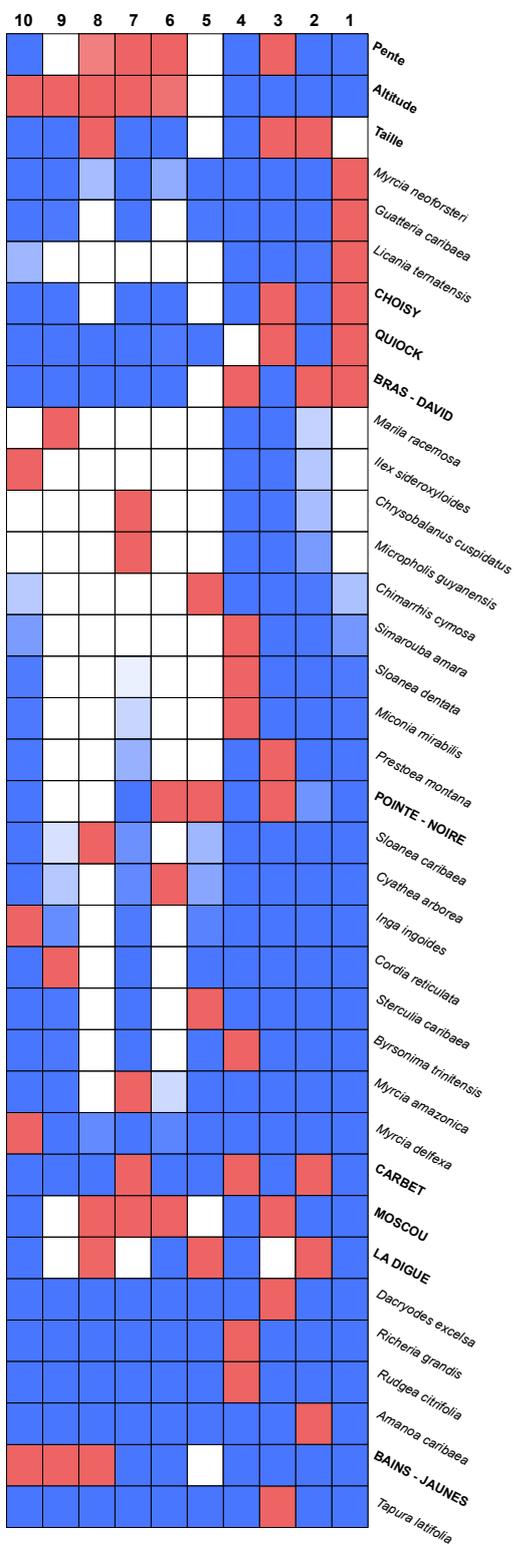


FIGURE 3.36: Description graphique des catégories au sein des clusters

Avant de continuer, il est important de préciser que ces chiffres font uniquement ressortir les données significatives. Beaucoup d'individus sont donc ignorés et la figure 3.34 ne donne que les associations d'individus plausibles.

Les colonnes "**Cla/Mod**" , "**Mod/Cla**" et "**Global**" permettent de mieux appréhender ces groupes. "Cla/Mod" correspond au ratio du nombre d'individus avec ce cluster dans la modalité concernée. A l'inverse, "Mod/Cla" correspond au ratio du nombre d'individus avec la modalité concernée dans le cluster. Enfin "Global" correspond au ratio de la modalité sur l'ensemble du jeu de données.

Si l'on prend l'exemple de la modalité *Tapura latifolia* dans le cluster 3, cela signifie que 100 % des individus *Tapura latifolia* sont présents dans ce cluster, et que les individus *Tapura latifolia* représentent 62,5 % des individus du cluster 3.

On comprend donc tout de suite que la colonne "Cla/Mod" permet de trouver facilement les variables caractéristiques des clusters. Plus la valeur est proche de 100 % plus celle-ci est liée au cluster. Pour raison visuelle, seules les modalités significatives et positivement liées sont exposées (d'où les valeurs critiques de la colonne "**v.test**"). Seule la figure 3.36 permet d'observer les modalités significatives et négativement liées (cellules bleues).

Description des clusters

Cluster 3 et 4 Sur ces 10 groupes, deux concentrent la majorité des individus avec 4067 individus (groupe 3 et 4). Ces 2 groupes sont d'une certaine manière opposés sur plusieurs points. Tout d'abord, par les espèces qui les composent et les individus de ces espèces. Chaque groupe contient entre 3 et 5 espèces avec 100 % des individus pour chacune d'elles. Ces espèces ne sont donc pas partagées. Cela ne signifie pas qu'il est impossible de retrouver ces espèces ensemble, mais plutôt que l'agencement des individus sur les placettes de ce groupe répond à des conditions écologiques qui favorisent l'association de ces espèces entre elles.

A l'exception d'*Amanoa caribaea* toutes les espèces majeures du dispositif sont représentées dans ces deux groupes. On a donc une manifestation des différences de communautés hébergées, elles-mêmes dépendantes des conditions écologiques inconnues au sein de ces sites. C'est donc une opposition entre le groupe Choisy/Moscou/Quiock et Bras-David/Carbet qui s'exprime. En effet sur la figure 3.35, bien que les altitudes soient proches sur la moyenne des individus, on observe une grande différence par rapport aux pentes et tailles des individus. Bien évidemment, les arbres ont de plus grandes chances d'être sur de fortes pentes au sein du groupe 3, mais les différences notables de composition d'espèces et de tailles d'individus laissent à penser que la pente peut être un élément important dans le développement de communautés locales. En effet, Carbet et Bras-David sont éloignées et à des altitudes fortement différenciées, mais ces placettes possèdent malgré tout des

communautés similaires en espèces et taille diamétrique. Pour rappel, ces deux placettes sont celles avec la plus faible pente.

Cluster 2 Les individus *Amanoa caribaea* sont donc sortis des deux groupes principaux et sont concentrés à 100 % dans le cluster 2. Cette fois-ci, c'est les conditions au sein du groupe La Digue/Carbet/Bras-David qui s'exprime et qui semblent être préférentielles au développement d'*Amanoa caribaea*. Sur la figure 3.35, on remarque la présence d'individus de tailles élevées significatives dans des pentes faibles à des altitudes globalement basses. On peut comparer ce groupe avec le cluster 3. En effet, il semble qu'*Amanoa caribaea* soit une des espèces abondantes à grand diamètre en basse/moyenne altitude, alors que *Tapura latifolia* et *Dacryodes excelsa* semblent être les espèces abondantes de moyen/-gros diamètre en moyenne/haute altitude. Cette séparation d'*Amanoa caribaea* dans un groupe particulier peut donc être la manifestation des conditions stationnelles sur ces trois sites qui favorisent son développement et/ou la manifestation de son optimum altitudinal (étage de végétation).

Cluster 1 On peut présumer pour ce groupe qu'il met en relief une caractéristique de partitionnement des espèces en front Nord/Sud au sein de Basse-Terre avec le groupe Choisy/Quiocq/Bras-David. Autre hypothèse pour expliquer ce partitionnement, l'altitude significativement basse (375 m en moyenne).

Cluster 6 Comme pour l'AFC, on retrouve ici l'association entre Pointe-Noire et Moscou qui partagent une sur-représentation de la fougère *Cyathea arborea*. Avec le cluster 3, il s'agit du cluster qui semble être associé à des espèces de pente, mais avec potentiellement une caractéristique de milieu prédisposé aux perturbations de type "chablis".

Cluster 7 *Myrcia amazonica* (Goyavier), est une espèce assez courante et qui semble dans cette analyse, être associée à deux autres espèces : *Micropholis guyanensis* et *Chrysobalanus cuspidatus*. On remarque, d'ailleurs, une répartition beaucoup plus locale avec deux placettes très proches (Carbet et Moscou). Les conditions micro-climatiques telles que la température (altitude) et l'humidité relative, peuvent être une hypothèse aux développements associés de ces trois espèces sur cette zone car ces deux placettes sont malgré tout très différentes topographiquement.

Cluster 8 *Sloanea caribaea* (Acomat boucan) est un des géants de la forêt de Guadeloupe. Étrangement un cluster spécifique lui est associé. Il est difficile de tenter d'interpréter ce cluster. Seule une hypothèse de développement préférentiel dans le secteur soufrière peut être émise (à l'instar du cluster 1 avec un secteur nord identifié). Une corrélation positive de la variable pente semble témoigner d'une préférence pour les dénivelés plus fort que la moyenne.

Cluster 9 et 10 Ces deux clusters concentrent la particularité évidente de Bains-Jaunes dans les résultats. Bains Jaunes est malheureusement la seule placette située sur le versant "côte sous le vent", au sud et à de fortes altitudes. Il est donc difficile de comparer ces résultats. L'hypothèse de communauté végétale des étages altitudinaux peut être émise, avec comme corrélation négative, la taille des arbres. Sans surprise puisque que passé un certain seuil d'altitude, la taille et la vigueur des arbres tendent à diminuer.

Cluster 5 Ce cluster est particulier et difficilement interprétable. Aucune donnée significative quantitative ne ressort. Seule l'association entre *Sterculia caribaea* et *Chimarrhis cymosa* semble émerger au niveau des espèces, avec un couplage Pointe-Noire / la Digue pour les sites, bien que ces deux placettes soient relativement distantes.

3.3 Dynamique

3.3.1 Mortalité et recrutement

Cette partie dynamique recueille les premiers résultats après 10 ans de suivi. Au même titre que le suivi de l'accroissement cambial (section suivante), le suivi de la mortalité permet d'observer l'état de santé des individus. La recherche d'indicateur de santé est d'ailleurs un des objectifs du dispositif de placettes et du Parc national.

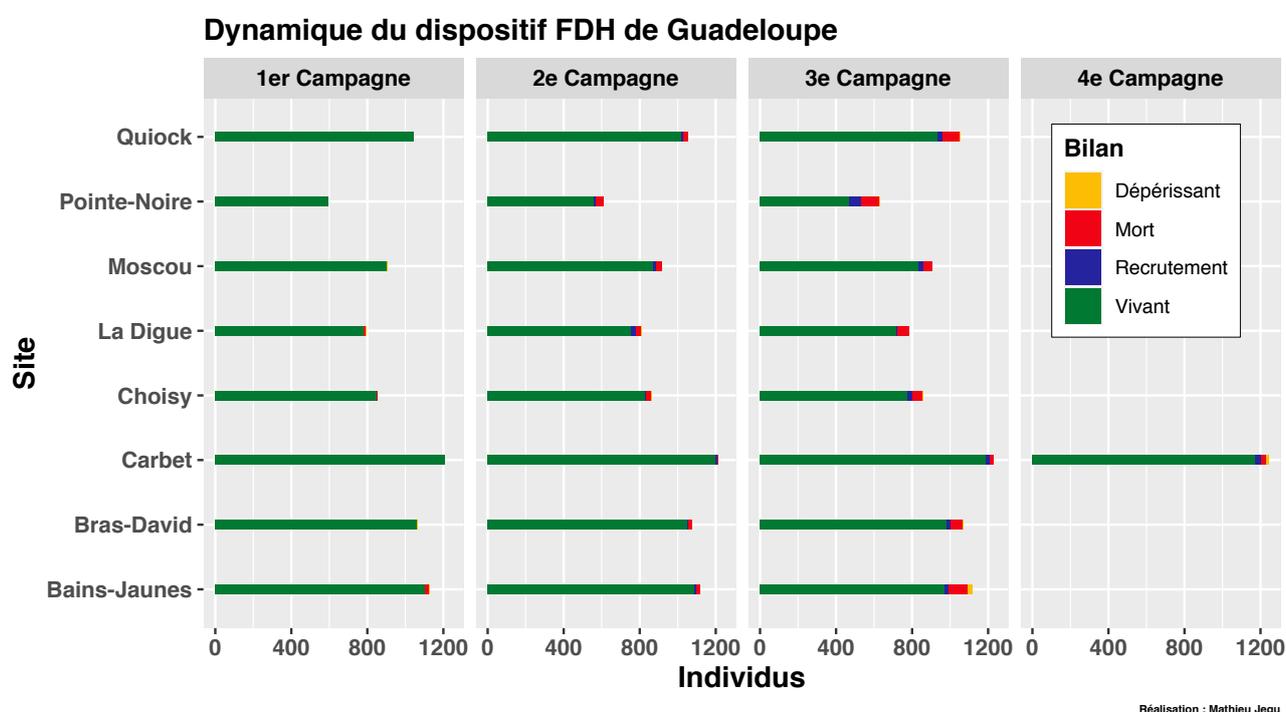


FIGURE 3.37: Dynamique globale au sein du réseau FDH de Guadeloupe

Sur la figure 3.37, il semble difficile d'observer précisément la dynamique pure (recrutement et mortalité), mais il semble nécessaire de voir la proportion de cette dynamique

démographique par rapport au poids de l'inertie des individus vivants.

Si l'on regarde de plus près la mortalité et le recrutement (figure 3.39), il semble assez clair qu'une accélération de la mortalité a lieu entre la campagne 2 et 3.

Une remarque importante est à porter sur un fait météorologique majeur. En effet, dans la nuit du 18 au 19 septembre 2017, la Guadeloupe a été frappée par le passage d'un ouragan de catégorie 5, le cyclone Maria.

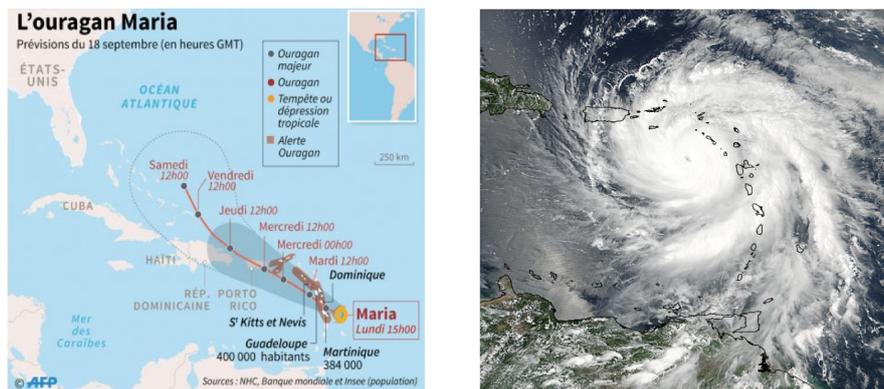


FIGURE 3.38: Passage du cyclone Maria au sud Basse-Terre (Source : AFP, NASA

)

Le cyclone Maria est donc apparu pendant la troisième campagne. Les placettes ayant été suivies pour leur troisième campagne et avant le passage du cyclone sont les placettes de Bras-David et Carbet. Cependant, Carbet a été suivi pour sa quatrième campagne en 2019. Cela signifie que seul Bras-David n'a pas été suivi (mortalité et accroissement) sur une période post-cyclonique. Malgré tout, on remarque une forte accélération sur Bras-David entre les 2 dernières campagnes.

Toujours concernant la placette de Carbet, on remarque comme pour la totalité des placettes, une augmentation de la mortalité mais aussi une hausse des individus en état de dépérissement après le passage de Maria. Ce diagnostic est d'ailleurs identique sur Bains-Jaunes, qui possède le plus fort taux de mortalité sur cette troisième campagne. Or ces deux placettes sont, avec Moscou, les 3 placettes ayant potentiellement subi le plus fort impact du cyclone puisque situées le plus au sud. Bains-Jaunes est très probablement la placette la plus impactée, ne serait-ce que par les dégâts observés sur le terrain en 2018 (Figure 2.9).

A l'exception de Bains-Jaunes, il est difficile à l'heure actuelle de déterminer si oui ou non les placettes ont subi un effet significatif du cyclone sur la mortalité. Par exemple, Carbet et Moscou au sud de la Basse-Terre ne semblent pas, sur ces résultats, avoir subi un fort impact. Les forêts à l'est de la chaîne montagneuse de la Basse-Terre (côte au vent), dont Moscou et Carbet font partie, furent plus éloignées de la trajectoire du cyclone, les protégeant potentiellement d'une mortalité accrue.

Dans tous les cas, le dispositif est jeune et on peut penser que le travail des agents du Parc et de l'ONF a su trouver sa cadence et sa méthodologie sur site et qu'une partie de ces augmentations repose sur cette amélioration. L'année 2020 a d'ailleurs été une année d'apurement majeure, notamment sur le site de Pointe-Noire. On le remarque d'ailleurs en chiffre avec un taux de recrutement très élevé. Malgré tout, on peut imaginer que Maria a joué un rôle fort sur le taux de mortalité sur le site de Pointe-Noire. Même éloigné du cyclone, des vents suffisamment violents ont pu augmenter le nombre de chablis étant donné le caractère pentu de cette placette. La 4e campagne sera intéressante pour observer si un retour semblable à la deuxième campagne s'opère.

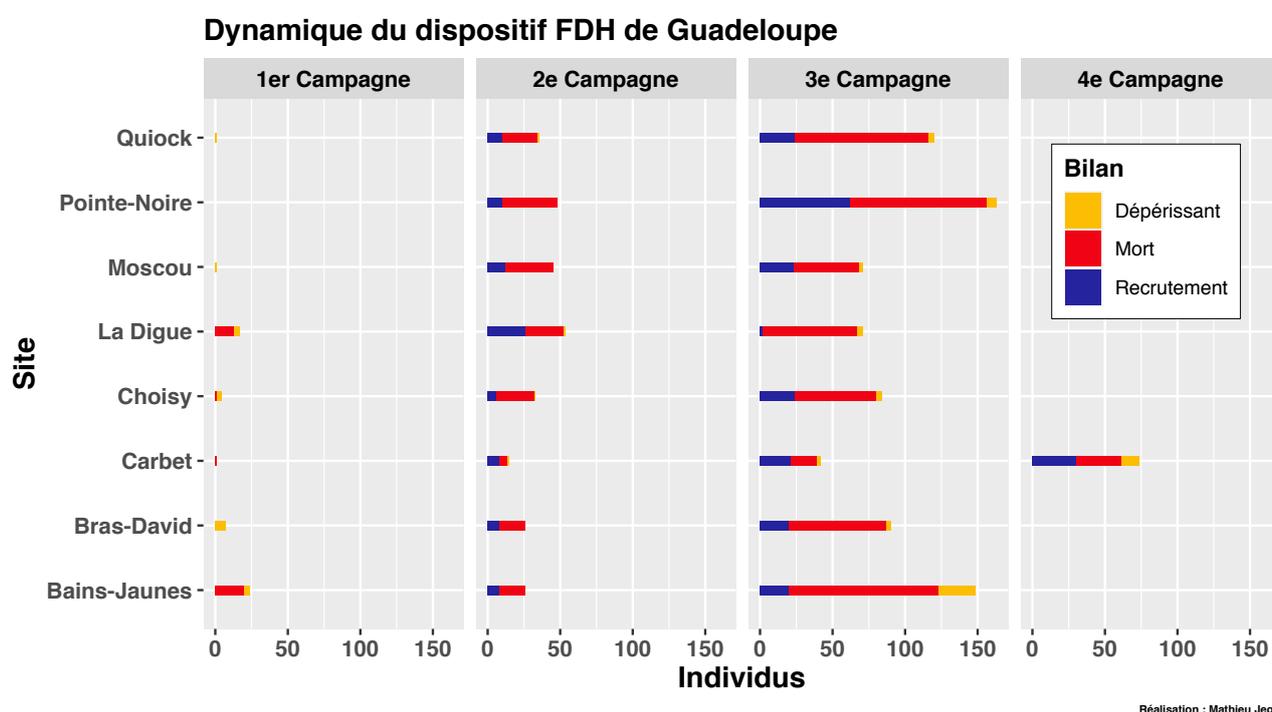


FIGURE 3.39: Dynamique centrée sur l'évolution de la mortalité et le recrutement

3.3.2 Évolution des accroissements sur 3 campagnes

Afin de parvenir à des résultats plus fins, il a fallu nettoyer les données et réduire le nombre d'individus à rentrer dans l'analyse.

Premièrement, tous les individus avec des valeurs négatives d'accroissement ont été retirés, ainsi que les valeurs aberrantes (probablement des confusions entre mm et cm lors du travail de terrain ou dans l'alimentation de la base). De plus, tous les individus "estimés" ont été *de facto* enlevés puisqu'une seule mesure a été prise lors de la première campagne. Ensuite, il va de soi que tous les individus recrutés ou morts n'ont pu obtenir les trois mesures successives nécessaires et n'ont donc pas pu être analysés. Enfin les fougères et palmiers,

du fait de leurs croissances spécifiques, ont été retirés de l'analyse.

Par conséquent, sur le jeu de données initial, on obtient des résultats d'accroissement basés sur 5 144 individus. Les figures 3.40 et 3.41 résument statistiquement ces individus en fonction des deux périodes.

```
> Arbres_FDH_Guadeloupe %>%
+ group_by(site, Periode)%>%
+ get_summary_stats(Accroissement, type = "full")
# A tibble: 16 x 15
  site      Periode  variable      n  min  max median  q1  q3  iqr  mad  mean  sd  se  ci
  <fct>    <chr>    <chr>    <dbl> <dbl>
1 Bains-Jaunes "Période 1 " Accroissement 772  0  30.5  1.35  0  5.39  5.39  2.00  3.59  4.99  0.18  0.352
2 Bains-Jaunes "Période 2 " Accroissement 772  0  45.0  3.60  0.9  7.49  6.59  4.37  5.40  6.42  0.231  0.453
3 Bras-David "Période 1 " Accroissement 769  0  20.6  1.91  0  5.29  5.29  2.84  3.3  3.74  0.135  0.265
4 Bras-David "Période 2 " Accroissement 769  0  41.4  4.30  0.807  8.98  8.17  5.58  5.93  6.37  0.23  0.451
5 Carbet "Période 1 " Accroissement 858  0  15.3  0.856  0  2.83  2.83  1.27  1.94  2.65  0.091  0.178
6 Carbet "Période 2 " Accroissement 858  0  26.7  1.47  0.161  4.71  4.55  2.18  3.18  4.22  0.144  0.283
7 Choisy "Période 1 " Accroissement 603  0  25.6  1.31  0  5.49  5.49  1.94  3.48  4.68  0.191  0.375
8 Choisy "Période 2 " Accroissement 603  0  33.2  3.00  0.999  5.99  4.99  3.26  4.54  5.07  0.206  0.405
9 La Digue "Période 1 " Accroissement 520  0  28.0  1.08  0  5.36  5.36  1.60  3.45  4.84  0.212  0.417
10 La Digue "Période 2 " Accroissement 520  0  36.6  2.49  0.499  6.73  6.23  3.70  4.79  5.96  0.262  0.514
11 Moscou "Période 1 " Accroissement 607  0  25.4  1.20  0  3.43  3.43  1.77  2.38  3.36  0.136  0.268
12 Moscou "Période 2 " Accroissement 607  0  32.6  2.30  0.659  4.94  4.28  2.93  3.75  4.60  0.187  0.367
13 Pointe Noire "Période 1 " Accroissement 282  0  23.6  1.84  0.207  6.52  6.31  2.73  4.25  5.32  0.317  0.623
14 Pointe Noire "Période 2 " Accroissement 282  0  27.0  4.20  1.24  9.15  7.91  5.12  6.24  6.38  0.38  0.748
15 Quiock "Période 1 " Accroissement 733  0  18.2  1.44  0  4.78  4.78  2.14  3.02  3.70  0.137  0.269
16 Quiock "Période 2 " Accroissement 733  0  25.6  3.40  1.20  6.92  5.72  3.85  4.74  4.63  0.171  0.336
```

FIGURE 3.40: Synthèse accroissement (mm/an) par site sur les deux périodes

```
> Arbres_FDH_Guadeloupe %>%
+ group_by(taxon, Periode) %>%
+ mutate(Individus = n()) %>%
+ filter(Individus>150) %>%
+ ungroup() %>%
+ filter(taxon != "Indet") %>%
+ group_by(taxon, Periode)%>%
+ get_summary_stats(Accroissement, type = "full")
# A tibble: 20 x 15
  taxon      Periode  variable      n  min  max median  q1  q3  iqr  mad  mean  sd  se  ci
  <fct>    <chr>    <chr>    <dbl> <dbl>
1 Amanoa caribaea "Période 1 " Accroissement 559  0  28.0  3.92  0.785  7.88  7.10  4.96  5.03  4.99  0.211  0.414
2 Amanoa caribaea "Période 2 " Accroissement 559  0  33.2  5.60  2.14  10.7  8.57  5.92  7.19  6.28  0.266  0.522
3 Byrsonima trinitensis "Période 1 " Accroissement 185  0  12.2  0.955  0  3.63  3.63  1.42  2.14  2.56  0.188  0.371
4 Byrsonima trinitensis "Période 2 " Accroissement 185  0  23.0  2.11  0.659  5.38  4.72  2.84  3.73  4.33  0.319  0.628
5 Dacryodes excelsa "Période 1 " Accroissement 531  0  23.6  3.02  0.912  7.33  6.41  3.71  4.48  4.38  0.19  0.373
6 Dacryodes excelsa "Période 2 " Accroissement 531  0  28.2  3.74  1.46  7.19  5.74  4.09  5.14  5.04  0.219  0.43
7 Myrcia amazonica "Période 1 " Accroissement 186  0  8.97  0.252  0  1.28  1.28  0.374  0.919  1.56  0.114  0.225
8 Myrcia amazonica "Période 2 " Accroissement 186  0  17.8  0.801  0  2.14  2.14  1.19  1.63  2.56  0.187  0.37
9 Myrcia deflexa "Période 1 " Accroissement 160  0  21.7  3.78  0.622  6.64  6.02  4.62  4.46  4.32  0.342  0.675
10 Myrcia deflexa "Période 2 " Accroissement 160  0  31.8  4.58  2.30  8.29  5.99  4.33  6.00  5.56  0.439  0.867
11 Myrcia neoforsteri "Période 1 " Accroissement 205  0  18.3  1.84  0  4.72  4.72  2.72  3.10  3.58  0.25  0.492
12 Myrcia neoforsteri "Période 2 " Accroissement 205  0  23.7  3.60  1.20  7.40  6.20  3.85  4.90  4.63  0.323  0.637
13 Richeria grandis "Période 1 " Accroissement 479  0  24.1  1.39  0  4.66  4.66  2.07  3.14  4.15  0.19  0.373
14 Richeria grandis "Période 2 " Accroissement 479  0  41.4  3.77  0.854  8.34  7.48  5.07  5.64  6.39  0.292  0.574
15 Rudgea citrifolia "Période 1 " Accroissement 436  0  10.2  0  0  0.641  0.641  0  0.553  1.23  0.059  0.116
16 Rudgea citrifolia "Période 2 " Accroissement 436  0  23.7  0.535  0  1.76  1.76  0.793  1.50  2.78  0.133  0.261
17 Sterculia caribaea "Période 1 " Accroissement 164  0  27.8  1.04  0  3.55  3.55  1.55  2.91  4.67  0.364  0.719
18 Sterculia caribaea "Période 2 " Accroissement 164  0  32.6  2.56  0.498  6.62  6.12  3.67  4.39  5.24  0.409  0.807
19 Tapura latifolia "Période 1 " Accroissement 775  0  25.4  0.892  0  2.87  2.87  1.32  2.00  2.91  0.105  0.205
20 Tapura latifolia "Période 2 " Accroissement 775  0  36.6  2.80  0.993  5.49  4.50  2.99  3.98  4.34  0.156  0.306
```

FIGURE 3.41: Synthèse accroissement (mm/an) sur les deux périodes, pour les 10 espèces les plus abondantes

Tester les 2 périodes

Ce qui nous intéresse en premier lieu sur ces accroissements, c'est d'observer des changements significatifs entre les deux périodes de mesures des trois campagnes. Pour cela, nous allons utiliser deux tests dit non-paramétriques, c'est à dire qui ne se basent pas sur

une distribution statistique. Dans notre cas, nous devons utiliser des tests non-paramétriques puisque les données d'accroissements ne suivent pas une distribution normale.

Le premier test est celui de Mann-Whitney (Wilcoxon), qui s'utilise pour comparer deux échantillons. Ici, nos deux périodes d'accroissement. Le test accepte l'hypothèse alternative, (figure 3.42), il y a donc une différence significative entre les accroissements de la première et de la deuxième période.

```
> ### Test Wilcoxon sur les 2 groupes ###
> wilcox.test(Arbres_FDH_Guadeloupe$Accroissement ~ Arbres_FDH_Guadeloupe$Periode)

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: Arbres_FDH_Guadeloupe$Accroissement by Arbres_FDH_Guadeloupe$Periode
W = 10319950, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

FIGURE 3.42: Test de Mann-Whitney (Wilcoxon)

Étant donné la taille des deux échantillons, un test de Student peut également être appliqué. Idem ci-dessous (figure 3.43), les deux périodes sont significativement différentes avec un accroissement moyen plus fort de 1.65 mm/an sur la deuxième période.

```
> ##### Test de student #####
> t.test(Accroissement~Periode, data = Arbres_FDH_Guadeloupe)

Welch Two Sample t-test

data: Accroissement by Periode
t = -17.089, df = 9539.8, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -1.834073 -1.456605
sample estimates:
mean in group Période 1 mean in group Période 2
      3.057711           4.703049
```

FIGURE 3.43: Test de Student

Tester l'influence des sites

Maintenant, il peut sembler intéressant de regarder si des différences significatives s'observent également entre les sites. Le test Mann-Whitney ne permet pas ici de comparer deux échantillons avec différents groupes (les placettes).

Le test de Kruskal-Wallis (figure 3.44) est une alternative non paramétrique qui étend le test de Wilcoxon à deux échantillons dans les cas où il y a plus de deux groupes à comparer, ce qui correspond à notre question posée. Ce test permet notamment de mesurer

l'effet de cette différence. On a donc un effet significatif "**petit**"⁸ entre les accroissements des sites. En sachant que cet effet est plus fort sur la deuxième période puisqu'on passe de 0,011 à 0,0309. Le test a été relancé sur les périodes et l'effet a été mesuré à 0.0366 donc "**petit**", mais significatif comme le test de Student et Wilcoxon.

Nous savons donc qu'il existe une différence significative entre les accroissements des placettes sur les deux périodes. Pour affiner ce résultat, un dernier test généralement associé au test de Kruskal-Wallis est le test de Dunn, qui permet justement d'identifier les groupes différenciés.

```
> ##### Test Kruskal-Wallis sur les accroissements selon la période #####
>
> res.kruskal.période.acc <- Arbres_FDH_Guadeloupe %>% kruskal_test(Accroissement ~ Période) %>%
+ print()
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr>  <int>  <dbl> <int>  <dbl> <chr>
1 Accroissement 10288    377.    1 5.17e-84 Kruskal-Wallis
> res.effet.période.acc <- Arbres_FDH_Guadeloupe %>% kruskal_effsize(Accroissement ~ Période) %>%
+ print()
# A tibble: 1 x 5
  .y.      n effsize method magnitude
* <chr>  <int>  <dbl> <chr>  <ord>
1 Accroissement 10288 0.0366 eta2[H] small
> ##### Test Kruskal-Wallis sur les accroissements selon le sites sur la période 1 #####
> res.kruskal.site.acc.période1 <- Arbres_FDH_Guadeloupe[Arbres_FDH_Guadeloupe$Période == "Période 1",] %>% kruskal_test(Accroissement ~ site) %>%
+ print()
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr>  <int>  <dbl> <int>  <dbl> <chr>
1 Accroissement 5144    63.5    7 3.07e-11 Kruskal-Wallis
> res.effet.site.acc.période1 <- Arbres_FDH_Guadeloupe[Arbres_FDH_Guadeloupe$Période == "Période 1",] %>% kruskal_effsize(Accroissement ~ site) %>%
+ print()
# A tibble: 1 x 5
  .y.      n effsize method magnitude
* <chr>  <int>  <dbl> <chr>  <ord>
1 Accroissement 5144 0.0110 eta2[H] small
>
> ##### Test Kruskal-Wallis sur les accroissement selon le sites sur la période 2 #####
> res.kruskal.site.acc.période2 <- Arbres_FDH_Guadeloupe[Arbres_FDH_Guadeloupe$Période == "Période 2",] %>% kruskal_test(Accroissement ~ site) %>%
+ print()
# A tibble: 1 x 6
  .y.      n statistic    df      p method
* <chr>  <int>  <dbl> <int>  <dbl> <chr>
1 Accroissement 5144    166.    7 2.11e-32 Kruskal-Wallis
> res.effet.site.acc.période2 <- Arbres_FDH_Guadeloupe[Arbres_FDH_Guadeloupe$Période == "Période 2",] %>% kruskal_effsize(Accroissement ~ site) %>%
+ print()
# A tibble: 1 x 5
  .y.      n effsize method magnitude
* <chr>  <int>  <dbl> <chr>  <ord>
1 Accroissement 5144 0.0309 eta2[H] small
```

FIGURE 3.44: Test de Kruskal-Wallis

La figure 3.45 est intéressante puisqu'elle permet de condenser les différents tableaux et écrits précédents. Cette fois-ci, on observe davantage la différence significative mesurée entre les accroissements de la première et deuxième période. Grâce au test de Dunn, on observe les différences inter-sites. Les étoiles correspondent au niveau de significativité des différences observées.

Sur la première période, les différences se concentraient sur l'éloignement de Carbet (et plus légèrement Moscou) par rapport aux autres .

8. Les valeurs d'interprétation couramment utilisées dans la littérature sont : 0,01- < 0,06 (petit effet), 0,06 - < 0,14 (effet modéré) et >= 0,14 (effet important). (Source : www.datanovia.com)

Sur la deuxième période c'est un peu plus complexe. C'est d'ailleurs pour cela que l'effet avait été mesuré plus fort par le test de Kruskal-Wallis. Ici, le couple Carbet / Moscou est clairement dissocié des autres, avec des accroissements significativement plus faibles que sur les autres placettes, notamment par rapport aux placettes de Pointe-Noire et Bras-David.

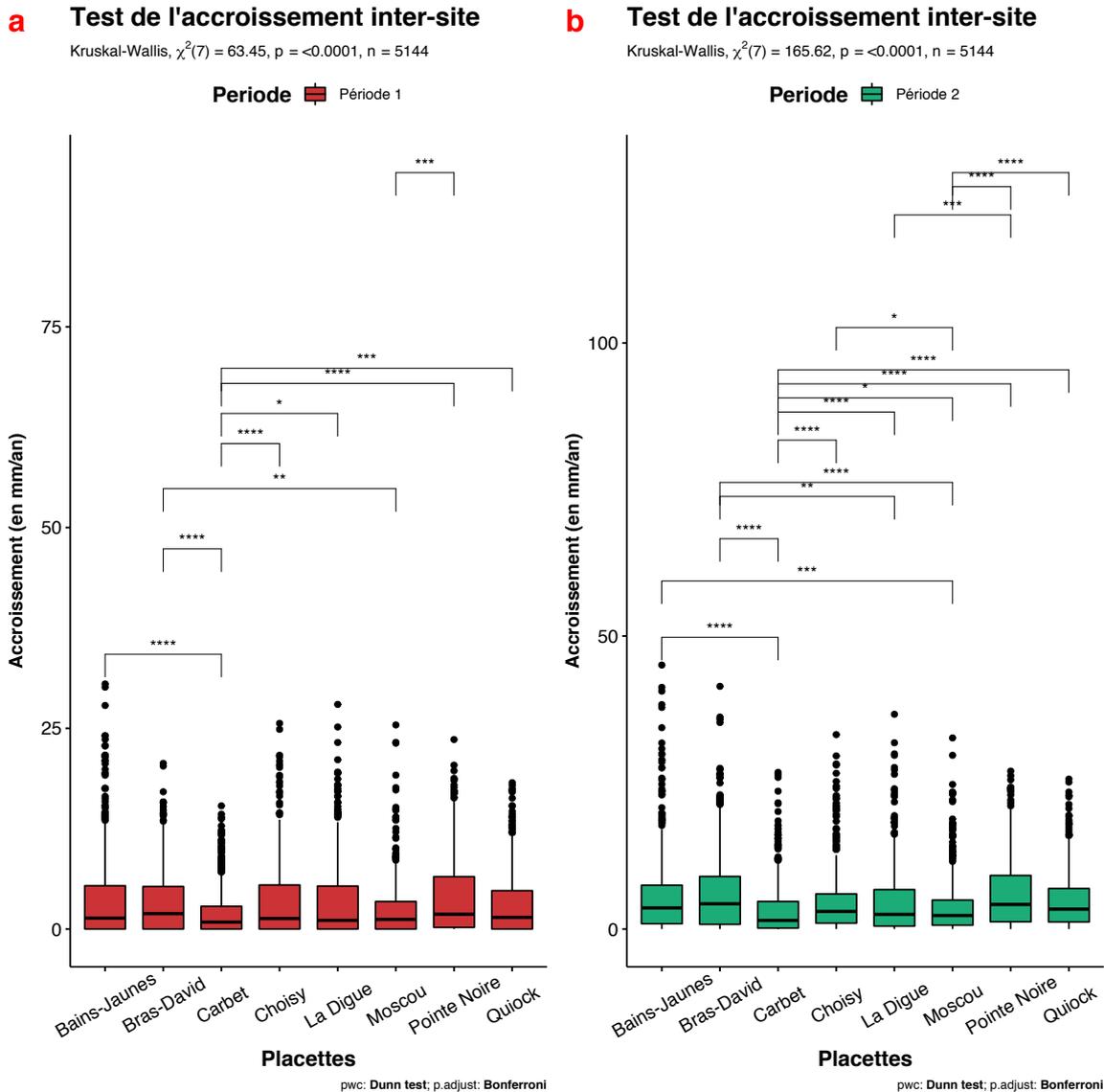


FIGURE 3.45: Comparaison des test de Dunn sur les deux périodes d'accroissements

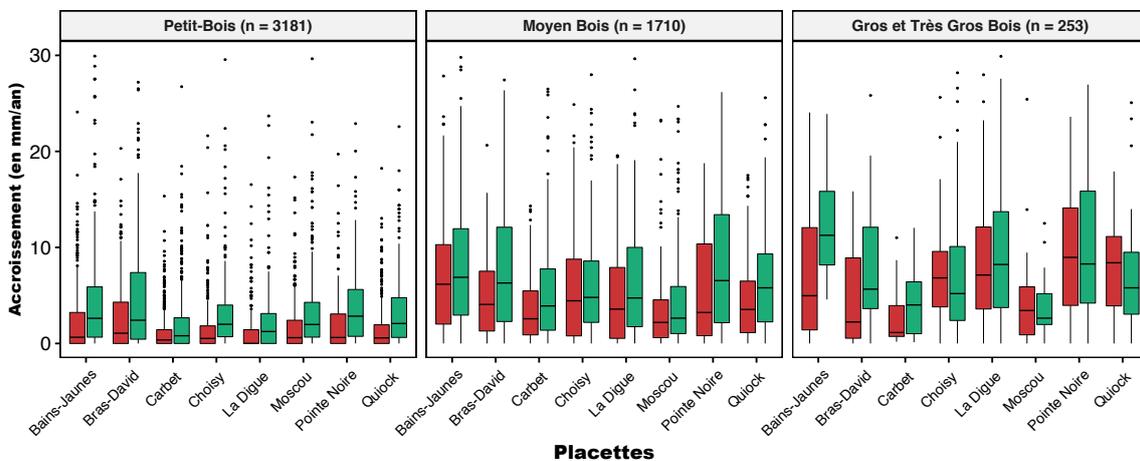
3.3.3 Comparaison entre les accroissements et l'évolution de la surface terrière

On peut rentrer plus en détail sur ces accroissements au sein des placettes. L'évolution des accroissements peut être observée également sous l'angle de la production primaire, par le biais la surface terrière que l'on peut séparer sur les deux périodes. L'intérêt premier de cette représentation est de pondérer ces accroissements par le facteur taille des individus, lui même dépendant de l'espèce mais aussi des conditions stationnelles. En effet, on

imagine assez facilement que 2 mm d'accroissement par an, n'ont pas le même impact en productions sur un individu de 10 cm de diamètre, que sur un individu de 80 cm de diamètre. Les résultats qui vont suivre donnent une idée des productions à l'hectare, mais il est important de considérer que beaucoup d'individus ont été sortis des analyses, dont les "estimés", puisqu'il était nécessaire d'avoir deux mesures d'accroissements successives. Malgré tout, cette donnée de surface terrière peut être interprétée comme un proxy de l'évolution de la biomasse produite. Il ne s'agit cependant que d'un bilan positif puisque la perte de biomasse (dégradation du bois mort et de la litière du sol) ne peut, à l'heure actuelle, être estimée.

a **Accroissement des individus**

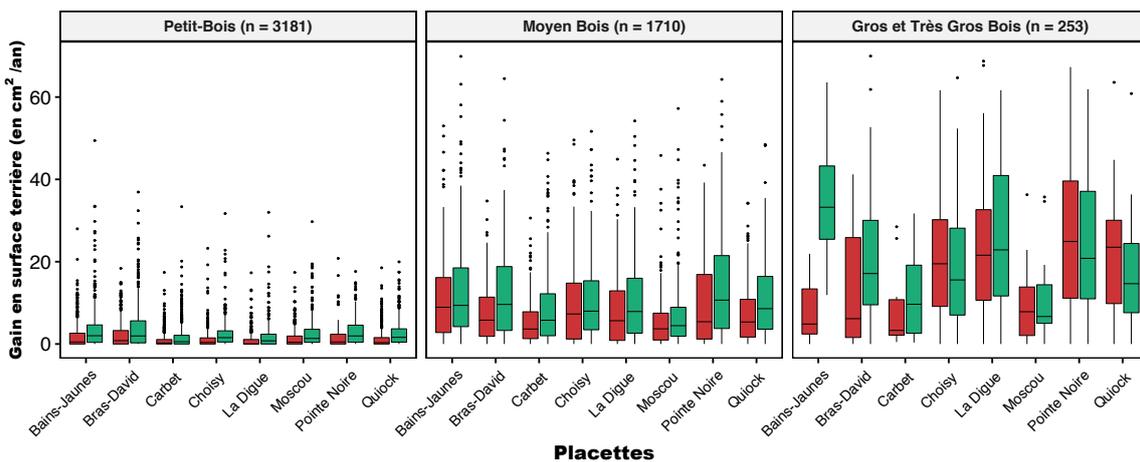
Nombre d'individus = 5 144



valeurs aberrantes non visibles: 18

b **Surface terrière des individus**

Nombre d'individus = 5 144



valeurs aberrantes non visibles: 24

Période ■ Période 1 ■ Période 2

FIGURE 3.46: Evolution des accroissements et surface terrière des individus par placette et par catégorie de taille

Confirmation de la différence significative entre les 2 périodes

Sur la figure 3.46 ci-dessus, on observe clairement la différence mesurée par le précédent test entre les deux périodes. Tous les boxplots⁹ de chaque site ont une démarcation nette entre les deux périodes.

Toujours sur cette même figure, on observe la distinction entre les deux visions avec d'un côté l'accroissement strict et de l'autre la surface terrière. Ces deux mesures sont catégorisées par classe de taille et l'on comprend l'intérêt de garder en tête ce critère de taille. En effet, sur la figure 3.45, l'accroissement était d'une certaine manière "noyé" dans le pool d'individus très hétérogènes du fait des critères de taille et d'espèce. On peut, grâce à cette approche, observer davantage la vigueur du dispositif par catégorie, puisque le poids des gros arbres est mieux pris en compte. On remarque déjà sur la figure 3.46 - a, que les petits individus ont tendance à posséder de faibles accroissements et inversement pour les gros arbres, mais la figure 3.46 - b accentue bien plus cet écart de poids entre les individus. Enfin, cette figure confirme aussi la vigueur plus faible des individus présents sur Carbet et Moscou, ce qui interroge sur la dynamique locale.

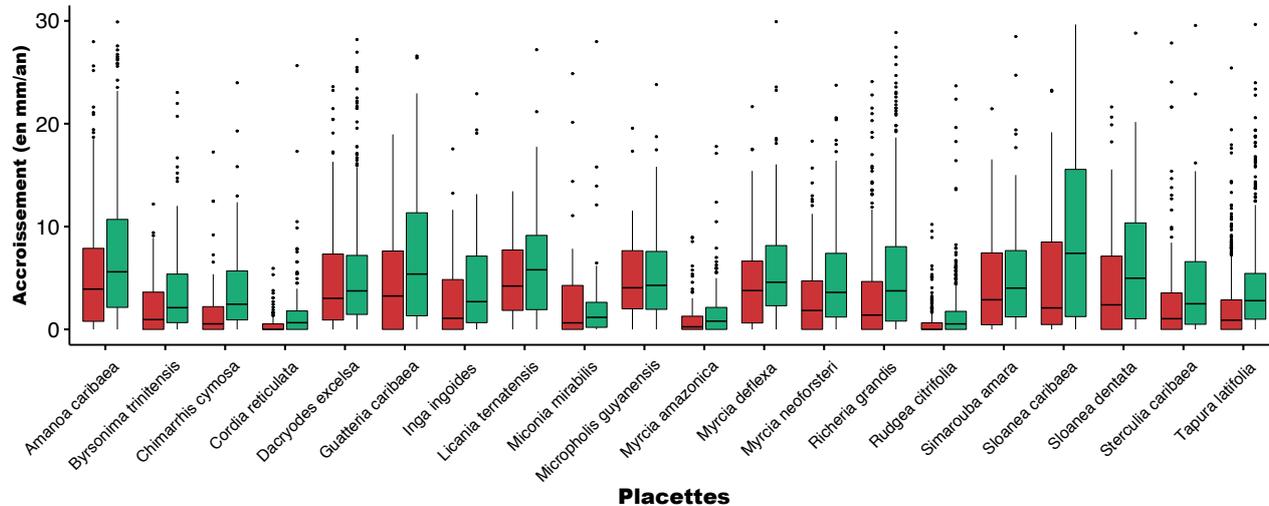
Puisque l'on remarque cette différence marquée entre petits et gros arbres sur la production primaire individuelle, on se doute que la densité d'individus d'une placette sera un autre élément essentiel pour mesurer de manière équitable l'état de santé des placettes (d'un point de vue production de biomasse). Il sera aussi important à l'avenir de se focaliser sur une mesure plus fréquente des arbres "estimés" qui auront sans aucun doute une part importante de cette production. Un suivi annexe spécifique, serait une possibilité.

La figure 3.47 ci-dessous permet d'observer les espèces qui ont le plus de chances de participer à la surface terrière d'un site (c'est à dire de croissance forte et de grande taille). On retrouve donc les arbres majeurs du dispositif, qui sont d'ailleurs représentés précisément sur chaque placette sur la figure 3.48. Les distinctions entre les espèces productives et moins productives sont d'ailleurs plus nettes sur la figure 3.47 - b (surface terrière) que sur la figure 3.47 - a (accroissement).

9. Pour rappel, un boxplot (ou boîte à moustache) schématise 4 types de données statistiques descriptives. Le premier quartile (ligne inférieure de la boîte) qui correspond au seuil de 25 % des individus. Le troisième quartile (ligne supérieure de la boîte) qui correspond au seuil de 75 % des individus. La ligne au sein de la boîte correspond à la médiane (à ne pas confondre avec la moyenne), avec 50 % des individus se trouvant de part et d'autres de cette limite. La boîte elle-même représente donc 50 % des individus. Les moustaches représentent les 25% inférieurs et supérieurs des données. Enfin les points correspondent aux valeurs très éloignées (aberrantes).

a Accroissement des individus

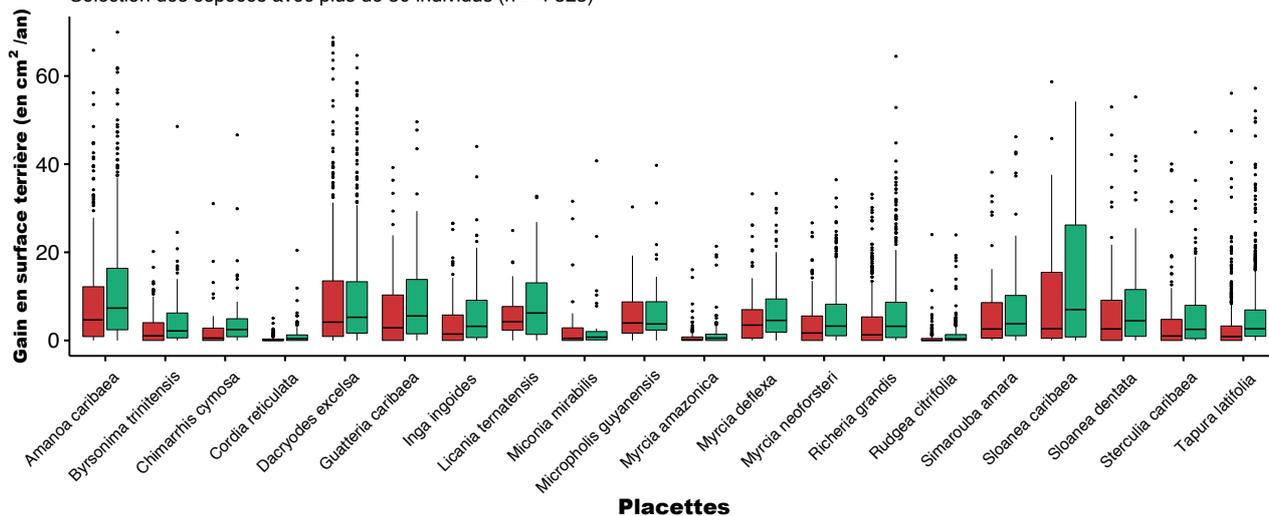
Sélection des espèces avec plus de 30 individus (n = 4 323)



valeurs aberrantes non visibles: 11

b Surface terrière des individus

Sélection des espèces avec plus de 30 individus (n = 4 323)



valeurs aberrantes non visibles: 21

Période ■ Période 1 ■ Période 2

FIGURE 3.47: Évolution des accroissements et surface terrière des individus par espèce

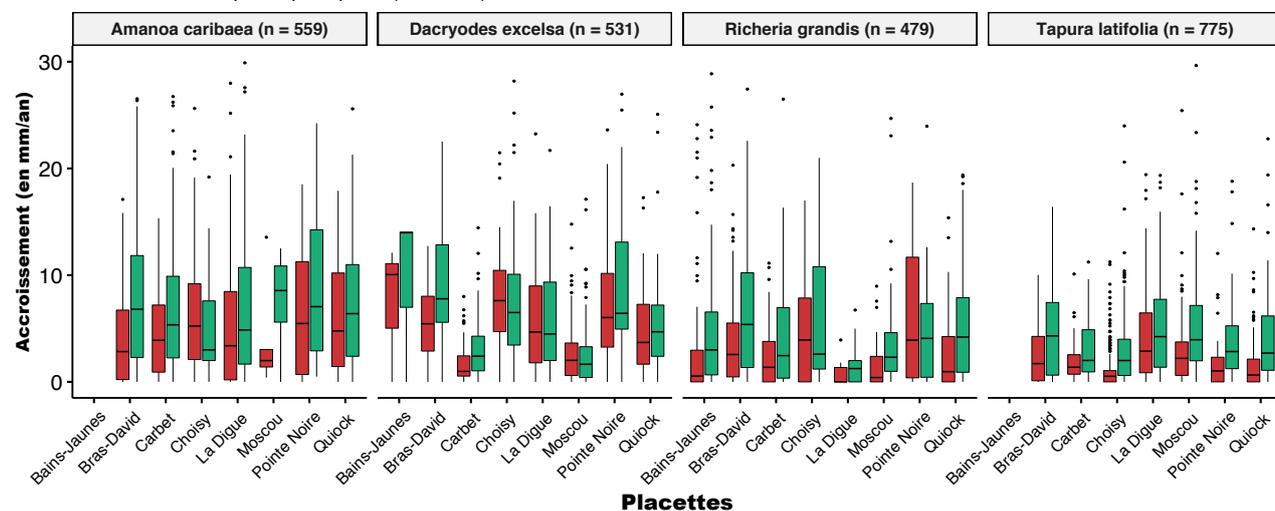
Par conséquent, les compositions en espèces des placettes seront déterminantes sur leur production. Le fait par exemple que Bains-Jaunes ne soit quasiment pas composé de ces espèces majeures sera intéressant à comparer avec les autres placettes (sous-partie suivante). On l’observe sur la figure 3.48 avec l’absence d’*Amanoa caribaea* et *Tapura latifolia*. Il est d’ailleurs pertinent d’observer, encore une fois, la différence de vigueur entre les placettes de Moscou et Carbet et le reste des placettes, notamment sur les accroissements et surfaces terrières de *Dacryodes excelsa* qui sont clairement inférieurs.

Toujours sur cette figure 3.48, on observe la distinction entre le poids élevé des *Amanoa caribaea* et *Dacryodes excelsa* face au poids en biomasse plus faible des *Richeria grandis*

et *Tapura latifolia*.

a Accroissement des individus

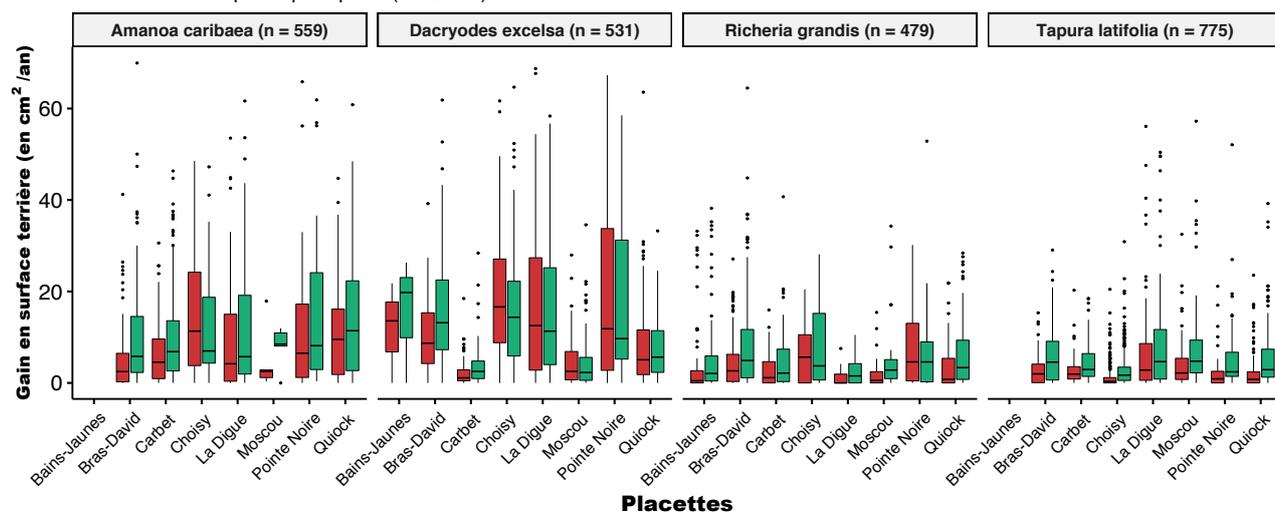
Sélection des 4 espèces principales (n = 2 344)



(valeurs aberrantes non visibles: 6)

b Surface terrière des individus

Sélection des 4 espèces principales (n = 2 344)



(valeurs aberrantes non visibles: 17)

Période ■ Période 1 ■ Période 2

FIGURE 3.48: Evolution des accroissements et surface terrière des individus sur les 4 espèces principales du dispositif

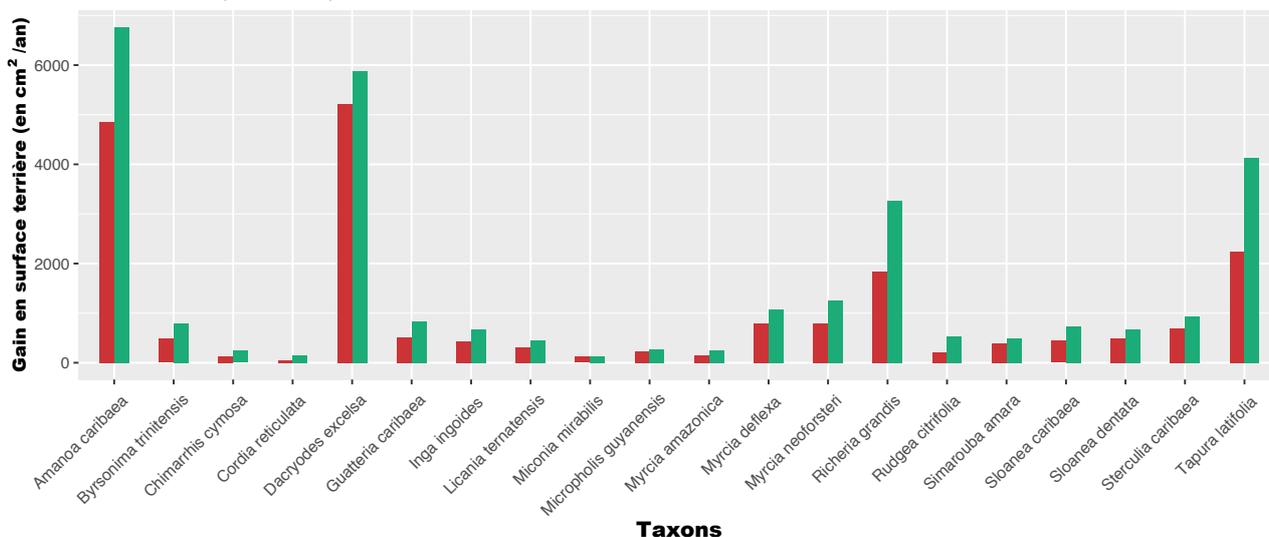
Ces graphiques permettent donc de détailler davantage les accroissements globaux des placettes de la figure 3.45. Ce qui manque désormais à ces représentations, c'est la prise en compte de la densité des individus et donc de regarder ces surfaces terrières à l'échelle du peuplement et non plus de l'individu. C'est pour cela que les résultats d'évolution des surfaces terrières cumulées donnent une meilleure idée de la production et donc de l'état de santé de cet échantillon de forêt dense humide.

Production annuelle

Dans les sous-parties précédentes, nous avons pu observer que les accroissements étaient en accélération sur toutes les placettes et chez la quasi totalité des espèces (à l'échelle individuelle des arbres). Pour terminer sur les résultats d'accroissements et avant de passer à la discussion, les deux dernières figures sont très intéressantes puisqu'elles représentent le poids global de la production pour les espèces (figure 3.49) et pour les sites (figure 3.50).

a Gain cumulé en surface terrière

Sélection des espèces avec plus de 30 individus



b Gain cumulé en surface terrière

Sélection des 6 espèces principales

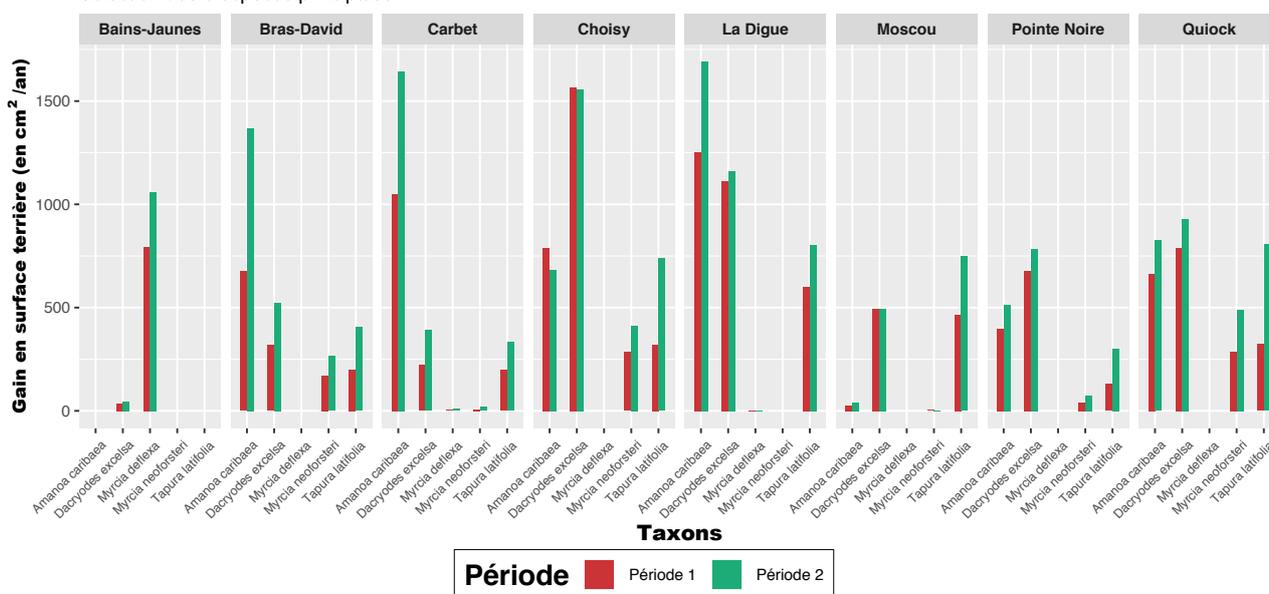


FIGURE 3.49: Accroissement cumulé de la surface terrière entre les deux périodes

On retrouve donc les quatre espèces majeures du dispositif qui sont les plus contributrices à cette production de biomasse, suivit par *Myrcia neoforsteri* et *Myrcia dellexa*. Ces quatre

espèces cumulent 20 000 cm²/an de surface terrière. Si l'on observe les différences entre période, elles sont très marquées sur ces espèces à l'exception de *Dacryodes excelsa* qui dénote d'une accélération plus anecdotique en comparaison.

Sur la figure 3.49 - b, on pourrait déduire que Bains-Jaunes devrait souffrir d'un déficit de production, puisque cette placette est faiblement représentée par les espèces majoritaires du réseau. Or, sur la figure 3.50, Bains-Jaunes apparaît comme la deuxième placette la plus productive sur la deuxième période. Cela signifie qu'un apport important en biomasse est attribuable à la diversité en espèce sur Bains-Jaunes. Sur ce graphique, il est important de préciser les densités d'individus pris en compte pour chaque placette pour relativiser chaque résultat. On obtient un nombre d'individus analysés pour :

- **Bains-Jaunes** : 772
- **Bras-David** : 769
- **Carbet** : 858
- **Choisy** : 603
- **La Digue** : 520
- **Moscou** : 607
- **Pointe-Noire** : 282
- **Quiock** : 733

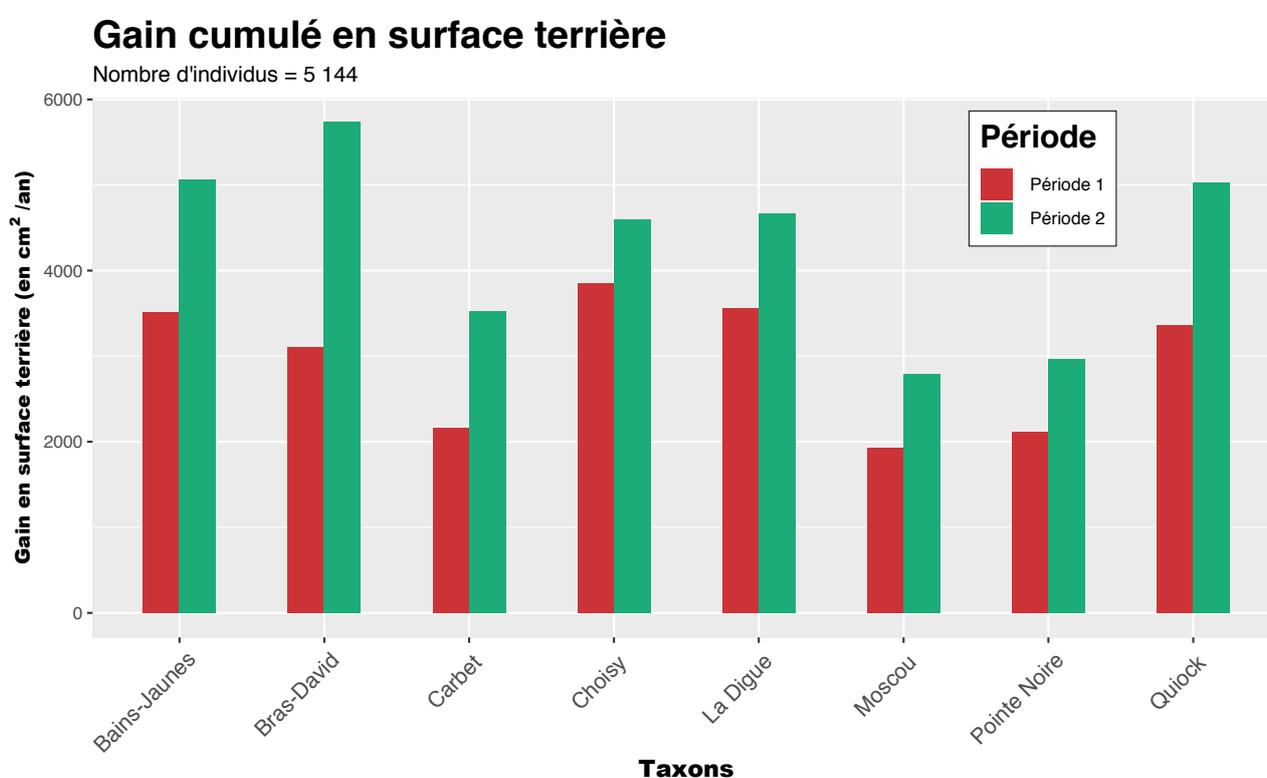


FIGURE 3.50: Accroissement cumulé de la surface terrière entre les deux périodes

Sur la première période (en rouge) on observe un gain global en surface terrière de 23 614 cm²/an (2,3 m²/an) contre 34 363 cm²/an (3,4 m²/an) sur la deuxième période (en vert), soit une hausse de 45 %.

Une nouvelle fois, c'est bien Moscou et Carbet qui se distingue par leur plus faible gain en biomasse globale. Pointe-Noire est certes du même ordre de grandeur, mais les chiffres obtenus ne reposent que sur l'accroissement de 282 arbres, soit trois fois moins que Carbet et 2 fois moins que Moscou. Ce graphique, en réalité, démontre que Pointe-Noire est bien la placette la plus productive si l'on rapporte cela à la moyenne par individu, suivi de La Digue et Choisy (figure 3.51 ci-dessous).

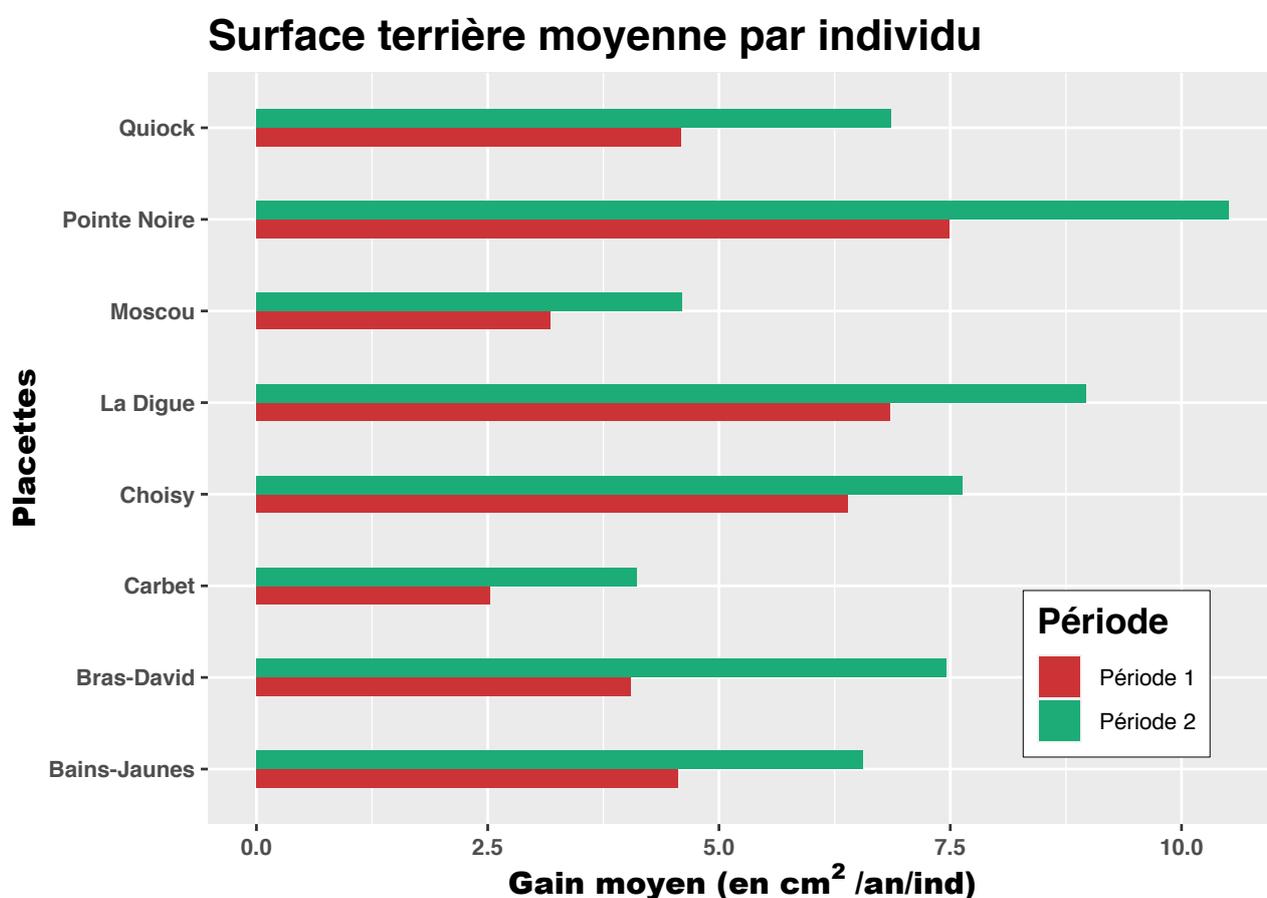


FIGURE 3.51: Productivité moyenne des individus par placette

Chapitre 4

Discussion

Malgré la jeunesse globale du réseau de placettes forestières, ce rapport permet déjà d'entrevoir les possibilités des champs à explorer qu'offre ce dispositif. Ce rapport bilan est une synthèse de nombreux sujets qui méritent d'être approfondis séparément. C'est le cas de la structure du peuplement, de sa dynamique, des communautés hébergées et de sa biodiversité. C'est d'ailleurs l'un des premiers points à retenir, la diversité présente sur ce dispositif de 9 ha est importante avec 70 espèces (placette de Jules comprise). La Guadeloupe étant une île de taille modeste, on ne peut qu'admirer le réservoir d'espèces de macrophanérophytes que représente cette forêt dense humide et notamment le Parc national.

Originalités

Les analyses de ce rapport sont de type exploratoire et n'ont pas une portée recherche. On peut malgré tout déceler des originalités qui peuvent être discutées :

- Originalité structurelle avec des densités de tiges très élevées mais très hétérogènes selon les placettes et surtout des surfaces terrières très importantes qui semblent beaucoup plus élevées que celles observées sur les continents (comparaison effectuée par Alain Rousteau avec BCI et Paracou).

Le stockage carbone et le changement climatique sont des thèmes de recherche qui ont explosé ces vingt dernières années, et cette structuration singulière saurait certainement apporter des résultats intéressants.

Un autre point en lien avec la structure, mais non traité dans ce rapport, est l'âge de ce peuplement et des individus qui le composent. On ne peut s'empêcher de penser que l'histoire et la diversité géologique de l'île jouent un rôle clé dans le développement et la dynamique des communautés (voir figure 2.10, 2.11 et 2.12). Combien de temps a-t-il fallu à cette forêt pour acquérir une telle complexité structurelle ?

Si l'on s'intéresse à l'âge actuel des arbres de la forêt, on peut chercher des bribes d'indices dans les résultats d'accroissement. En effet, les espèces potentielles de pente comme *Tapura latifolia* et *Dacryodes excelsa* ont semble-t-il une croissance plus lente que des espèces de plateau comme *Amanoa caribaea*. Or, Pointe-Noire est fortement représenté par de très gros individus sur de très fortes pente. Elle est donc probablement la placette possédant les individus les plus anciens du dispositif.

Bains-Jaunes est, quant à elle, caractérisée par un fort éloignement vis à vis des espèces hébergées sur le reste du dispositif, ce qui peut s'expliquer par sa localisation en altitude d'une part, mais aussi par la particularité historique du site, avec une éruption volcanique (de type magmatique) d'ampleur il y a plus de 500 ans. Selon Alain Rousteau, une explication plausible est que les espèces majeures n'ont pas encore eu le temps de s'y installer, mais que la phase de colonisation viendra.

La structure actuelle de la placette de Bains-jaunes témoigne que la forêt se reconstitue vite et donc de sa capacité à encaisser les stress majeurs (éruptions, cyclones). De telles capacités sont-elles spécifiques aux forêts des îles tropicales volcaniques? Difficile à dire, mais connaître l'âge du peuplement, ses mécanismes de cicatrisation post-catastrophes naturelles et les méthodes de re-colonisation forestière dans les successions serait clairement un point clé pour anticiper des événements majeurs, notamment dans le contexte actuel du massif de la soufrière, en activité sismiques croissantes depuis 1992 et plus récemment depuis avril 2018.

- Originalité dans la dynamique avec :

1. une accélération de la mortalité qui peut être imputable au cyclone Maria notamment pour Bains-Jaunes mais qu'il est difficile de généraliser aux autres placettes.
2. une autre accélération difficilement interprétable, il s'agit de l'accélération de l'accroissement cambial global sur le dispositif entre les deux périodes de mesures.

Ces deux accélérations assez antagonistes posent question sur l'état de santé du peuplement. Une hypothèse d'un taux de CO_2 de plus en plus élevé peut être proposé pour expliquer cette accélération mais le passage du cyclone Maria, suivit d'une accélération de l'accroissement ne semble pas intuitif au premier abord.

Autre point de questionnement, la particularité locale de la dynamique sur les placettes de Carbet et Moscou. Ces placettes ont, il est vrai, une structure similaire (figure 3.15) mais sont très différentes en terme de communautés hébergées, étant donnés les résultats des analyses factorielles (figure 3.25). On peut donc supposer que des conditions stationnelles spécifiques contraignent davantage la dynamique locale. C'est également sur ces placettes que la mortalité¹ a été la plus basse (figure 3.39).

1. Parenthèse importante, il faut re-préciser aussi que près de 10 % des individus ne sont pas identifiés taxono-

En dehors de cette spécificité locale du versant est de la Soufrière, la dynamique semble influencée par les communautés locales qui d'ailleurs sont nombreuses sur le dispositif et témoignent de conditions écologiques particulières quasiment sur chacun des sites, d'où les résultats de l'AFDM et les nombreux clusters identifiés (figure 3.33). En effet, les résultats des analyses factorielles offrent déjà des associations intéressantes et qui pose questions sur les mécanismes sous-jacents les régissant (topographie, altitude, animaux disperseurs, structure de sol, composition chimique des sols, géologie, humidité relative locale, CO₂ atmosphérique, influence du volcanisme...)

TABLE 4.1: Évolution de la mortalité chez certaines espèces

Taxon	Campagne 2	Campagne 3	Evolution
Indet	32	88	280 %
<i>Rudgea citrifolia</i>	26	86	330 %
<i>Cyathea arborea</i>	26	71	270 %
<i>Miconia mirabilis</i>	14	58	410 %
<i>Cordia reticulata</i>	20	56	280 %
<i>Richeria grandis</i>	13	49	380 %
<i>Tapura latifolia</i>	7	39	560 %
<i>Inga ingoides</i>	9	35	390 %
<i>Guatteria caribaea</i>	10	31	310 %
<i>Myrcia deflexa</i>	3	30	1000 %
<i>Amanoa caribaea</i>	8	29	360 %
<i>Dacryodes excelsa</i>	2	27	1350 %
<i>Myrcia neoforsteri</i>	6	23	380 %
<i>Sterculia caribaea</i>	8	23	290 %
<i>Prestoea montana</i>	5	14	280 %
<i>Cecropia schreberiana</i>	3	12	400 %
<i>Myrcia amazonica</i>	3	12	400 %

On l'imagine, tous ces facteurs physico-chimiques et biologiques opèrent de concert et sont à l'origine d'une telle diversité au sein d'une seule et même méta-communauté. La composante *pente* semble être primordiale dans l'agencement des individus et sera très probablement un facteur déterminant de la dynamique (au même titre que l'humidité relative, l'ensoleillement global et la température). Les résultats d'accroissement et de gain en surface terrière nettement supérieur sur Pointe-noire en témoignent, ainsi que la mortalité qui y est très élevée alors que cette placette est la moins dense de toutes.

Ces résultats permettent aussi d'avoir, pour la première fois, une estimation de l'augmentation en surface terrière sur le dispositif qui a augmenté de 45% entre les deux périodes avec un ordre de grandeur de production comprise entre 2,3 et 3,4 m²/an sur le dispositif².

miquement, ce qui correspond à une perte d'information dans les résultats. Sur le tableau 4.1, ce sont d'ailleurs les indéterminés qui représentent la majeure partie des mortalités effectives.

2. Pour les 5 144 arbres analysés

Les analyses d'Alain Rousteau de 1996 témoignaient d'un effet de la latitude qui tendait à rendre les forêts du nord Basse-Terre moins vigoureuses et moins diversifiées (15). Cependant, on remarque que Choisy et Pointe-Noire possèdent une richesse équivalente aux autres placettes, voir même plus élevée à l'image de Pointe-Noire qui est la deuxième placette la plus riche avec 30 espèces. En sachant que c'est aussi Pointe-Noire qui a la plus faible densité d'individus avec moins de 600 tiges. Autre opposition, sur les résultats d'accroissement, c'est au contraire les individus de Pointe-Noire, la Digue et Choisy qui possèdent les plus forts accroissements en surface terrière (figure 3.51).

Encore une fois, il s'agit d'une première mesure d'évolution des accroissements qui n'est donc pas possible de comparer avec des mesures passées mais il sera intéressant de regarder si cette étrange supériorité de vigueur des forêts du nord de la Basse-Terre se confirme par les prochains suivis. Il peut très bien s'agir de cycles d'accroissement périodiques qui s'inverseront et confirmeront les observations d'Alain ROUSTEAU. Malheureusement, les mesures d'accroissements ne sont pas annuels mais tous les quatre ans ce qui rend l'attente longue pour les résultats et complique l'observation de potentiels cycles d'accroissements intra-annuels. Un suivi³ plus spécifique sur un sous-échantillon plus restreint, bien défini et suivi deux fois par an (saison humide et sèche) pourrait permettre d'obtenir plus précisément l'état de santé et la dynamique au sein du dispositif. D'autant plus si le suivi est enrichi d'un suivi micro-climatique par une station météo locale.

Toutes ces observations prouvent que la forêt ne réagit pas partout de la même manière et qu'il s'agit d'un milieu complexe. Il faut d'ailleurs garder en tête que nous observons un minuscule sous-échantillon de cette forêt (0,03 %), et que dans ce sous-échantillon, nous sous-échantillonons une nouvelle fois, en ne prenant que les individus de plus de 10 cm de diamètre. Autrement dit, on ne regarde que les individus "victorieux" de la course à la survie. Toute la dynamique et la diversité au stade plantulaire sont masquées. Or, la diversité visible repose sur ce qui se passe à ce stade. Les individus appartenant aux espèces faiblement représentées ou rares, arrivent malgré tout à se maintenir dans le temps et dans l'espace de ce vaste écosystème. Tenter de comprendre comment se maintient la diversité qu'offre cette forêt, reviendra donc un jour à s'intéresser de près à ce qui se passe en dessous du seuil des 10 cm de diamètre.

Ce rapport montre modestement mais de manière significative que la forêt évolue. On ne sait pas si ces changements sont positifs ou négatifs. Néanmoins un tel écosystème, qui représente plus de 17% du territoire total de l'archipel guadeloupéen et près de 40 % des espaces boisés, se doit d'être surveillé et mieux connu car nous n'avons, à l'heure actuelle, aucune idée des raisons précises qui induisent ces évolutions. A l'image du réseau RENECOFOR, il faudra agrémenter d'autres compartiments d'études tel que le sol et l'atmosphère

3. La disponibilité en étudiant à l'UA pourrait permettre de réaliser ce suivi annuel annexe.

pour mieux comprendre les échanges entre ces interfaces.

D'ailleurs les résultats de ce rapport permettent d'entrevoir des chiffres de production primaire par hectare, mais rien n'est connu sur les sorties vis à vis de dégradation du bois mort. Il s'agit une nouvelle fois d'un sujet de recherche intéressant et largement traité dans les laboratoires de recherche de par le monde, et qui pourrait permettre d'estimer le stockage carbone qu'offre cette forêt en le confrontant aux émissions de CO₂ de l'activité de l'homme en Guadeloupe. Les aires protégées sont bien souvent dans l'obligation de justifier leur existence vis à vis des lois non-naturelles, et cette recherche pourrait servir au Parc de la Guadeloupe qui obtiendrait un indicateur fort d'état de santé et de rôle écosystémique de la forêt qu'il protège. Un passage récent du LIDAR en Guadeloupe en 2020 sera un outil majeur dans la précision des résultats et dans l'apport d'informations complémentaires.

La modélisation spatiale de la dynamique et des communautés

Une autre manière d'approcher cette dynamique est de modéliser en de nombreux scénarios les différents éléments contribuant à cette dynamique à partir des données empiriques, que ce dispositif se charge de collecter et collectera. La modélisation nécessite de faire des hypothèses et demande donc des connaissances particulières sur les traits fonctionnels des espèces composant ce dispositif. Il faudra donc faire de la recherche sur les espèces ou groupes d'espèces (dispersion, écophysiologie...).

Un autre aspect, point fort de ce dispositif qui n'a pas été discuté ni analysé dans ce rapport, est la composante spatiale des arbres. Cette information est essentielle dans les modèles de recherche et contribue efficacement à la précision des prédictions. Or, cette information est disponible puisque tous les arbres sont géolocalisés. Les cartes des arbres spatialisés géographiquement ont été intégrées en annexe pour faciliter la visualisation.

Pour donner une idée de l'approche spatiale, on peut tenter en observant le motif des points (*points pattern* en anglais) de voir si celui-ci respecte une distribution aléatoire. Sur la figure ci-dessous 4.1, on peut constater l'agencement des arbres entre eux qui forment donc le pattern de Bains-Jaunes (les cartes des autres placettes sont en annexe). Sur la figure 4.2, il s'agit de l'analyse de ce pattern avec un léger décalage entre les valeurs théoriques (aléatoires) et les valeurs observées dans la disposition des arbres. D'une certaine manière, ce graphique montre sur Bains-Jaunes que les arbres ne se disposent pas de manière aléatoire et qu'ils tendent à une légère agrégation (au dessus de la valeur théorique). Ce test rapide s'effectue sans prendre en compte les caractéristiques des arbres telles la taille ou l'espèce. On comprend donc ici tout l'intérêt d'étudier les traits fonctionnels des espèces pour comprendre l'agencement des individus spatialement, sans compter le suivi de la dynamique actuelle qui sera une mine d'informations pour caractériser la vitalité des individus couplée à ces paramètres.

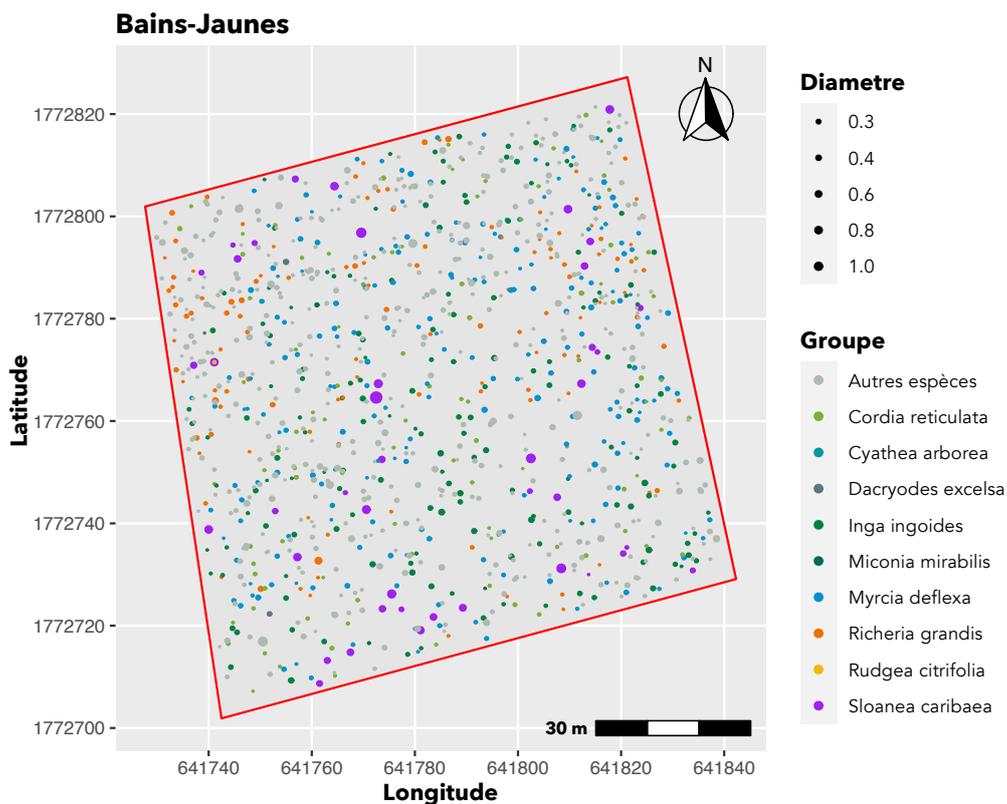


FIGURE 4.1: Pattern spatial des arbres sur Bains-jaunes

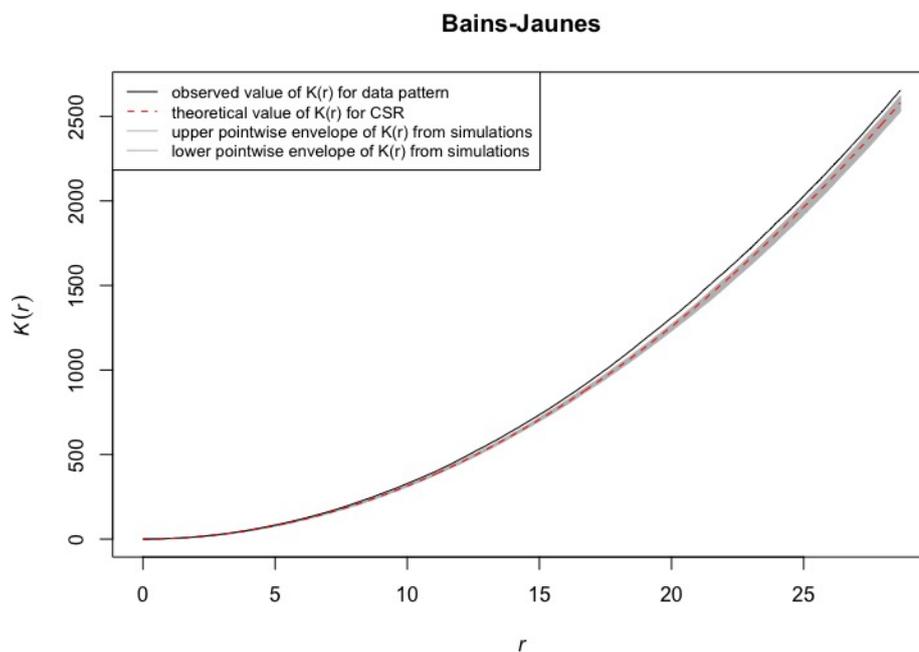


FIGURE 4.2: Utilisation de la fonction K de Ripley pour étudier l'indépendance entre les points du motif sur Bains-Jaunes

D'ailleurs, des travaux récents effectués à Paracou (*Schmitt et al. 2020*), ont permis d'étudier la variabilité des traits foliaires au sein d'un cortège d'espèces proches en terme de niche écologique. L'étude a pris en compte un gradient environnemental, l'index TWI (Topographic Wetness Index) qui correspond à l'effet de la pente sur la disponibilité en eau. Cet article, entre autres, (*Ferry et al. 2010, Allié et al. 2015*) souligne que la topographie joue un rôle crucial dans la dynamique forestière et dans la répartition des espèces au sein de leurs habitats (18). La présentation dans ce rapport des caractéristiques topographiques témoigne qu'il en sera probablement de même pour la dynamique du dispositif de la Guadeloupe.

Comprendre le fonctionnement de la biodiversité de cette FDH

La forêt de Guadeloupe offre donc une diversité fabuleuse. Cette forêt dense humide représente d'ailleurs un potentiel pool d'espèces estimé entre 82 et 100 espèces selon les estimateurs de Jackkniff et Chao. Malgré tout, cette diversité demande une connaissance spécifique des espèces pour comprendre ces agencements qui à l'heure actuelle est manquante ou éparse. Par exemple, une grande partie de cette diversité (45 espèces) est difficile à analyser dans ce travail hormis les estimations de diversité. Il serait donc intéressant de comprendre comment ces espèces, peu nombreuses voir rares au sein du dispositif, arrivent à se maintenir au sein de cortèges d'espèces abondantes et dominantes.

Connaître le fonctionnement de la biodiversité floristique forestière et son maintien est une tâche sans nul doute complexe, mais celle-ci amène également à l'observer sous un angle évolutif. Du fait de sa position au sein des Petites Antilles, la Guadeloupe, et donc ce dispositif, à tout du support pour étudier les mécanismes de la biogéographie de la flore guadeloupéenne, discipline à l'interface entre écologie, évolution et géologie. Darwin et Wallace ont d'ailleurs été les pionniers dans cette discipline en s'intéressant à la biodiversité des îles volcaniques océaniques, suivis par Wilson et MacArthur dans les années 60, qui ont développé la Théorie de biogéographie insulaire.

Une étude récente (*Valente et al., 2020*) parue dans *Nature*, a confirmé officiellement cette théorie en quantifiant les processus de colonisation, de spéciation et d'extinction par rapport à la superficie et l'isolement des îles (basé sur des données d'oiseaux d'îles océaniques). Un article du CNRS estime que cette étude "fournit des estimations statistiquement robustes de la forme précise des relations entre ces paramètres-clés du processus d'édification des faunes et des flores que sont la colonisation, la spéciation, et l'extinction". Autre point important de cet article, qui engendre un nouveau questionnement, il s'agit de l'endémisme des îles qui contrairement à l'idée reçue, provient dans cette étude en majorité de l'anagénèse plutôt que de la cladogénèse ou radiation adaptative (sens majoritaire attribué à la spéciation). Ceci pourrait d'ailleurs expliquer pourquoi l'on observe une seule espèce de Pic en Guadeloupe. Cependant, il est à l'heure actuelle impossible de savoir si

ce processus est également majoritaire pour la flore et pose question sur l'historicité de la diversité observée sur le dispositif et plus globalement en Guadeloupe.

Aujourd'hui, on estime que le mode de spéciation sympatrique est le plus important chez les végétaux, c'est à dire que c'est l'isolement reproducteur du à un changement génétique soudain qui entraîne rapidement l'apparition de nouvelles espèces sur un même territoire, tel que les îles. La taille restreinte des îles est un argument plaidant pour cette affirmation. Cependant en Guadeloupe, plusieurs caractéristiques peuvent supposer des modes de spéciation différents tel que l'allopatric (barrière géographique) du fait du volcanisme et de l'altitude.

Pour rappel, ce dispositif intègre dans ses rangs 15 espèces subendémiques qui sont identifiées, localisées et équipées. De la recherche sur l'origine de la diversité floristique de Guadeloupe en étudiant les couloirs de colonisation de ces 15 espèces, serait passionnante pour déterminer la ou les provenances des influences évolutives amenant à la diversité actuelle guadeloupéenne.

Liste des 15 espèces subendémiques du dispositif (Lien vers INPN)

1. ***Amanoa caribaea***
2. ***Byrsonima trinitensis***
3. ***Chrysobalanus cuspidatus***
4. ***Cordia reticulata***
5. ***Henriettea lateriflora***
6. ***Licania ternatensis***
7. ***Magnolia dodecapetala***
8. ***Marila racemosa***
9. ***Miconia trichotoma***
10. ***Protium attenuatum***
11. ***Rauvolfia biauriculata***
12. ***Rudgea citrifolia***
13. ***Sloanea dentata***
14. ***Sterculia caribaea***
15. ***Tapura latifolia***

Annexes

TABLE 2: Tableau de données pour AFC

Taxons	BJ	BD	CA	CH	LD	MO	PN	QU
<i>Amanoa caribaea</i>	0	203	239	68	244	5	46	88
<i>Byrsonima trinitensis</i>	39	58	65	3	2	29	0	34
<i>Chimarrhis cymosa</i>	16	0	0	2	19	2	23	0
<i>Chrysobalanus cuspidatus</i>	0	0	27	0	0	10	1	1
<i>Cordia reticulata</i>	99	6	18	0	33	35	30	3
<i>Cyathea arborea</i>	0	2	4	0	1	66	56	6
<i>Dacryodes excelsa</i>	3	38	128	94	86	156	47	108
<i>Guatteria caribaea</i>	0	32	7	66	4	11	12	89
<i>Ilex sideroxyloides</i>	36	0	1	1	0	0	0	0
<i>Inga ingoides</i>	164	0	0	0	1	0	4	0
<i>Licania ternatensis</i>	0	25	0	25	0	2	1	12
<i>Marila racemosa</i>	26	0	1	0	1	9	0	0
<i>Miconia mirabilis</i>	3	57	0	16	5	2	12	7
<i>Micropholis guyanensis</i>	4	1	4	2	6	26	0	1
<i>Myrcia amazonica</i>	0	7	112	9	19	100	2	2
<i>Myrcia deflexa</i>	346	0	4	0	1	0	0	0
<i>Myrcia neoforsteri</i>	0	61	28	86	2	3	7	96
<i>Prestoea montana</i>	1	9	18	17	5	20	17	25
<i>Richeria grandis</i>	115	276	104	13	28	50	15	111
<i>Rudgea citrifolia</i>	1	115	298	33	121	68	39	115
<i>Simarouba amara</i>	22	10	7	0	11	2	2	18
<i>Sloanea caribaea</i>	43	0	0	11	28	38	8	0
<i>Sloanea dentata</i>	30	34	10	0	1	3	9	10
<i>Sterculia caribaea</i>	24	31	15	29	46	26	39	16
<i>Tapura latifolia</i>	0	83	87	334	117	228	177	265

TABLE 3: Echantillon des données AFDM

Arbre	Site	Taxon	Altitude	Pente	Taille
BJ662	Bains-Jaunes	<i>Inga ingoides</i>	813.3	12.4	26.6743684622017
BJ663	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	812.9	12.4	17.7935226376739
BJ664	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	814.1	12.5	20.8174665564199
BJ665	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	814.7	11.3	13.94197301485
BJ666	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	813	12.5	10.7907051416305
BJ667	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	814.6	17.9	12.4140855611678
BJ668	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	815	15.2	25.1146500199011
BJ669	Bains-Jaunes	<i>Inga ingoides</i>	814.7	21.8	38.1335243648181
BJ670	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	815.3	7	11.8092967774186
BJ672	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	815.6	7	19.480565034448
BJ673	Bains-Jaunes	<i>Sloanea caribaea</i>	815.7	7	44.5633840657307
BJ699	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	814.1	11.3	32.4039464135099
BJ700	Bains-Jaunes	<i>Inga ingoides</i>	814.7	11.3	26.4833825304914
BJ701	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	814.9	11.3	12.4777475384046
BJ702	Bains-Jaunes	<i>Inga ingoides</i>	814.6	11.1	26.9290163711487
BJ703	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	814.1	11.3	18.2073254897128
BJ705	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	815.5	12.4	24.605354202007
BJ706	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	815.8	12.5	14.6422547644544
BJ707	Bains-Jaunes	<i>Sloanea dentata</i>	814.9	11.3	111.408460164327
BJ708	Bains-Jaunes	<i>Dacryodes excelsa</i>	816	11.9	26.4197205532546
BJ709	Bains-Jaunes	<i>Inga ingoides</i>	816.8	10.5	26.1332416556892
BJ710	Bains-Jaunes	<i>Richeria grandis</i>	817.3	11.3	12.6687334701149
BJ711	Bains-Jaunes	<i>Richeria grandis</i>	817.3	11.3	11.1090150278143
BJ720	Bains-Jaunes	<i>Inga ingoides</i>	815.8	10.4	24.3825372816784
BJ76	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	816.4	10.4	16.5521140815571
BJ1106	Bains-Jaunes	<i>Cordia reticulata</i>	825.4	13.6	10.1540853692629
BJ1107	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	827.5	26.8	17.0295789108328
BJ1108	Bains-Jaunes	<i>Ilex sideroxyloides</i>	828.7	17.1	12.2549306180759
BJ599	Bains-Jaunes	<i>Myrcia deflexa</i>	826	27.7	16.1064802408998
BJ600	Bains-Jaunes	<i>Inga ingoides</i>	825.9	31.4	18.9394382279355

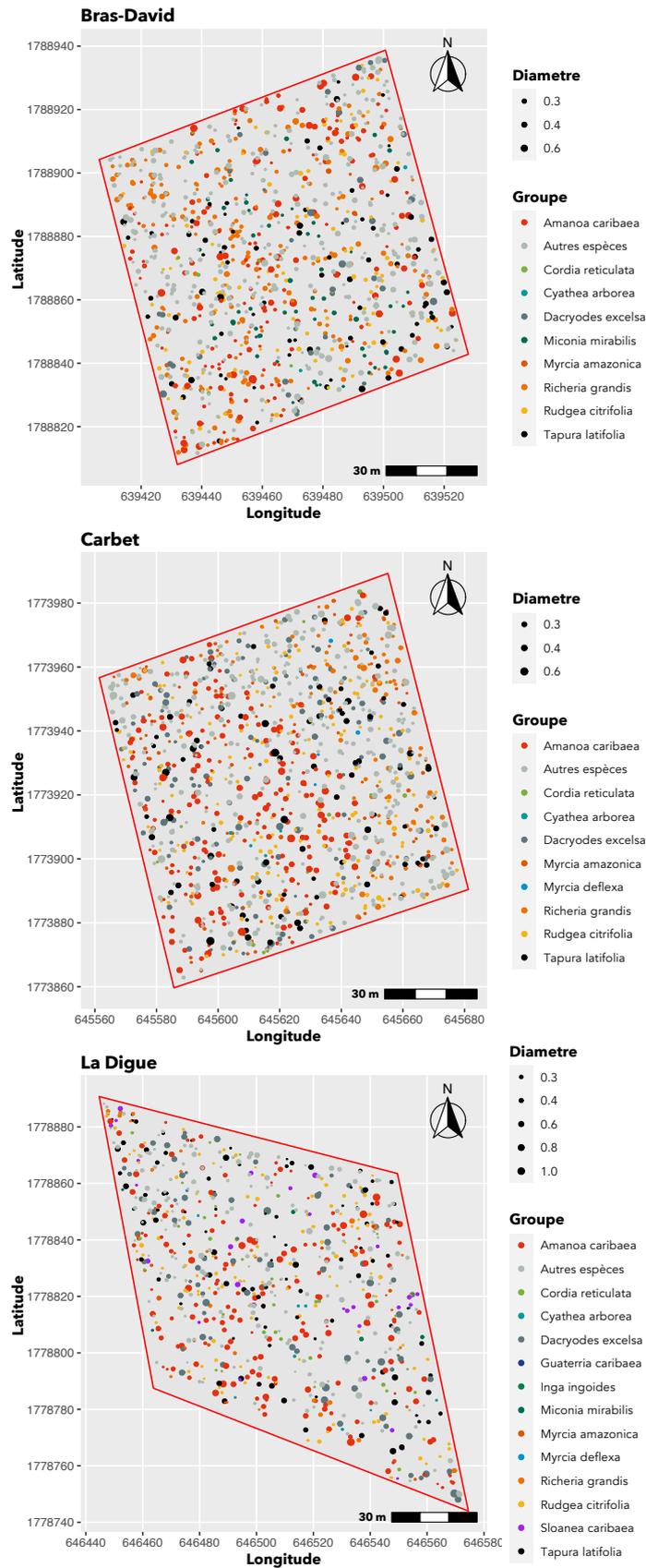


FIGURE 3: Spatialisation des arbres sur Bras-David, Carbet et La Digue

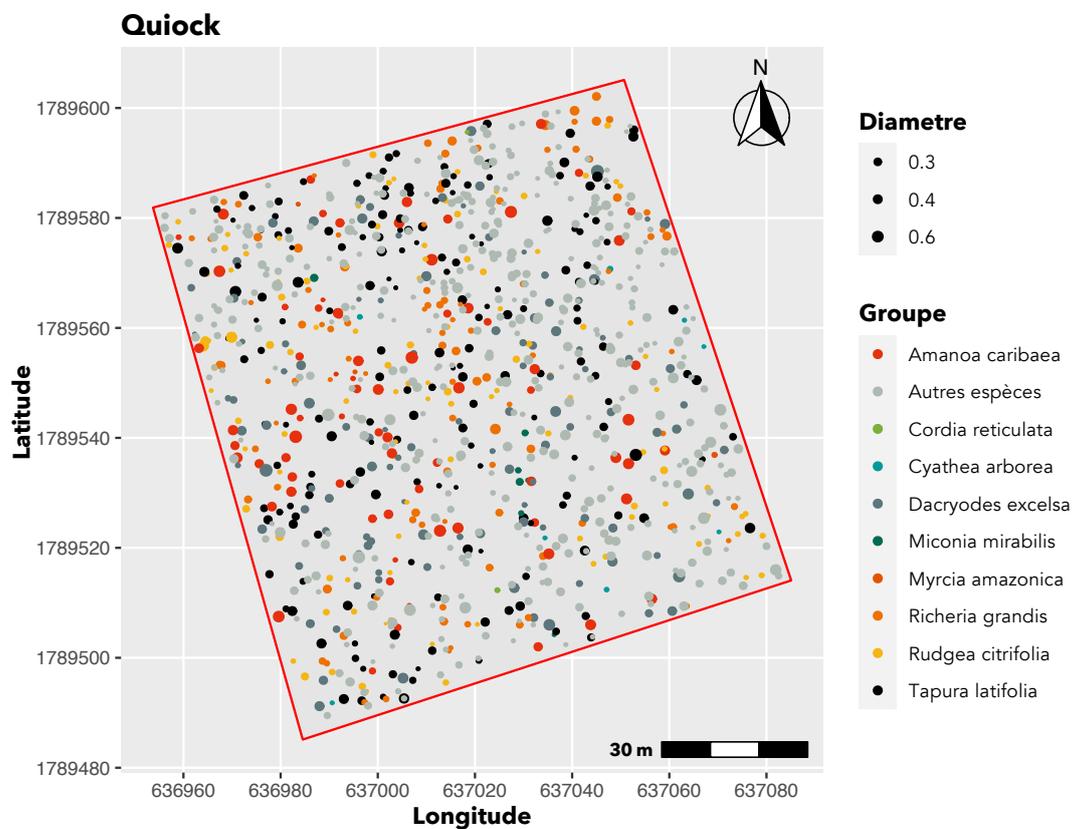
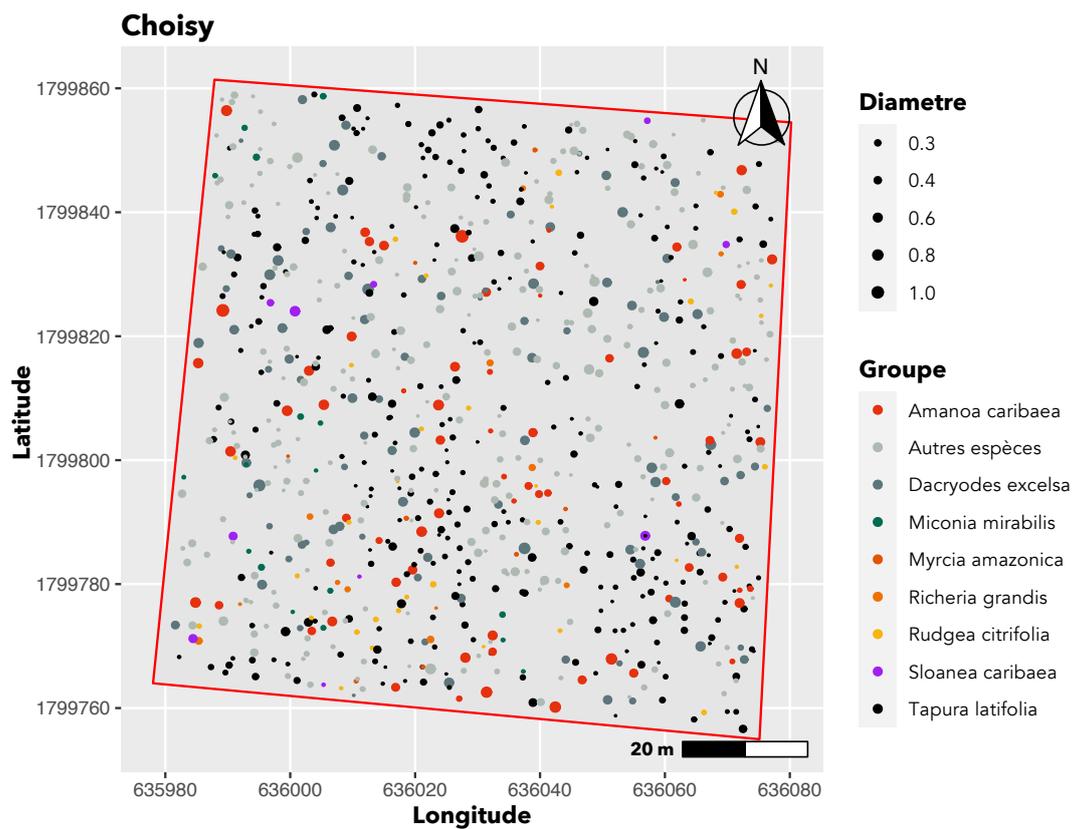


FIGURE 4: Spatialisation des arbres sur Choisy et Quiock

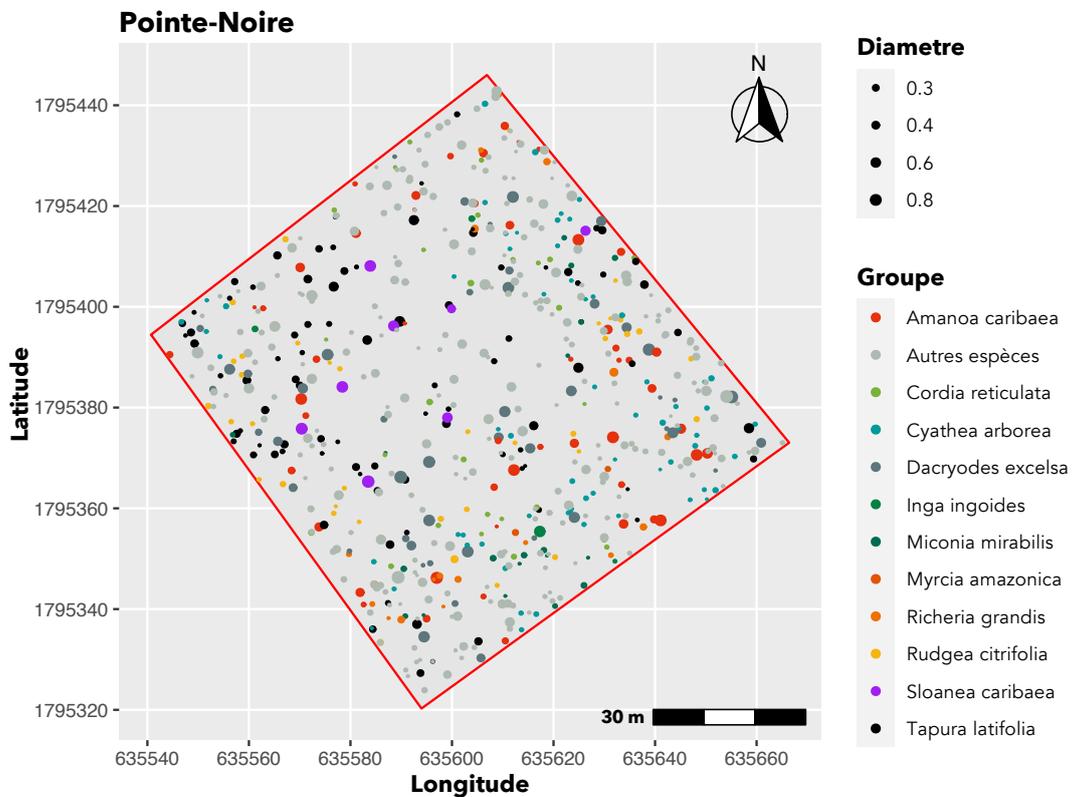
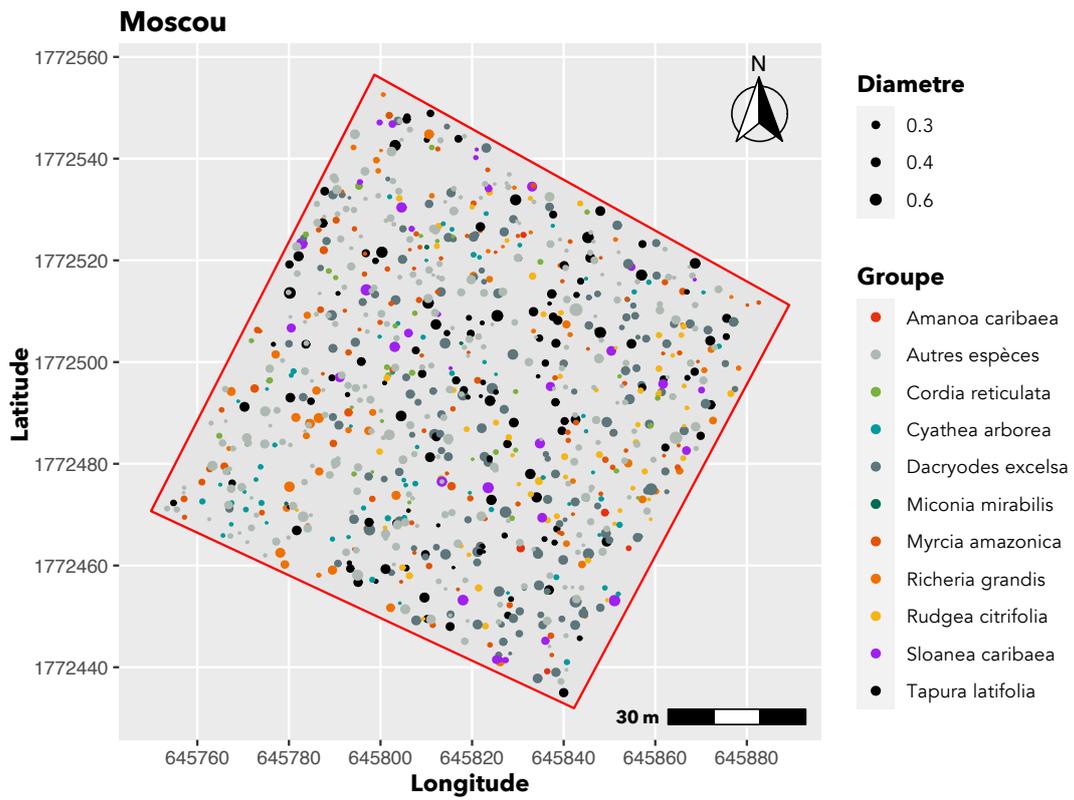


FIGURE 5: Spatialisation des arbres sur Moscou et Pointe-Noire

Bibliographie

1. BADDELEY, A., RUBAK, E. & TURNER, R. *Spatial Point Patterns : Methodology and Applications with R* Chapman and Hall/CRC. 810 p. ISBN : 978-1-4822-1020-0. <https://www.crcpress.com/Spatial-Point-Patterns-Methodology-and-Applications-with-R/Baddeley-Rubak-Turner/p/book/9781482210200> (2019) (2016).
2. CHAVENT, M. *L'Analyse des Correspondances Multiples (ACM)* Master MIMSE - 2e année (Université de Bordeaux, 2015), 17. <http://www.math.u-bordeaux.fr/%20machaven/>.
3. CHOUQUET, C. *Modele Linéaire* Cours M1 (Laboratoire de Statistique et Probabilités - Université Paul Sabatier, Toulouse, 2010).
4. DESSERT, C. Bilan des travaux réalisés dans le cadre du projet « Vulnérabilité des écosystèmes insulaires guadeloupéens aux changements climatiques », 41.
5. FAO. *Situation Des Forêts Du Monde 1995*. <http://www.fao.org/3/X6954F03.htm> (2020).
6. GALL, Y. *Compte-Rendu Placettes Permanentes 2009*.
7. GAYOT, M., ROUSTEAU, A., van LAERE, G. & FOCH, T. Dynamique des forêts humides de Guadeloupe : premiers résultats, 23 (2017).
8. JIN, Y. & QIAN, H. VPhyloMaker : An R Package That Can Generate Very Large Phylogenies for Vascular Plants. *Ecography* **42**, 1353-1359. ISSN : 0906-7590, 1600-0587. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ecog.04434> (2020) (août 2019).
9. LAERE, G. V., GALL, Y. & ROUSTEAU, A. The Forest Ecosystems Observatory in Guadeloupe (FWI), 8 (2016).
10. MARCON, E. *Mesures de la Biodiversité* (UMR EcoFog, 2018), 284.
11. METEOFRANCE. *Etude Climatologique de Sites* (Météo-France, 2013).
12. ROLLET, B., FIARD, J. P. & HUC, R. *Arbres Des Petites Antilles : Description Des Espèces* Office national des forêts (2010).
13. ROLLET, B., FIARD, J. P. & HUC, R. *Arbres Des Petites Antilles : Introduction à La Dendrologie* Office national des forêts (2010).
14. ROUSTEAU, A. Structures, flores, dynamiques : réponses des forêts pluviales des Petites Antilles aux milieux montagnards, 15 (1996).

15. ROUSTEAU, A. *Etude Bibliographique Sur Le Fonctionnement Des Forêts Ombrophiles Du Parc National de Guadeloupe* (Conservatoire Botanique des Antilles Françaises, 2007).
16. ROUSTEAU, A. Le réseau de parcelles : traduction de la diversité antillaises, 13 (2012).
17. ROYLE, J., CHANDLER, R. B., SOLLMANN, R. & GARDNER, B. *Spatial Capture-Recapture* Elsevier. ISBN : 978-0-12-405939-9 (USGS Patuxent Wildlife Research Center North Carolina State University, USA, 2014).
18. SCHMITT, S. *et al.* Topography Consistently Drives Intra- and Inter-specific Leaf Trait Variation within Tree Species Complexes in a Neotropical Forest. *Oikos*, oik.07488. ISSN : 0030-1299, 1600-0706. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/oik.07488> (2020) (11 juin 2020).
19. SMITH, S. A. & BROWN, J. W. Constructing a Broadly Inclusive Seed Plant Phylogeny. *American Journal of Botany* **105**, 302-314. ISSN : 00029122. <http://doi.wiley.com/10.1002/ajb2.1019> (2020) (mar. 2018).

Table des figures

2.1	Localisation de l'archipel Guadeloupéen aux Antilles	9
2.2	Zone climatologique de Basse-Terre	11
2.3	Géologie de la Basse-Terre	12
2.4	Panneau placette	15
2.5	Schéma d'un dendromètre	16
2.6	Méthode de progression au sein des placeaux lors d'un suivi annuel de placette	18
2.7	Exemple d'une carte de spatialisation pour le placeau 1 à Choisy	18
2.8	Agents du PNG sur la placette de Choisy (M. Valy, F. Bastaraud, X. Kieser - 2020)	19
2.9	(a) Densité du sous-bois - La Digue (N.Liagre / PNG) (b) Chablis post-cyclonique - Bains-Jaunes (c) Matériels de délimitations toujours visibles - Moscou (d) Contraintes pluviométriques même durant le carême (M.Gayot / ONF)	20
2.10	Carte 3D : Secteur Nord Basse-Terre	24
2.11	Carte 3D : Secteur Centre Basse-Terre	25
2.12	Carte 3D : Secteur Sud Basse-Terre	26
2.13	Spatialisation de la placette de Bains-Jaunes dans le massif de la Soufrière . .	27
2.14	Spatialisation des arbres de la placette de Bains-Jaunes dans le massif de la Soufrière	28
2.15	Mesures et équipements des arbres par les agents de l'ONF (Mathieu Jegu, Noémie Videau) et du PNG (Maurice Valy)	30
2.16	Schéma de la démarche statistique (C.Chouquet, 2010)	32
2.17	Carte des 9 placettes du dispositif	33
3.1	Distribution altitudinale au sein du réseau	40
3.2	Distribution topographique au sein du réseau	40
3.3	Synthèse topographique par placette	42
3.4	Visualisation des classes de pentes par placette	43
3.5	Distribution des individus par espèce	44
3.6	Distribution des individus par famille	45
3.7	Statuts réglementaires des espèces au sein du dispositif	45
3.8	Phylogramme des espèces au sein du dispositif	47
3.9	Cladogramme des espèces au sein du dispositif	48
3.10	Courbe d'accumulation d'espèce par placette	49

3.11 Richesse spécifique par placette	50
3.12 Effort d'échantillonnage du dispositif	50
3.13 Estimateurs de la richesse spécifique S	51
3.14 Indices de diversité	51
3.15 Comparaison entre densité et surface terrière au sein du dispositif	52
3.16 <i>Distribution des diamètres par placette (M.Jegu, 2020)</i>	54
3.17 Distribution diamétrique pour quatre espèces et par placette	56
3.18 <i>Amanoa caribaea</i> (Source : Guezennec)	56
3.19 <i>Richeria grandis</i> en fructification (Bains-Jaunes)	57
3.20 <i>Tapura latifolia</i> en floraison	57
3.21 Répartition des espèces dominantes du dispositif	58
3.22 Répartition de l'inertie sur les deux analyses factorielles	60
3.23 Qualité de représentation des modalités sur les deux plans factoriels	61
3.24 Tableau des contributions et représentations de l'AFC	63
3.25 Classification Ascendante Hiérarchique suite aux résultats de l'AFC	64
3.26 <i>Dacryodes excelsa</i>	64
3.27 <i>Cyathea arborea</i>	65
3.28 Classification Ascendante Hiérarchique des espèces	65
3.29 Variables actives sur les quatre premiers axes de l'AFDM	66
3.30 Cercle de corrélation des variables quantitatives sur les quatre premiers axes de l'AFDM	66
3.31 Représentation de la qualité des modalités actives sur les quatre premiers axes de l'AFDM	68
3.32 Nuage de points de l'AFDM	69
3.33 Dix clusters identifiés suite à la CAH de l'AFDM	70
3.34 Caractéristiques chiffrées des variables qualitatives des clusters	71
3.35 Caractéristiques chiffrées des variables quantitatives au sein des clusters	72
3.36 Description graphique des catégories au sein des clusters	73
3.37 Dynamique globale au sein du réseau FDH de Guadeloupe	76
3.38 Passage du cyclone Maria au sud Basse-Terre (Source : AFP, NASA	77
3.39 Dynamique centrée sur l'évolution de la mortalité et le recrutement	78
3.40 Synthèse accroissement (mm/an) par site sur les deux périodes	79
3.41 Synthèse accroissement (mm/an) sur les deux périodes, pour les 10 espèces les plus abondantes	79
3.42 Test de Mann-Whitney (Wilcoxon)	80
3.43 Test de Student	80
3.44 Test de Kruskal-Wallis	81
3.45 Comparaison des test de Dunn sur les deux périodes d'accroissements	82
3.46 Evolution des accroissements et surface terrière des individus par placette et par catégorie de taille	83
3.47 Évolution des accroissements et surface terrière des individus par espèce	85

3.48	Evolution des accroissements et surface terrière des individus sur les 4 espèces principales du dispositif	86
3.49	Accroissement cumulé de la surface terrière entre les deux périodes	87
3.50	Accroissement cumulé de la surface terrière entre les deux périodes	88
3.51	Productivité moyenne des individus par placette	89
4.1	Pattern spatial des arbres sur Bains-jaunes	96
4.2	Utilisation de la fonction K de Ripley pour étudier l'indépendance entre les points du motif sur Bains-Jaunes	96
3	Spatialisation des arbres sur Bras-David, Carbet et La Digue	101
4	Spatialisation des arbres sur Choisy et Quiock	102
5	Spatialisation des arbres sur Moscou et Pointe-Noire	103

Liste des tableaux

2.1	Localisation des surfaces forestières Guadeloupe	14
2.2	Bilan des déterminations après la campagne 2020 (hors palmiers et fougères .	17
2.3	Liste des coordonnées GPS des extrémités de chaque placette	29
3.1	Synthèse topographique des placettes	39
3.2	Individus par classe de diamètre	53
4.1	Évolution de la mortalité chez certaines espèces	93
2	Tableau de données pour AFC	99
3	Echantillon des données AFDM	100



Couverture : Forêt dense humide au point de vue de la Citerne (M.Jegu).

Réalisation et crédits photos : Mathieu Jegu.

Droit d'usage : Libre de droits.

Niveau de lecture : Rapport d'analyse.

Collaboration : Parc national de Guadeloupe, Office national des forêts, Université des Antilles, UMR EcoFog.

© PNG, ONF, UA, ECOFOG, 2020.