



Projet ManagForRes - Effet de la gestion forestière sur la réponse des écosystèmes forestiers guyanais aux changements climatiques - Rapport Final

Géraldine Derroire, Vincyane Badouard, Daniela Nemetschek, Margaux Rojat, Mélaine Aubry Kientz, Johanna Auer, Caroline Bedeau, Olivier Brunaux, Sabrina Coste, Elia Dardevet, et al.

► To cite this version:

Géraldine Derroire, Vincyane Badouard, Daniela Nemetschek, Margaux Rojat, Mélaine Aubry Kientz, et al.. Projet ManagForRes - Effet de la gestion forestière sur la réponse des écosystèmes forestiers guyanais aux changements climatiques - Rapport Final. Cirad. 2023. hal-04660501

HAL Id: hal-04660501

<https://agroparistech.hal.science/hal-04660501>

Submitted on 23 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Projet ManagForRes

Effet de la gestion forestière sur la réponse des écosystèmes forestiers guyanais aux changements climatiques

Rapport Final

G. Derroire, V. Badouard, D. Nemetschek, M. Rojat, M. Aubry Kientz, J. Auer, C. Bedeau, O. Brunaux, S. Coste, E. Dardevet, C. Fortunel, T. Gaquière, B. Hérault, G. Jaouen, E. Marcon, P. Pétronelli, L. Proux, S. Schmitt, G. Salzet, C. Stahl, S. Traissac

Decembre 2023



Table des matières

Résumé du projet	4
1 Contexte et objectif du projet	6
1.1 La gestion durable en forêt guyanaise	6
1.2 Cadre conceptuel de l'étude	6
1.3 Objectifs et approche méthodologique	7
1.4 Equipe projet	8
2 Activité 1 : Modéliser les effets des interactions biotiques sur les performances des arbres et leur réponse aux évènements climatiques	10
2.1 Rappel des objectifs spécifiques et de la méthodologie	10
2.2 Données des parcelles permanentes du dispositif expérimental de Paracou	10
2.2.1 Données de croissance individuelle issues de Paracou	10
2.2.2 Identification botanique: terrain et package <i>VernaBota</i>	12
2.3 Traits fonctionnels des arbres - Mesures et analyses préliminaires	13
2.3.1 Traits fonctionnels mesurés	13
2.3.2 Coordination entre les traits fonctionnels	13
2.3.3 Impact de l'exploitation forestière sur la composition fonctionnelle de la communauté d'arbres	14
2.4 Variables explicatives des modèles	16
2.4.1 Calcul des indices de voisinages pour les individus de Paracou	16
2.4.2 Anomalies climatiques	16
2.5 Modèles de croissance basés sur les interactions de voisinage neutres	17
2.5.1 Présentation des modèles	17
2.5.2 Principaux résultats	18
2.6 Modèles de croissance incluant les interactions de voisinage non-neutres	19
2.6.1 Présentation des modèles	19
2.6.2 Principaux résultats	20
3 Activité 2 : Définir des scénarios de gestion sylvicole	22
3.1 Rappel des objectifs spécifiques et de la méthodologie	22
3.2 Scénarios retenus	22
4 Activité 3 : Évaluer <i>in silico</i> les effets des différents scénarios de gestion sur les performances des arbres et la réponse des forêts au climat	24
4.1 Rappel des objectifs spécifiques et de la méthodologie	24
4.2 Simulation <i>in silico</i> de l'exploitation forestière	24
4.2.1 Explicitation des pratiques d'exploitation	24

4.2.2	<i>LoggingLab</i> : un package R de simulation d'exploitation	25
4.3	Evaluation des différents scénarios d'exploitation	28
4.3.1	Choix des parcelles	28
4.3.2	Volumes exploités	29
4.3.3	Dégâts d'exploitation	30
4.4	Réponse de la croissance individuelle des arbres aux scénarios de gestion et aux effets du climat	32
4.4.1	Méthode de prédiction	32
4.4.2	Application des modèles basés sur les interactions neutres	34
4.4.3	Application des modèles basés sur les interactions non-neutres	36
Productions scientifiques issues du projet		40
	Publications scientifiques dans revues à comité de lecture	40
	Packages R	40
	Mémoires d'étudiants	40
	Thèse de doctorat	40
	Mémoires de Master	40
	Communications à des conférences internationales	41
	Données	41
Signification des principaux sigles		42
Bibliographie		43
Annexes		46
	Annexe 1 : Équations du modèle 1 d'interactions de voisinage neutres	47
	Annexe 2 : Équations du modèle 2 d'interactions de voisinage neutres	48
	Annexe 3 : Équations du modèle d'interactions de voisinage non-neutres	49
	Annexe 4 : Les scénarios de gestion sylvicole	50
	Annexe 5 : Les étapes de l'exploitation forestière Faible Impact (EFI)	55
	Annexe 6 : Résultats complémentaires d'application des modèles basés sur les interactions neutres	72
	Annexe 7 : Résultats complémentaires d'application des modèles basés sur les interactions non-neutres	76

Résumé du projet

Une partie de la forêt guyanaise fait l'objet d'une exploitation sélective de bois d'œuvre selon des règles sylvicoles ayant pour objectif la gestion durable de cet écosystème forestier, c'est à dire le maintien de ses fonctionnalités. Cependant, la plupart des études de la réponse des forêts tropicales à l'exploitation ont porté sur un petit nombre d'attributs de l'écosystème, et la capacité de résilience des forêts exploitées aux effets des changements climatiques est encore peu connue. Dans ce contexte, le projet *ManagForRes* a pour but d'évaluer les effets de différents types de gestion sylvicole sur la réponse des écosystèmes forestiers guyanais aux changements climatiques. Pour cela, nous nous centrons sur la compréhension et la modélisation du rôle des interactions biotiques (positives ou négatives) entre arbres voisins sur les performances individuelles des arbres (croissance) en réponse aux facteurs climatiques. Les modèles de performance développés sont ensuite utilisés pour tester différents scénarios d'exploitation forestière co-construits avec l'Office National des Forêts, dans un objectif d'adaptation des pratiques de gestion des forêts guyanaises aux changements climatiques.

Une première étape du projet a consisté à acquérir les données nécessaires. Bien que le projet bénéficie des données de dynamique forestière acquises depuis près de 40 ans sur les parcelles permanentes de la station forestière expérimentale de Paracou, il a fallu compléter l'identification botanique des arbres. Ceci s'est fait en partie par de l'identification botanique de terrain. Pour les arbres non identifiés, un nom botanique a été attribué sur la base du nom vernaculaire en s'appuyant sur une méthode d'association et un outil informatique développé pour le projet (package R *VernaBota*). Nous avons également mesuré six traits fonctionnels associés à la régulation du statut hydrique des arbres sur 645 arbres (111 espèces) et complété ces données par des données de traits acquises au cours de précédents projets.

Nous avons ensuite développé un cadre innovant de modélisation spatialement explicite de la réponse des performances individuelles des arbres aux effets combinés des interactions avec leur voisinage et des facteurs climatiques, via des modèles hiérarchiques bayésiens. Pour cela, nous modélisons la croissance des arbres en réponse à différentes variables climatiques liées aux stress hydrique et thermique et à la disponibilité en lumière, à différents types d'interactions biotiques avec les arbres voisins, et aux effets combinés de ces deux types de variables. Ces modèles montrent un fort effet du climat sur la croissance des arbres, avec une diminution de la croissance quand le stress hydrique et les températures augmentent, et une augmentation de la croissance quand le rayonnement solaire est fort. Ils montrent également un effet de la quantité et taille des arbres voisins : plus le voisinage d'un arbre est dense, moins la croissance est forte, ce qui montre la compétition entre arbres. Cependant, un tel voisinage joue également un rôle de tampon en atténuant les effets des variables climatiques. De plus, la réponse des arbres varie en fonction de l'espèce à laquelle ils appartiennent: les espèces à croissance rapide sont globalement plus sensibles aux effets du climat et des arbres voisins. Elle dépend également de l'identité fonctionnelle des arbres, mais aussi de leurs différences fonctionnelles avec leurs voisins. Ceci montre que les interactions biotiques entre arbres voisins ne sont pas uniquement fonction de la densité du voisinage, mais reposent également sur des mécanismes de compétition hiérarchique et de complémentarité entre les arbres voisins.

Pour comparer les effets de différentes pratiques d'exploitation forestière, nous avons tout d'abord co-construit avec l'ONF, partenaire gestionnaire, huit scénarios de gestion sylvicole. Ces scénarios présentent différentes intensités de prélèvement de bois d'œuvre, de niveau de diversification des espèces récoltées, et de niveau de mise en oeuvre des principes d'Exploitation à Faible Impact (EFI). Ces scénarios sont ensuite appliqués *in silico* grâce à un simulateur d'exploitation forestière développé au cours du projet (package R *LoggingLab*) sur les données de cinq parcelles permanentes du réseau Guyafor. Les simulations d'exploitation montrent que deux des cinq parcelles considérées ne permettent pas de produire le volume objectif (même quand il est de 20 m³/ha) si les seules espèces exploitées sont les huit Essences Commerciales Majeures Principales (ECMP), ce qui souligne la nécessaire diversification des espèces exploitées. Les simulations montrent également que les dégâts représentent la majeure partie de la biomasse perdue lors de l'exploitation (70 à 75%). La quantité de dégâts produits dépend cependant des pratiques sylvicoles : l'utilisation du câble pour le débusquage des grumes permet de réduire la densité de pistes et donc les dégâts qu'elles engendrent.

Nous avons enfin comparé l'effet des différents scénarios de gestion sylvicole sur la croissance individuelle des arbres et sur la réponse de cette croissance au climat. Pour cela, nous avons utilisé les modèles de croissance individuelle développés pour prédire la croissance des arbres des communautés post-exploitation obtenues

à l'aide du simulateur. L'effet du climat est celui qui influence le plus les croissances prédites, avec une diminution de la croissance entre une année climatique normale et une année sèche ou chaude. L'exploitation forestière induit une augmentation de la croissance des arbres due au relâchement de la compétition pour les ressources, et ce de manière d'autant plus forte que la perturbation est forte. Cet effet est majoritairement le fait de la densité d'arbres voisins, alors que les différences fonctionnelles entre arbres voisins ont un effet peu perceptible sur les croissances prédites. Cependant, l'exploitation impacte aussi la réponse de la croissance individuelle à une année climatique sèche ou chaude : la réduction de la croissance lors d'une année sèche ou chaude est légèrement plus importante dans une forêt exploitée que dans une forêt non exploitée.

Les résultats du projet *ManagForRes* nous permettent de tirer plusieurs **conclusions applicables à la gestion forestière et à l'exploitation sélective conduite en Guyane**. La première concerne la sensibilité accrue des forêts exploitées aux effets des conditions climatiques sèches et chaudes. Cette sensibilité accrue résulte de la diminution de l'effet protecteur du couvert forestier, observable immédiatement après l'exploitation, et du changement de la composition floristique induit par l'arrivée des espèces pionnières généralement plus sensibles dans les années suivant l'exploitation. Ceci a des implications pour le devenir de l'exploitation forestière dans le contexte des changements climatiques. Les résultats permettent également de formuler des recommandations en terme de pratiques d'exploitation. L'exploitation d'un volume de bois d'œuvre de 20 à 30 m³/ha ne sera pas possible dans certaines zones si on ne diversifie pas la liste des espèces considérées comme exploitables. Cette diversification a aussi comme avantage de réduire la pression exercée sur les espèces les plus exploitées, et pourrait également potentiellement permettre une meilleure adaptation de la filière bois aux changements climatiques. De plus, les simulations d'exploitation réalisées montrent que les dégâts causés par l'exploitation forestière représentent encore l'impact le plus fort de cette exploitation. Continuer les efforts de mise en oeuvre des principes de l'Exploitation à Faible Impact (EFI) est donc une nécessité. Parmi les différentes pratiques d'EFI, l'utilisation du câble synthétique pour débusquer les grumes apparaît comme la plus efficace.

A l'issue de ce projet, nous pouvons proposer plusieurs perspectives de travail. Tout d'abord, le simulateur d'exploitation forestière *LoggingLab* que nous avons développé pourra être plus largement utilisé et développé pour permettre de tester de nouvelles pratiques d'exploitation, en Guyane mais également ailleurs en Amazonie. Ceci permettra de poursuivre l'identification des pratiques d'exploitation les plus vertueuses en terme de limitation des dégâts. De plus, étudier la vulnérabilité des forêts aux changements climatiques au cours de décennies suivant l'exploitation est également une perspective de recherche intéressante, qui pourra s'appuyer sur une approche combinant l'utilisation du simulateur d'exploitation *LoggingLab* avec un simulateur de dynamique forestière individu-centré. Enfin, le travail considérant la réponse des forêts aux effets combinés de l'exploitation et des changements climatiques pourra s'entendre à d'autres composantes de la dynamique forestière (mortalité, recrutement).

1 Contexte et objectif du projet

1.1 La gestion durable en forêt guyanaise

En Guyane française, la forêt tropicale humide couvre plus de 95 % du territoire et abrite environ 1800 espèces d'arbres [1]. Elle représente donc un enjeu de conservation majeur pour la France et l'Union Européenne. L'Office National des Forêts (ONF) gère 6 des 8,2 millions d'hectares du territoire [2], ce qui en fait un gestionnaire clé des milieux naturels terrestres guyanais. Sur les 2,4 millions d'hectares du Domaine Forestier Permanent (DFP), l'ONF conduit une exploitation sélective du bois d'œuvre. Cette exploitation consiste en un prélèvement de faible intensité (environ 5 arbres/ha) selon des règles sylvicoles ayant pour objectif la gestion durable de l'écosystème forestier [3].

Le concept de gestion durable des forêts repose sur le maintien des fonctionnalités de l'écosystème forestier [4]. Les fonctionnalités d'un écosystème se rapportent à l'ensemble des processus écologiques permettant à cet écosystème de se maintenir [5], ce qui inclut la capacité de résilience à une perturbation [6]. Cependant, les études sur la réponse des forêts tropicales à l'exploitation sélective ont principalement porté sur un petit nombre de ces fonctionnalités directement en lien avec les services écosystémiques de production de bois [7] ou de séquestration du carbone [8,9]. Pour obtenir une évaluation plus complète de la gestion durable, il est maintenant important d'étudier les effets de l'exploitation forestière sur la capacité de résilience des forêts tropicales aux perturbations d'origines anthropiques, notamment aux changements climatiques, afin d'adapter les pratiques de gestion à ces changements.

Dans ce contexte, le projet *ManagForRes* a pour but d'évaluer les effets de différents types de gestion sylvicole sur la réponse des écosystèmes forestiers guyanais aux changements climatiques.

1.2 Cadre conceptuel de l'étude

De par le prélèvement de bois et les activités liées, l'exploitation forestière conduit à une modification importante de l'environnement biotique des forêts tropicales susceptible d'influencer les performances et la réponse des arbres au stress hydrique. L'effet généralement attendu est une diminution de la compétition pour les ressources, dont la lumière et l'eau, conduisant à une amélioration de la productivité individuelle après exploitation [10,11]. Cependant, cet effet n'est pas toujours observé et certaines espèces montrent même un effet contraire [10]. Une possible explication peut être l'augmentation de l'évapotranspiration provoquée par l'ouverture du couvert forestier et l'augmentation des températures qui en résulte, qui pourrait conduire à une limitation en eau d'espèces plus vulnérables au stress hydrique [12]. Les effets combinés de l'exploitation forestière et des changements climatiques restent donc une question ouverte et complexe.

Les performances individuelles des arbres dépendent à la fois des performances intrinsèques de l'espèce à laquelle ils appartiennent et des relations biotiques avec les arbres situés dans leur voisinage immédiat. Ces relations biotiques sont de plusieurs ordres (Figure 1). Tout d'abord, puisque la croissance des arbres dépend d'un nombre limité de ressources (lumière, eau, nutriments), il existe une compétition entre arbres voisins pour l'acquisition de ces ressources. L'intensité de la compétition à laquelle un arbre est soumis dépend non seulement de la « quantité » de voisins (nombre de voisins pondéré par leur taille) (hypothèse de *compétition neutre*), mais aussi de l'identité de ses voisins. En effet, un arbre sera d'autant plus impacté par la compétition que ses voisins sont de meilleurs compétiteurs que lui (hypothèse de *hiérarchie compétitive*). Par ailleurs, il peut également exister des relations de complémentarité entre arbres voisins dans leurs stratégies d'acquisition des ressources : selon cette hypothèse, les performances d'un arbre seront moins limitées par des arbres voisins ayant des stratégies d'acquisition de ressources différentes de la sienne (hypothèse de *partitionnement de niches*) [13,14,15]. Cette hypothèse est une des bases de la théorie, soutenue par un nombre grandissant de travaux, selon laquelle la biodiversité aurait un rôle positif dans le fonctionnement des forêts et leur résilience aux changements climatiques [16,17,18].

Le projet *ManagForRes* étudie le rôle de ces trois types d'interactions biotiques dans la réponse des performances individuelles des arbres aux événements climatiques. Compte-tenu de la très grande biodiversité des forêts étudiées (150 à 200 espèces atteignant 10 cm de diamètre par hectare sur le dispositif de Paracou, par

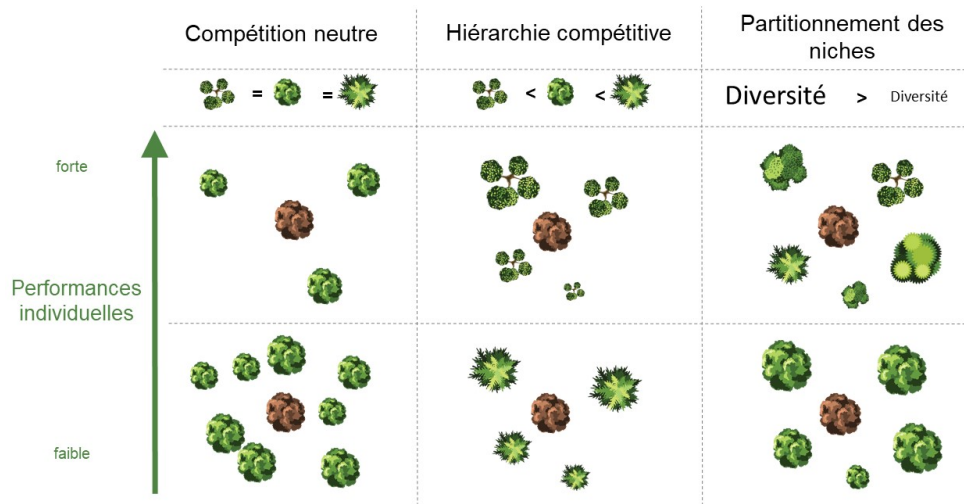


Figure 1: Différents types d'interaction biotique entre un arbre focal (en pourpre) et les arbres de son voisinage (en vert)

exemple), les stratégies d'acquisition des ressources des espèces sont estimées via leurs traits fonctionnels (i.e. les caractéristiques morphologiques, physiologiques et phénologiques liées au fonctionnement et aux performances d'un individu [19]) et à sa réponse à la sécheresse.

1.3 Objectifs et approche méthodologique

Pour évaluer les effets de la gestion forestière sur la capacité de résilience de l'écosystème forestier face aux changements climatiques, le projet *ManagForRes* combine la production de connaissances scientifiques sur le rôle des interactions biotiques dans les performances individuelles des arbres et la définition de scénarios de gestion avec le partenaire gestionnaire. Pour cela, nous nous centrons sur la compréhension et la modélisation du rôle des interactions biotiques (positives ou négatives) entre arbres voisins sur les performances individuelles des arbres (croissance) en réponse aux facteurs climatiques. Les modèles de performance développés sont ensuite utilisés pour tester différents scénarios d'exploitation forestière dans un objectif d'adaptation des pratiques de gestion des forêts guyanaises aux changements climatiques.

L'étude est constituée de trois activités principales (Figure 2) : des modèles de performances individuelles des arbres (croissance) spatialement explicites sont développés en utilisant des données d'inventaires forestiers des placettes permanentes et des données de traits fonctionnels (activité 1). Des scénarios de gestion sont ensuite co-construits avec le gestionnaire partenaire, l'Office National des Forêts (activité 2). Enfin, ces scénarios sont testés en appliquant les modèles de performance à des forêts exploitées *in silico*, en utilisant un simulateur d'exploitation développé par le projet et les données des parcelles permanentes du réseau Guyafor (activité 3).

Les modèles de performances individuelles (activité 1) sont paramétrés avec les données d'inventaires des arbres du dispositif expérimental de Paracou¹. Ce dispositif permet de suivre la dynamique forestière en mesurant tous les ans ou tous les 2 ans près de 70000 arbres qui ont été géolocalisés et identifiés botaniquement. C'est un des rares dispositifs de parcelles forestières permanentes ayant à la fois la profondeur historique (> 30 ans), la surface (> 90 ha), la fréquence d'inventaire, la résolution botanique et une expérience de perturbation sylvicole requises pour l'étude proposée.

L'évaluation *in silico* des effets de la gestion forestière sur la réponse des forêts aux événements climatiques (activité 3) est conduite en utilisant les données d'inventaires forestiers du réseau Guyafor (Figure 3). Ce

¹<https://paracou.cirad.fr/>

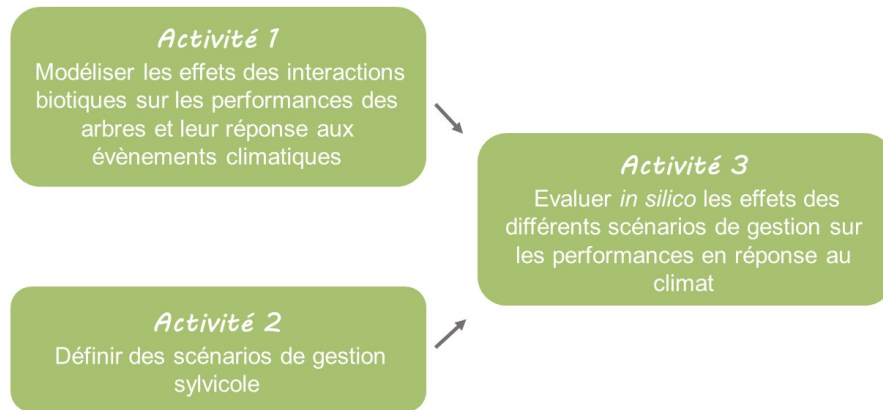


Figure 2: Organisation du projet ManagForRes

réseau co-piloté par le Cirad, l'ONF et le CNRS regroupe 45 parcelles permanentes de suivi de la dynamique forestière sur 17 sites au nord de la Guyane française, dont le dispositif de Paracou. Ces sites ont été choisis de manière à couvrir le gradient de précipitation et la diversité des sols rencontrés dans la bande côtière de la Guyane française.

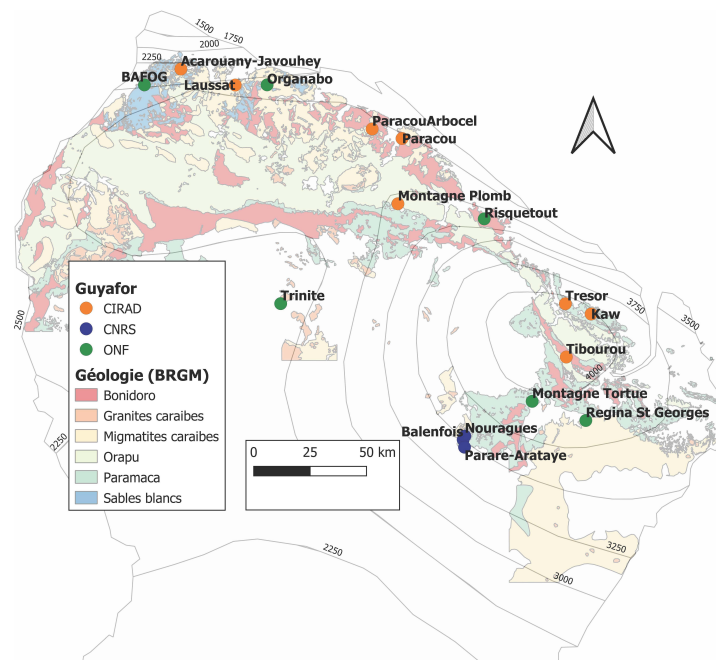


Figure 3: Localisation des parcelles permanentes du réseau Guyafor

1.4 Equipe projet

Table 1: Participants au projet ManagForRes

Nom	Affiliation	Fonction	Activités	Contribution
Géraldine Derroire	Cirad - UMR EcoFoG	Chercheure, écologue, Dir. scientifique de Paracou	1, 2, 3	Coordination du projet, modélisation, encadrement
Vincyane Badouard	Cirad - UMR EcoFoG	Ingénieure, écologue	2, 3	Programmation du simulateur
Michel Baisie	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	5	Identification botanique
Didier Gribias	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	9	Identification botanique
Olan Jackie	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	7	Identification botanique
Petrus Naisso	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	4	Identification botanique
Joryan Octavie	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	8	Identification botanique
Jean-Martin Odan	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	6	Identification botanique
Pascal Pétronelli	Cirad - UMR EcoFoG	Ingénieur, botaniste	1	Identification botanique
Laetitia Proux	Cirad - UMR EcoFoG	Technicienne, logisticienne de Paracou	1	Identification botanique
Richard Santé	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	2	Identification botanique
Lindon James Yansen	Cirad - UMR EcoFoG	Technicien forestier	3	Identification botanique
Bruno Hérault	Cirad - UPR Forêts et Sociétés	Chercheur, écologue forestier et modélisateur	1	Appui à la modélisation
Eric Marcon	AgroParisTech - UMR Amap	Chercheur, biostatisticien	1	Modélisation, encadrement
Mélaine Aubry	AgroParisTech - UMR EcoFoG	Enseignante-chercheure, écologue et modélisatrice	1	Appui à la modélisation
Kientz Gaëlle Jaouen	AgroParisTech - UMR EcoFoG	Ingénieur	1	Gestion des données
Stéphane Traissac	AgroParisTech - UMR EcoFoG	Enseignant-chercheur, écologue et modélisateur	1, 3	Appui à la modélisation et au simulateur
Daniela Nemetschek	CNRS - UMR EcoFoG et Amap	Doctorante, écologue	1	Mesure de traits fonctionnels, modélisation
Sylvain Schmitt	CNRS - UMR EcoFoG	Post-doctorant, écologue et modélisateur	3	Programmation du simulateur
Guillaume Salzet	Inrae - UMR EcoFoG et Beta	Doctorant, économiste	3	Programmation du simulateur
Clément Stahl	Inrae - UMR EcoFoG	Chercheur, écophysiologiste	1	Mesure de traits fonctionnels
Claire Fortunel	IRD - UMR Amap	Chercheure, écologue et modélisatrice	1	Modélisation, encadrement
Caroline Bedeau	ONF - pôle RDI	Ingénieure, RDI	2, 3	Scénario de gestion
Olivier Brunaux	ONF - pôle RDI	Ingénieur, RDI	2, 3	Scénario de gestion
Sabrina Coste	Univ. de Guyane - UMR EcoFoG	Chercheure, écophysiologiste	1	Mesure de traits fonctionnels
Thomas Gaquière	Univ. de Guyane - UMR EcoFoG	Doctorant, écologue	3	Programmation du simulateur
Johanna Auer	Université de Vienne	Stagiaire Master 2, écologue	1	Mesure de traits fonctionnels
Elia Dardevet	UMR Amap	Stagiaire Master 2, écologue	1	Mesure de traits fonctionnels
Margaux Rojat	UMR EcoFoG	Stagiaire Master 2, écologue	3	Application des scénarios

2 Activité 1 : Modéliser les effets des interactions biotiques sur les performances des arbres et leur réponse aux événements climatiques

2.1 Rappel des objectifs spécifiques et de la méthodologie

L'objectif de cette activité est de développer et valider un cadre innovant de modélisation spatialement explicite de la réponse des performances individuelles des arbres aux effets combinés des interactions avec leur voisinage et des facteurs climatiques.

Les performances individuelles des arbres sont étudiées par des modèles hiérarchiques bayésiens paramétrés sur les données du dispositif de Paracou. Les effets du stress hydrique sont inclus dans les modèles en testant l'effet des variations interannuelles des variables climatiques. Les interactions biotiques avec les arbres du voisinage sont considérées par trois types d'indices, permettant de tester les hypothèses de compétition neutre, de hiérarchie compétitive et de partitionnement des niches (Figure 1). Les stratégies fonctionnelles sont considérées par les valeurs de traits fonctionnels liés à l'acquisition des ressources et à la réponse au stress hydrique. Les modèles sont paramétrés avec les données d'inventaires des arbres du dispositif expérimental de Paracou.

Cette activité repose principalement sur le travail de thèse de Daniela Krebber/Nemetschek. Deux étudiantes de Master, Elia Dardevet et Johanna Auer, ont également effectué leur stage de fin d'étude dans le cadre du projet.

2.2 Données des parcelles permanentes du dispositif expérimental de Paracou

2.2.1 Données de croissance individuelle issues de Paracou

Le dispositif expérimental de Paracou (Figure 4), situé près de Sinnamary (5°18'N, 52°53'W) permet d'étudier la dynamique forestière grâce à un suivi régulier des arbres sur des parcelles permanentes.

La présente étude utilise les données de 15 parcelles permanentes du dispositif, couvrant chacune 6,25 ha. Ces parcelles ont été établies en 1984 (parcelles 1 à 12) ou en 1990 (parcelles 13 à 15). En 1987, 9 parcelles ont été soumises à une exploitation sylvicole expérimentale selon l'un des trois traitements suivants :

- Traitement 1 : exploitation d'une dizaine d'arbres par ha pour le bois d'œuvre, résultant en une perte de biomasse aérienne totale comprise entre 12 et 33%
- Traitement 2 : exploitation d'une dizaine d'arbres par ha pour le bois d'œuvre et éclaircie sylvicole, résultant en une perte de biomasse aérienne totale comprise entre 33 et 56%
- Traitement 3 : exploitation d'une dizaine d'arbres par ha pour le bois d'œuvre, éclaircie sylvicole et exploitation d'une quinzaine d'arbres par ha pour le bois énergie, résultant en une perte de biomasse aérienne totale comprise entre 35 et 56%

Ces traitements ont conduit à accroître la gamme d'interaction de voisinage couverte, puisque l'exploitation s'est traduite par une diminution de la surface terrière locale immédiatement après exploitation, qui se reconstitue depuis (Figure 5) [20].

Sur chaque parcelle, tous les arbres de diamètre à 1.3m (DBH) supérieur ou égal à 10 cm sont cartographiés et identifiés botaniquement (voir section 2.2.2), et leur circonférence est mesurée tous les ans ou tous les deux ans. En 2021 (dernier inventaire utilisé pour la présente étude), ces 15 parcelles comptaient un total de 70238 arbres appartenant à 591 espèces et 63 familles.

La croissance annuelle absolue de chaque arbre est calculée à partir des données de circonférences mesurées en début et en fin d'intervalles de temps de deux ans. La présente étude considère 15 intervalles, entre 1991 et 2021.

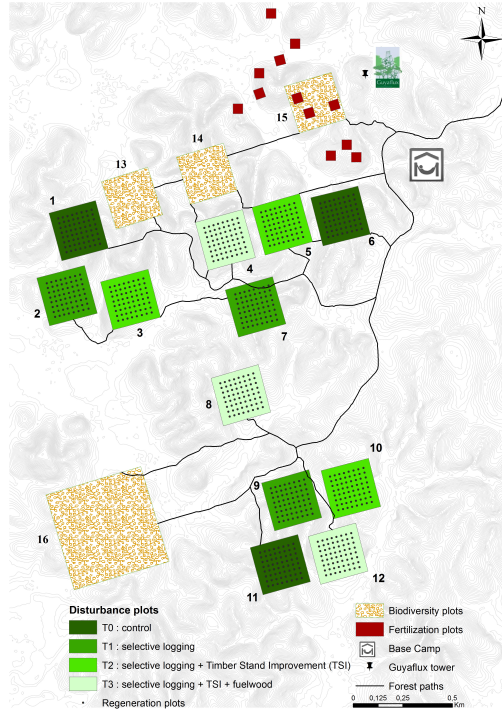


Figure 4: Carte du dispositif expérimental de Paracou: T0 indique les parcelles non perturbées et T1, T2, T3 indiquent les parcelles ayant subi les traitements expérimentaux 1, 2 et 3, respectivement

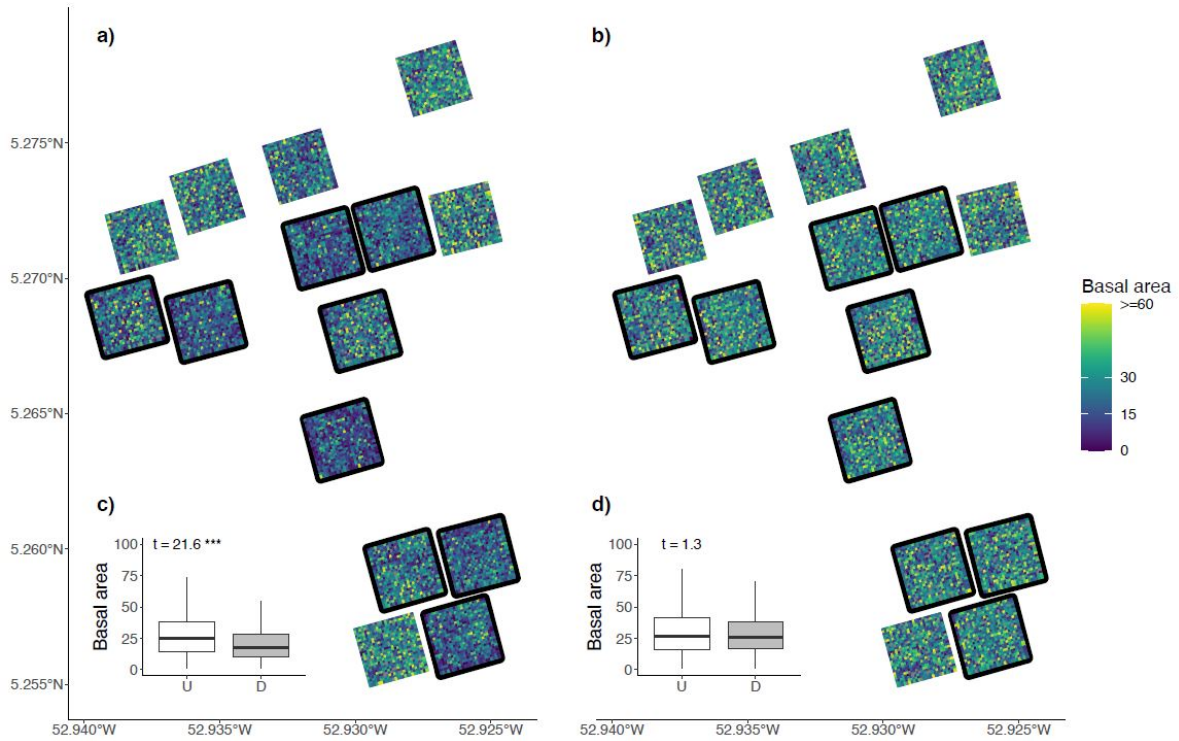


Figure 5: Carte de la variabilité spatiale et temporelle des surfaces terrières locales des parcelles d'étude: les surfaces terrières (Basal area, en m²/ha) sont présentées par quadrats de 10m par 10m, pour 1991 (a) et 2019 (b) [20]

2.2.2 Identification botanique: terrain et package *VernaBota*

La majorité des arbres des parcelles permanentes du dispositif de Paracou est déjà identifiée botaniquement, mais le projet prévoit un travail d'identification complémentaire pour accroître le taux de détermination taxonomique. Ce travail n'a pu commencer que début juillet 2021 car la situation sanitaire a perturbé l'organisation de l'équipe de terrain de Paracou. Sur l'ensemble de la durée du projet, il y a eu 17 journées de terrain, ayant permis d'identifier environ 1700 arbres.

En parallèle de ce travail de terrain, nous avons développé une méthodologie permettant d'inférer les noms scientifiques des arbres non identifiés botaniquement à partir de leur nom vernaculaire. L'association entre noms vernaculaires et noms scientifiques n'est pas bijective (certains noms vernaculaires correspondent à plusieurs noms scientifiques et certains noms scientifiques ont plusieurs noms vernaculaires).

La méthode d'association proposée repose sur les travaux de [21] et [22], elle est basée sur un schéma Bayésien Dirichlet-catégoriel combinant de l'information à dire d'expert avec des observations de terrain (inventaires réels). Elle permet de propager les incertitudes liées à l'association entre les noms vernaculaires et les noms scientifiques pour obtenir, soit un grand nombre de simulations de parcelles entièrement identifiées botaniquement, soit la simulation la plus probable. Cette méthode est utilisée pour compléter les identifications botaniques des données de Paracou utilisées pour le paramétrage des modèles (activité 1) et des données du réseau Guyafor utilisées pour simuler des inventaires post-exploitation (activité 3) (Figure 6). L'algorithme d'association a été écrit avec le langage *R*. Il est facilement utilisable par les utilisateurs de Guyafor au delà du cadre de ce projet via un package *R* [23] disponible en accès libre sous GitHub (<https://github.com/EcoFoG/vernabota/>).

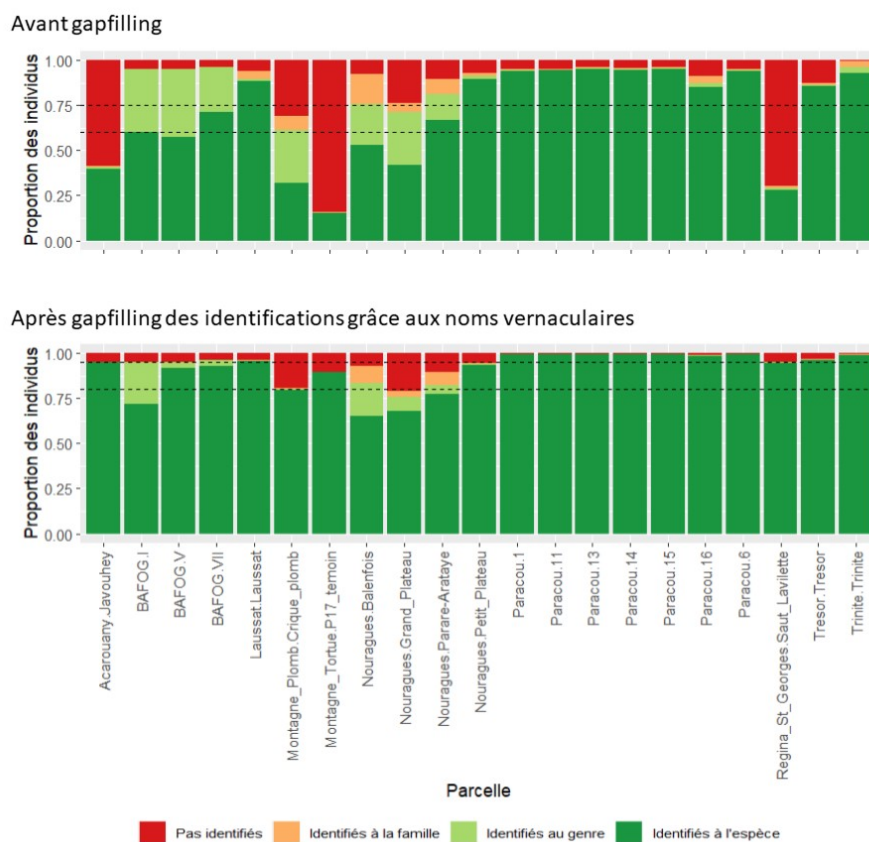


Figure 6: Apport du gapfilling des noms scientifiques grâce aux noms vernaculaires sur les parcelles non perturbées du réseau Guyafor

2.3 Traits fonctionnels des arbres - Mesures et analyses préliminaires

2.3.1 Traits fonctionnels mesurés

Nous avons mesuré six traits fonctionnels associés à la régulation du statut hydrique des arbres (Table 2) [20,24,25]. Deux sessions de terrain (10 semaines entre Septembre et Novembre 2020 et 6 semaines entre Février et Mars 2021) ont permis de mesurer ces traits fonctionnels sur 645 arbres appartenant à 111 espèces (dont 97 espèces avec au moins 3 individus). En utilisant des données résultant de projets précédents [26,27,28,29], nous disposons maintenant des mesures de ces traits avec au minimum 3 individus par espèce pour 100 espèces (76 genres et 34 familles). Ces mesures seront prochainement déposées sur l'entrepôt de données d'EcoFoG². Ces mesures ont été complétées par des mesures de 6 traits fonctionnels des feuilles ou du bois liés à l'utilisation de la lumière ou du carbone issues d'études précédemment conduites en Guyane [30,30,31,32]. L'ensemble des traits fonctionnels ont été mesurés via des protocoles standards décrits dans [20].

Les 100 espèces mesurées couvrent 83% de la surface terrière (81% du nombre de tiges) des arbres appartenant aux parcelles permanentes du dispositif de Paracou (médiane des valeurs par parcelle et année d'inventaire) (Figure 7). Un tel taux de couverture permet une bonne qualification des voisinages pour les modèles développés sur ces données (activité 1).

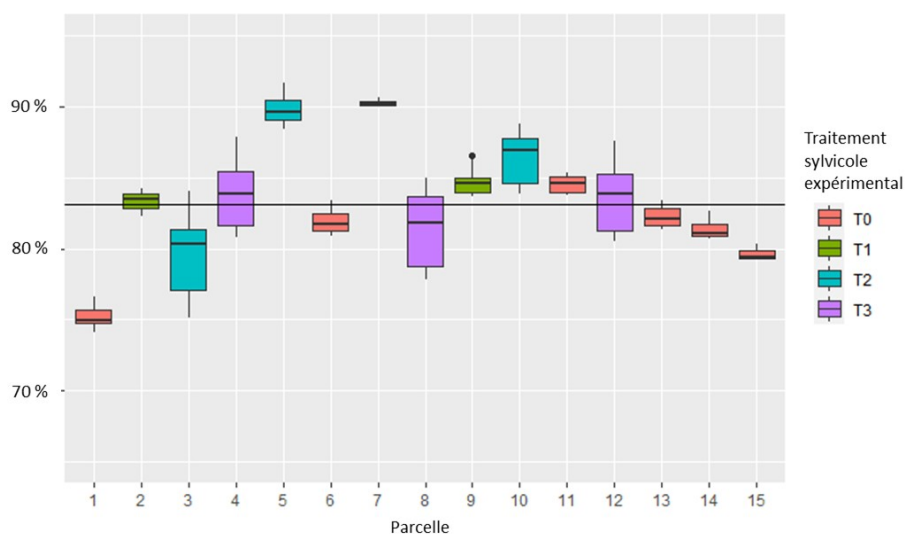


Figure 7: Pourcentage de la surface terrière couverte par des arbres appartenant à une espèce pour laquelle les traits fonctionnels ont été mesurés (distribution des valeurs par parcelle et année d'inventaire). La ligne noire représente la valeur médiane des valeurs par parcelle et années d'inventaire (83%). Le traitement T0 est le témoin, T1 consiste en une exploitation sélective, T2 en une exploitation sélective et une amélioration sylvicole, et T3 en une exploitation sélective, une amélioration sylvicole et une récolte de bois énergie.

2.3.2 Coordination entre les traits fonctionnels

Une analyse en composante principale permet d'étudier les patterns de coordination entre les traits hydrauliques mesurés (Figure 8) (analyse menée sur 61 espèces et 16 traits)[25]. L'analyse montre une faible coordination entre les traits étudiés (8 axes sont nécessaires pour expliquer 80% de la variance), ce qui montre l'existence de nombreuses dimensions fonctionnelles, y compris pour les traits liés à l'utilisation de l'eau.

²<https://dataverse.cirad.fr/dataverse/ecofog>

Table 2: Traits fonctionnels mesurés

Trait	Définition	Rôle.fonctionnel	Source
Ptlp (Mpa)	Potentiel hydrique de la feuille au point de flétrissement	Tolérance physiologique et écologique à la sécheresse	Mesuré
gmin (mmol m-2 s-1)	Conductance minimale des feuilles liée à la perte d'eau résiduelle après la fermeture des stomates par la conductance cuticulaire et les stomates incomplètement fermés.	Conservation des ressources (eau)	Mesuré
LSWC (g g-1)	Teneur en eau saturée des feuilles	Stockage des ressources (eau)	Mesuré
SD (n mm-2)	Densité stomatique (nombre de stomates par unité de surface)	Échange de gaz, conservation des ressources (eau) et fourniture de ressources (CO ₂).	Mesuré
Delta13C (‰)	Composition foliaire en 13C (rapport du 13C au 12C dans un échantillon par rapport à un standard)	Capture et conservation des ressources (carbone et eau)	Mesuré
Delta18O (‰)	Composition foliaire en 18C (rapport entre 18O et 16O dans un échantillon par rapport à un standard)	Capture et conservation des ressources (carbone et eau)	Mesuré
LA (cm2)	Surface foliaire	Acquisition des ressources (lumière)	Etudes passées
SLA (m2 kg-1)	Surface foliaire spécifique	Acquisition des ressources (lumière et carbone)	Etudes passées
Lthick (mm)	Épaisseur des feuilles	Utilisation des ressources (carbone)	Etudes passées
Lthoug (N)	Dureté des feuilles	Utilisation des ressources (carbone)	Etudes passées
BarkThick (mm)	Épaisseur de l'écorce	Soutien mécaniques,transport de l'eau et stockage des ressources	Etudes passées
WSG (pas d'unité)	Densité apparente du bois	Soutien mécaniques,transport de l'eau et stockage des ressources	Etudes passées

Le premier plan de l'analyse explique 40 % de la variance totale [25]. Le premier axe montre une coordination forte des traits morphologiques et chimiques opposant une stratégie d'acquisition à une stratégie de conservation des ressources. Le deuxième axe oppose des espèces à haute stature, écorce plus épaisse, forte densité stomatique et forte efficacité d'utilisation de l'eau (fort Delta13C) à des espèces plus petites et ayant un fort potentiel de stockage d'eau dans les feuilles (fort LSWC). Les traits liés à la résistance au stress hydrique (gmin et Ptlp) contribuent plus fortement au troisième axe.

2.3.3 Impact de l'exploitation forestière sur la composition fonctionnelle de la communauté d'arbres

Une analyse des traits mesurés a été conduite lors du stage de Master 2 d'Elia Dardevet, qui a porté sur l'impact de l'exploitation forestière sur la composition fonctionnelle de la communauté des arbres. Cette étude a été conduite sur les données des parcelles permanentes du dispositif de Paracou qui ont fait l'objet d'une exploitation forestière expérimentale à la fin de années 1980. Pour cela, les moyennes pondérées des valeurs de traits pour la communauté (*community weighted means*) ont été calculées pour chacune des parcelles, pour les inventaires de 1998 et 2015, soit respectivement 10 et 27 ans après exploitation. Les résultats (Figure 9) montrent un effet significatif de l'intensité du traitement sylvicole sur la densité stomatique *SD*, observable en 1998 et 2015, ainsi que sur la conductance minimale des feuilles *Gmin* observable en 2015 uniquement. Ceci montre une tendance vers une stratégie moins conservatrice de la ressource en eau pour les traitements les plus forts. Il convient de noter que cette analyse a considéré les effets de l'exploitation forestière de manière qualitative (type de traitement sylvicole) et à l'échelle de la parcelle entière. Pour les modèles de performances individuelles développés par le projet, ces effets sont considérés de manière quantitative (via les différents indices de voisinage), à l'échelle fine du voisinage des arbres focaux.

2.4 Variables explicatives des modèles

2.4.1 Calcul des indices de voisinages pour les individus de Paracou

Nous avons calculé les indices de voisinage (NI pour *Neighbourhood index*) permettant de tester les trois hypothèses d'interactions biotiques présentées en Figure 1, pour l'ensemble des arbres des parcelles permanentes de Paracou et des intervalles de temps considérés par cette étude. Ces indices sont calculés pour chaque arbre focal i , en prenant en compte les J arbres situés dans un rayon de 10 m de l'arbre focal.

- **Compétition neutre (NCIn, neutral Neighbourhood Crowding Index)**: cette hypothèse considère que l'effet des arbres voisins ne dépend que de leur taille et de leur position. Nous utilisons donc un indice proportionnel à la surface terrière des arbres voisins (carré du diamètre à hauteur de poitrine DBH) et inversement proportionnel à leur distance à l'arbre focal. L'indice de voisinage neutre est donc

$$NCIn_i = \sum_{j=1}^J \frac{DBH_j^2}{Distance_{ij}}$$

Une forte valeur de NCIn indique donc la présence de nombreux voisins, gros et/ou proches, dans le voisinage de l'arbre focal considéré.

- **Hiérarchie compétitive (NIh) et partitionnement des niches (NId)**: ces deux hypothèses considèrent que l'identité des voisins, considérée via leurs valeurs de traits fonctionnels, influence également leurs effets sur l'arbre focal. Pour cela, nous considérons λ_{sk} , un indice de différence fonctionnelle entre l'individu focal i appartenant à l'espèce s et un voisin j appartenant à l'espèce k . Nous prenons ensuite la moyenne de ces différences pondérée par la contribution de chaque voisin à l'indice de voisinage neutre NCIn. L'indice de voisinage non neutre (donc NIh ou NId) est alors

$$NI_i = \frac{1}{NCIn_i} \times \left(\sum_{k=1}^K (\lambda_{sk} \times \sum_{j=1}^{J_k} \frac{DBH_j^2}{Distance_{ij}}) \right)$$

- Dans l'hypothèse de **hiérarchie compétitive** (NIh), le signe de la différence entre les valeurs de trait de l'arbre focal et de ses voisins est important, puisqu'on fait l'hypothèse que ces valeurs de traits reflètent la hiérarchie compétitive. Dans ce cas, on a donc $\lambda_{ks} = T_s - T_k$. Plus le NIh est fort, plus l'arbre focal a une valeur de trait élevée par rapport à celles des arbres de son voisinage.
- Dans l'hypothèse de **partitionnement des niches** (NId), c'est la dissimilarité entre les valeurs de traits de l'arbre focal et de ses voisins qui importe, donc le signe de la différence n'importe pas. Dans ce cas, on a donc $\lambda_{ks} = |T_s - T_k|$. Plus le NId est fort, plus la dissimilarité est grande entre les valeurs de traits de l'arbre focal et celles des arbres de son voisinage.

2.4.2 Anomalies climatiques

Les variables climatiques retenues pour les modèles sont les suivantes :

- le déficit hydrique climatique (*climatic water deficit* **CWD**, différence entre l'évapotranspiration potentielle et observée) représente la disponibilité en eau du sol. Une forte valeur de CWD correspond donc à un stress hydrique.
- le déficit de pression de vapeur (*vapour pressure deficit* **VPD**, différence entre la pression de vapeur saturée et observée) représente la demande évaporative. Une forte valeur de VPD correspond donc à un stress hydrique.
- le rayonnement solaire (*Solar radiation* **SRad**) représente la disponibilité en lumière. Une forte valeur de SRad correspond donc à une forte disponibilité en lumière.

- la température maximale (**Tmax**) qui représente un stress d'origine thermique.

Les données météorologiques utilisées proviennent du jeu de données global *TerraClimate* [33] car les données issues des stations météorologiques locales ne couvraient pas l'ensemble de la période des inventaires de Paracou ou présentaient trop de données manquantes. Pour chacune des variables climatiques, nous avons calculé les moyennes (μ_{ref}) et écarts-types (σ_{ref}) mensuels sur une période de référence de 31 ans (1990-2020). Nous nous sommes servis de cette référence pour calculer les anomalies mensuelles standardisées pour chaque mois. Nous avons ensuite pris la moyenne de ces anomalies mensuelles standardisées sur les 24 mois qui couvrent l'intervalle entre deux inventaires forestiers pour obtenir l'anomalie climatique de cet intervalle t , comme suit [34,35]:

$$Anomalie_t = \frac{\sum_{m=1}^{24} \frac{\mu_{m,t} - \mu_{m,baseline}}{\sigma_{m,baseline}}}{24}$$

Une anomalie positive représente donc une valeur de l'indice climatique pour l'année considérée plus forte que la valeur moyenne observée sur la période de référence. Les anomalies observées à Paracou pour chaque intervalle de la période d'étude sont présentées en Figure 10 [20].

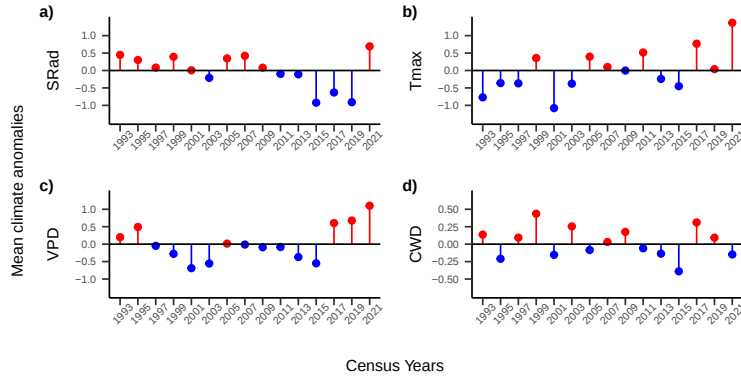


Figure 10: Anomalies climatiques observées sur Paracou pour chaque intervalle entre deux inventaires [20]

2.5 Modèles de croissance basés sur les interactions de voisinage neutres

2.5.1 Présentation des modèles

Ces modèles estiment le logarithme de la croissance annuelle absolue (AGR: Absolute Growth Rate) de chaque individu pour chaque intervalle de temps en fonction de :

- son DBH au début de l'intervalle considéré pour représenter la variation de la croissance individuelle avec l'âge de l'arbre [36]
- la valeur de l'anomalie climatique (voir section 2.4.2) sur l'intervalle considéré
- son indice de voisinage neutre (NCIn) au début de l'intervalle considéré (voir section 2.4.1)
- l'interaction entre l'anomalie climatique et le voisinage neutre : si l'effet de cette interaction est du même signe que celui de l'effet du climat, le voisinage accentue l'effet du climat (et inversement si l'interaction est de signe opposé).

Les modèles prennent en compte le fait que les espèces diffèrent de par leur croissance intrinsèque et leur réponse à chacune des covariables. Pour cela, deux types de modèles sont paramétrés:

- le **modèle 1 d'interactions de voisinage neutres** considère que la croissance intrinsèque et la réponse de chaque espèce aux covariables peuvent être modélisées par une hyperloi centrée sur 0.
- le **modèle 2 d'interactions de voisinage neutres** considère que la croissance intrinsèque et la réponse de chaque espèce aux covariables peuvent être modélisées par une hyperloi qui inclut l'effet de la valeur de trait de l'espèce considérée.

Les modèles incluent une structure de covariances entre les paramètres spécifiques à l'espèce, ainsi qu'un effet aléatoire de l'individu et de la parcelle. Le DBH et le NCIn sont log-transformés. Toutes les variables sont centrées et réduites.

Chaque modèle (1 et 2) est paramétré pour chaque anomalie climatique prise séparément, et le modèle 2 est paramétré pour chaque trait pris séparément. Les équations de ces deux modèles sont données en Annexes 1 et 2.

2.5.2 Principaux résultats

Les modèles 1 et 2 d'interactions de voisinage neutres montrent (Figure 11) [20]:

- un effet des anomalies climatiques : un fort rayonnement solaire (SRad) conduit à une croissance plus rapide, tandis que de fortes températures (Tmax), un fort déficit hydrique (CWD) et un fort déficit de pression de vapeur (VPD) diminuent la croissance,
- un effet fort des interactions de voisinage neutres : un fort NCIn (c'est à dire des voisins nombreux, gros et/ou proches) réduit la croissance,
- une atténuation de l'effet du climat par les interactions de voisinage neutres : l'effet positif du rayonnement solaire est moins fort si l'individu considéré a un fort NCIn, et l'effet négatif de la température, du déficit hydrique et du déficit de pression de vapeur est également moins fort dans ce cas.

Le modèle 1 a été paramétré pour toutes les parcelles en même temps, puis séparément pour les parcelles non-perturbées et pour les parcelles qui ont subi une exploitation sylvicole expérimentale. Les résultats montrent que les effets des covariables sont de même signe pour les deux types de parcelles, mais que ces effets sont généralement plus forts en parcelles exploitées (Figure 11) [20]. Ceci peut venir à la fois de différences dans la composition spécifique des deux types de parcelles (plus d'espèces pionnières potentiellement plus sensibles aux anomalies climatiques et au voisinage en parcelles exploitées), et du fait qu'une ouverture plus grande de la canopée dans les parcelles exploitées peut exacerber les effets des anomalies climatiques.

Les deux formes de modèles mettent également en évidence des différences fortes entre espèces. Le modèle 1 montre que les espèces à croissance rapide sont globalement plus sensibles aux anomalies climatiques et aux interactions de voisinage neutre [20]. Ces différences entre espèces sont en partie capturées par les traits fonctionnels considérés, comme le montrent les résultats du modèle 2. Nous ne présentons ici que les résultats concernant les traits qui seront utilisés pour l'activité 3 (section 4.4.2), pour les autres traits, voir [20].

- une forte densité apparente du bois (WSG) indique une croissance intrinsèque plus lente mais également une sensibilité moins forte aux anomalies climatiques (Tmax, VPD et CWD) et à l'effet des interactions de voisinage neutres, ainsi qu'un effet d'atténuation de la température par les voisins moins fort.
- une forte densité stomatique (SD) indique une croissance intrinsèque plus rapide mais également une sensibilité plus forte aux anomalies climatiques (Tmax, VPD et CWD) et à l'effet des interactions de voisinage neutres.
- un potentiel hydrique au point de flétrissement de la feuille (Ptlp) fortement négatif indique une plus faible sensibilité aux anomalies climatiques (Tmax, VPD et CWD).

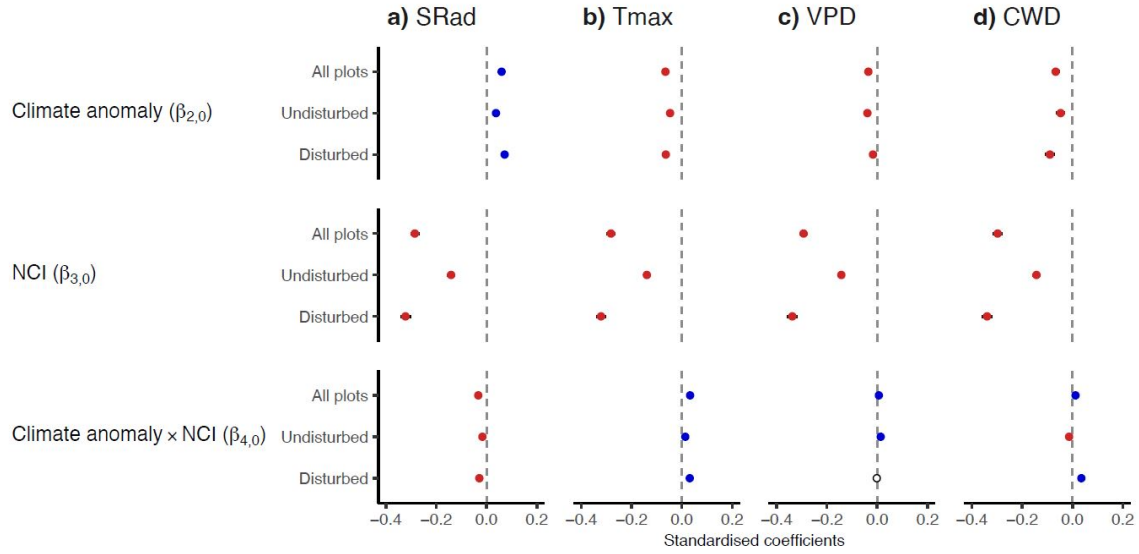


Figure 11: Réponse de la croissance individuelle des arbres aux anomalies climatiques (climate anomaly), aux interactions de voisinage neutres (ici NCI désigne NCIn) et à l'interaction de ces deux effets (Climate anomaly x NCI), pour l'ensemble des parcelles (All plots) et pour les parcelles non perturbées (Undisturbed) et perturbées par l'exploitation forestière expérimentale (Disturbed) prises séparément. SRad est le rayonnement solaire, Tmax la température maximale journalière, VPD le déficit de pression de vapeur et CWD le déficit hydrique climatique. Toutes les covariables sont centrées et réduites de sorte que les effets puissent être comparés directement. Les cercles rouges indiquent des effets négatifs et les bleus des effets positifs. Les traits noirs (peu visibles) indiquent les intervalles de crédibilité à 90 pourcent. [20]

2.6 Modèles de croissance incluant les interactions de voisinage non-neutres

2.6.1 Présentation des modèles

Ces modèles estiment le logarithme de la croissance annuelle absolue (AGR: Absolute Growth Rate) de chaque individu pour chaque intervalle de temps en fonction de :

- son DBH au début de l'intervalle considéré pour représenter la variation de la croissance individuelle avec l'âge de l'arbre [36]
- la valeur de l'anomalie climatique (voir section 2.4.2) sur l'intervalle considéré
- son indice de voisinage neutre (NCIn) au début de l'intervalle considéré (voir section 2.4.1)
- son indice de hiérarchie compétitive avec son voisinage (NIh) au début de l'intervalle considéré (voir section 2.4.1)
- son indice de dissimilarité avec son voisinage (NIId) au début de l'intervalle considéré (voir section 2.4.1)
- l'interaction entre l'anomalie climatique et le voisinage neutre
- l'interaction entre l'anomalie climatique et l'indice de hiérarchie compétitive
- l'interaction entre l'anomalie climatique et l'indice de dissimilarité

Si l'effet de ces interactions est du même signe que celui de l'effet du climat, l'indice de voisinage considéré accentue l'effet du climat (et inversement si l'interaction est de signe opposé).

Les modèles prennent en compte le fait que les espèces diffèrent de par leur croissance intrinsèque et leur réponse à chacune des covariables, et prend en compte ces différences en les modélisant par une hyperloi centrée sur 0. Ils incluent une structure de covariances entre les paramètres spécifiques à l'espèce, ainsi qu'un effet aléatoire de l'individu et de la parcelle. Le DBH et les trois indices de voisinage sont log-transformés. Toutes les variables sont centrées et réduites.

Un modèle est paramétré pour chaque anomalie climatique prise séparément, et pour chaque trait pris séparément. Les équations de ces modèles sont données en Annexe 3.

2.6.2 Principaux résultats

Les modèles d'interactions de voisinage non-neutres confirment les effets des anomalies climatiques, des interactions de voisinage neutres et l'atténuation de l'effet du climat par les interactions de voisinage neutres observées par les modèles de voisinage neutre (voir section 2.5.2) [20,24], ce qui montre la robustesse de ces modèles.

De plus, ces modèles montrent un effet significatif des indices de voisinage non-neutres sur la croissance, qui est cependant moins important que l'effet du voisinage neutre et qui dépend du trait considéré. Une plus grande hiérarchie de traits (plus grand NIh) peut accroître ou diminuer la croissance, selon le trait considéré. Une plus grande dissimilarité de traits (plus grand NId) augmente généralement la croissance (Figure 12) [24].

Les indices de voisinage non-neutres modulent également la réponse aux anomalies climatiques, mais seulement pour certains traits. L'effet négatif des anomalies climatiques, quand il est significatif, montre généralement une atténuation de l'effet des anomalies climatiques par une plus grande valeur de trait de l'arbre focal (fort NIh) et par une forte dissimilarité des valeurs de traits entre l'arbre focal et ses voisins (fort NId) [24].

Nous ne détaillons ici que les résultats concernant les traits et les variables climatiques qui seront utilisés pour l'activité 3 (section 4.4.3), pour les autres traits et variables climatiques, voir [24].

- pour la conductance minimale des feuilles (Gmin), un fort NIh, indiquant que l'arbre focal a une valeur de Gmin globalement plus forte que celles de ses voisins, diminue la croissance de l'arbre focal. De plus, un fort NIh et un fort NId (une forte dissimilarité) atténuent l'effet négatif des fortes températures sur la croissance.
- pour le potentiel hydrique au point de flétrissement de la feuille (Ptlp), une forte dissimilarité (fort NId) atténue l'effet négatif du fort déficit hydrique climatique sur la croissance.

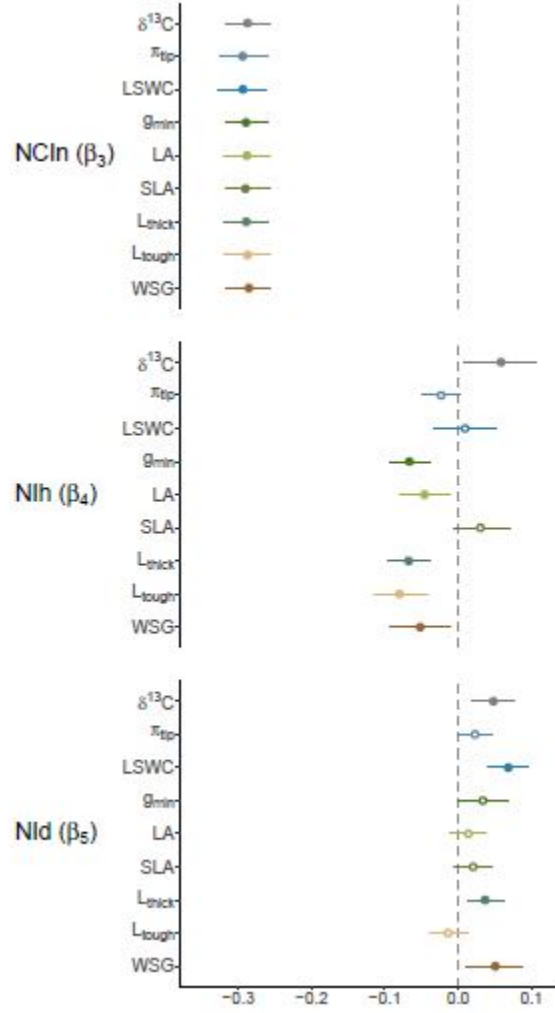


Figure 12: Réponse de la croissance individuelle des arbres aux trois indices d'interactions de voisinages neutres (NCIn), de hiérarchie compétitive (Nlh) et de dissimilarité (Nld) pour chacun des traits étudiés (voir la Table 2 pour la signification des traits). Les résultats présentés ici sont ceux des modèles de température mais les résultats sont similaires pour tous les indices climatiques. Toutes les covariables sont centrées et réduites de sorte que les effets puissent être comparés directement. Les cercles pleins indiquent des résultats significatifs. Les traits horizontaux indiquent les intervalles de crédibilité à 90 pourcent. [24]

3 Activité 2 : Définir des scénarios de gestion sylvicole

3.1 Rappel des objectifs spécifiques et de la méthodologie

L'objectif de cette activité est de co-construire avec le partenaire gestionnaire, l'ONF, des scénarios de gestion dont on souhaite tester les effets sur la résilience des forêts aux changements climatiques.

3.2 Scénarios retenus

Une dizaine de réunions (présentiel ou vidéoconférence) entre l'équipe scientifique (UMR EcoFoG) et les ingénieurs du pôle Recherche et Développement de l'ONF Cayenne ont eu lieu entre septembre 2020 et juin 2021. Elles ont permis d'établir les huit scénarios présentés dans la Table 3 et dans l'Annexe 4.

Les scénarios de gestion sont construits autour de trois paramètres dont on fait varier les valeurs :

- l'intensité de prélèvement, *i.e.* le volume objectif de grume : deux modalités ont été retenues :
 - Pratique actuelle (20-25 m³ de grume/ha, soit 4 à 5 arbres)
 - Objectif d'intensification tel que prévu par le *Programme Régional de la Forêt et du Bois* [37] (25-30 m³ de grume/ha, soit 5 à 6 arbres)
- le niveau de diversification de la récolte, dans le contexte de diversification souhaitable des espèces prélevées pour diminuer la pression actuelle sur le faible nombre d'espèces exploitées, et anticiper les effets du changement climatique sur les espèces les plus vulnérables :
 - Pas de diversification : sélection des 8 ECMP (Essences Commerciales Majeures Principales) uniquement
 - Diversification choisie : les 8 ECMP + 54 autres espèces économiques exploitées ces 10 dernières années, choisies de manière équiprobable
 - Diversification seulement si le peuplement est trop pauvre pour atteindre le volume objectif : les 8 ECMP sont choisies prioritairement et les 54 autres espèces permettent de compléter pour atteindre le volume objectif
- le type d'exploitation : nous avons choisi de tester les différents niveaux d'Exploitation à Faible Impact (EFI) tels que mis en place en Guyane. Ces différents niveaux diffèrent sur le matériel utilisé pour le débusquage (grappin ou câble synthétique) et les pratiques d'abattage directionnel (voir détails en Annexe 5). L'exploitation à Faible Impact de type 1 (EFI 1) correspondant aux pratiques mises en oeuvre en 2011 n'a pas été testé car elle s'est avérée difficile à modéliser via le simulateur (voir section 4.2.2), notamment du fait de la difficulté à expliciter les critères de tracé des pistes.
 - Exploitation à Faible Impact de type 2 dégradé (EFI 2 dégradé) correspondant aux pratiques mises en oeuvre en 2012
 - Exploitation à Faible Impact de type 2 (EFI 2) correspondant aux pratiques mises en oeuvre depuis 2014
 - Exploitation à Faible Impact de type 3 (EFI 3) correspondant aux pratiques vers lesquelles l'ONF souhaite tendre

La récolte de bois énergie provenant des dégâts d'exploitation uniquement, ou des dégâts d'exploitation et des arbres déterminés creux par l'exploitant et donc non-utilisé pour le bois d'œuvre a également été ajoutée dans des déclinaisons de l'EFI 3, car ces pratiques d'utilisation des dégâts sont préconisées par le *Programme Régional de la Forêt et du Bois* [37] et de plus en plus couramment mises en oeuvre.

Le paramètre de répartition spatiale des arbres prélevés prévu dans le projet initial a été abandonné, car les pratiques relatives ne sont pas formalisées et sont donc difficiles à tester.

Table 3: Scénarios d’exploitation: les scénarios 2 à 4 correspondent à des pratiques passées ou existantes, les autres scénarios sont des scénarios prospectifs peu ou pas encore mis en oeuvre. Plutôt que de tester toutes les déclinaisons possibles de paramètres pour les scénarios prospectifs, nous proposons un scénario pivot (scenario 5) autour duquel les autres scénarios sont construits en faisant varier les paramètres un à un.

Scénario	Type d’exploitation	Volume objectif de bois d’oeuvre (m3/ha)	Diversification	Mécanisation	Abattage directionnel
2	EFI2 dégradé	20-25	non	Non	Non
3	EFI2	20-25	non	Câble	Non
4	EFI3	20-25	oui	Grappin et câble	Oui
5	EFI3	25-30	oui	Grappin et câble	Oui
6	EFI3	25-30	oui si trop pauvre	Grappin et câble	Oui
7	EFI3	25-30	non	Grappin et câble	Oui
8	EFI3 BO + BE	25-30	oui	Grappin et câble	Oui
9	EFI3 BO + BE dont creux	25-30	oui	Grappin et câble	Oui

4 Activité 3 : Évaluer *in silico* les effets des différents scénarios de gestion sur les performances des arbres et la réponse des forêts au climat

Cette activité constitue la mission principale de Vinciane Badouard, la VSC recrutée pour le projet et de Margaux Rojat (stagiaire de MSc2).

4.1 Rappel des objectifs spécifiques et de la méthodologie

Cette activité combine les résultats des deux autres activités pour tester les impacts des scénarios de gestion sur les fonctionnalités des forêts guyanaises. Pour cela, une méthode de simulation des différents scénarios d'exploitation forestière développée par le projet est appliquée sur des parcelles de forêts naturelles du réseau Guyafor pour simuler des communautés forestières virtuelles post-exploitation. Les modèles de performances développés par l'activité 1 sont ensuite appliqués sur ces forêts virtuelles. L'effet de l'exploitation sur la réponse des communautés d'arbres au climat peut ensuite être évalué en comparant les performances des communautés avant (données réelles d'inventaires) et après exploitation (communautés simulées).

4.2 Simulation *in silico* de l'exploitation forestière

4.2.1 Explicitation des pratiques d'exploitation

Une quinzaine de réunions (présentiel ou vidéoconférence) entre l'équipe scientifique (UMR EcoFoG) et les ingénieurs du pôle Recherche et Développement de l'ONF Cayenne ont permis d'explicitier les pratiques et étapes de l'exploitation mises en oeuvre en forêt guyanaise, afin de préparer l'algorithme de simulation d'exploitation.

Les étapes de l'exploitation forestière sont les suivantes (voir Annexe 5 pour plus de détails) :

1. La définition de la zone à exploiter sur des critères de pentes maximales et d'évitement du réseau hydrographique (utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain). Des unités de prospection (UP) sont ensuite délimitées.
2. Le tracé des pistes de débardage principales desservant chacune des UP, positionnées en ligne de crête.
3. La désignation : cette étape est menée par l'ONF et consiste à identifier les *arbres exploitables*, les arbres qui seront exploités lors des campagnes prochaines (*arbres d'avenir*), ainsi que des arbres qui devront être protégés de l'exploitation car choisis comme garants du prochain peuplement (*arbres de réserve*).
4. La sélection des arbres par l'exploitant : identification des arbres présentant des défauts non-visibles (tronc creux) par sondage à la tronçonneuse
5. Le tracé des pistes de débardage secondaires en fonction du type d'exploitation et du matériel utilisé pour le débusquage (déplacement vers la piste de débardage au grappin ou au câble), en évitant les arbres à exploiter, les gros arbres et les arbres de réserve. Un schéma théorique du tracé des pistes de débardage secondaires est présenté en Figure 13
6. L'abattage de l'arbre de manière directionnelle ou non, en fonction du type d'exploitation
7. L'ajustement du tracé des pistes de débardage secondaires dans le cas d'exploitation en Bois Énergie (BE) pour favoriser l'accès au houpier
8. Le déplacement du fût : débusquage vers la piste de débardage puis débardage vers une place de dépôt

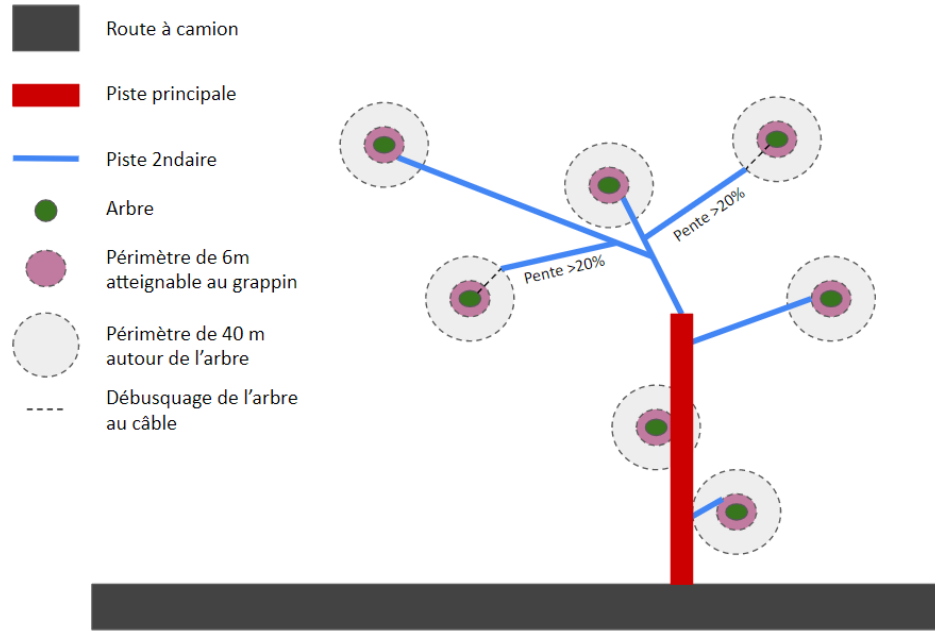


Figure 13: Architecture des pistes favorisant le grappin au câble. Le câble est utilisé uniquement lorsque la pente en long est supérieure à 20%. [38]

4.2.2 *LoggingLab*: un package R de simulation d'exploitation

Au cours du développement de l'algorithme d'exploitation, il nous est vite apparu que cet outil aurait une grande utilité pour la recherche appliquée à la gestion forestière en Guyane, au delà des objectifs du projet *ManagForRes*. Dans cet objectif d'utilisation large, nous avons fait le choix de développer un package R appelé *LoggingLab* permettant de simuler différents scénarios d'exploitation forestière et d'obtenir *in silico* des inventaires post-exploitation. Deux doctorants (Thomas Gaquière et Guillaume Salzet) l'utilisent pour leur travaux portant respectivement sur les effets de la dynamique de canopée de forêt exploitée sur les populations d'arbres récoltés, et sur la durabilité de la filière forêt-bois en Guyane française. Ces étudiants ont donc rejoint l'équipe de développement du package.

LoggingLab est un simulateur d'exploitation forestière individu centré (ce qui signifie que le devenir de chaque arbre lors de l'exploitation est simulé) et spatialisé. *LoggingLab* simule l'exploitation forestière sélective de bois d'œuvre selon les pratiques de l'exploitation à faible impact (EFI) dans une parcelle forestière. Ce package inclut également la possibilité de récolter du bois énergie comme sous-produit de la production de bois d'œuvre. Il couvre les différentes étapes de l'exploitation forestière telles que détaillées en section 4.2, de la définition des zones exploitables à l'abattage des arbres. Il propose une fonction pour simuler l'ensemble du processus d'exploitation forestière (`loggingsimulation`) mais il est également conçu pour être modulaire, chaque fonction simulant une étape donnée du processus d'exploitation forestière pouvant être utilisée indépendamment (Figure 14) [38].

Les données d'entrée nécessaires au fonctionnement de *LoggingLab* sont : un inventaire forestier du même type que les inventaires de Guyafor (localisation, DBH et identification botanique de tous les arbres au dessus d'un certain DBH), un raster du modèle numérique de terrain (MNT) de la parcelle considérée donnant la topographie, des rasters de la distance horizontale et verticale au point de drainage le plus proche qui peuvent être facilement générés à partir du MNT. Le package renvoie les données suivantes en sortie (Figure 15) [38]:

- l'inventaire forestier d'entrée auquel sont rajoutées des colonnes donnant les dimensions des arbres (hauteur, volume exploitable, hauteur du tronc, hauteur et diamètre de la couronne, densité du bois et biomasse aérienne), le statut de l'arbre (exploitable, non-exploitable, arbre d'avenir, arbre de réserve,

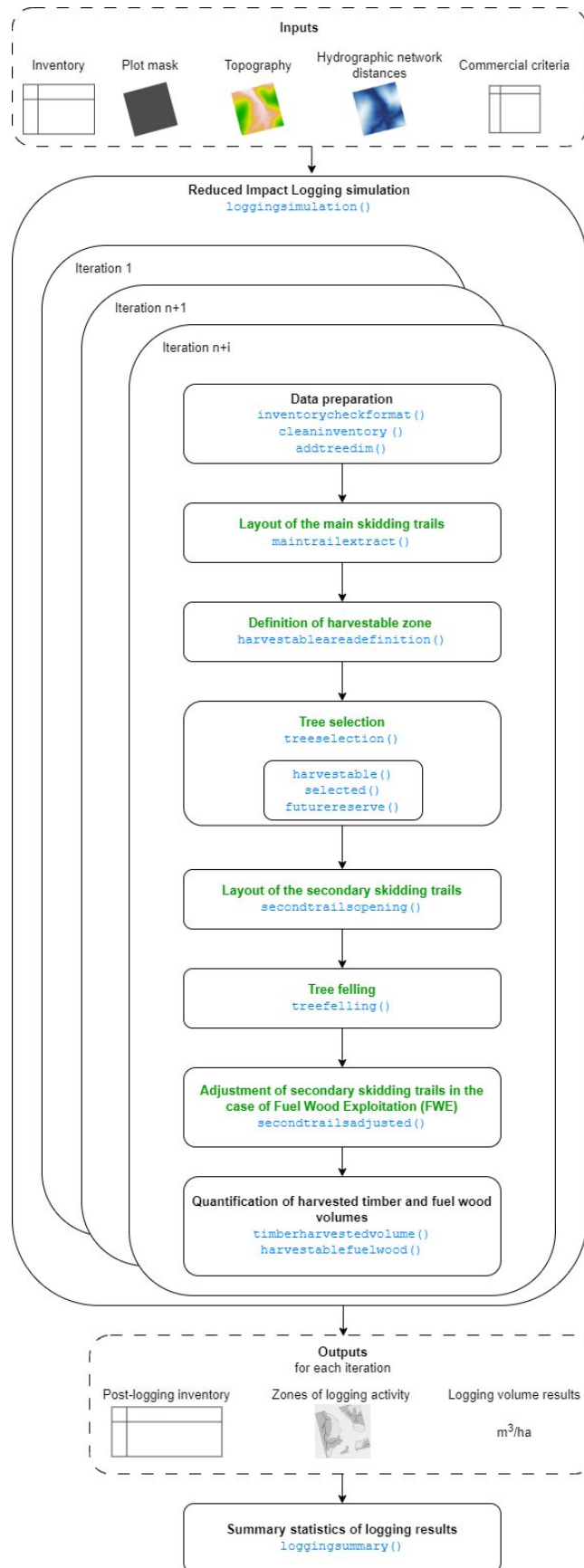


Figure 14: Fonctionnement du package LoggingLab: en vert les étapes réelles de l'exploitation forestière, en noir les étapes additionnelles du package et en bleu le nom des fonctions réalisant les différentes étapes dans le package. [38]

arbre sélectionné pour l'exploitation), la cause de la mort de l'arbre le cas échéant (ouverture de piste, chablis d'exploitation, exploité), et une colonne donnant les coordonnées géographiques de l'empreinte de l'arbre au sol pour chaque arbre exploité. Si plusieurs itérations de simulation sont faites, cet inventaire est donné pour chaque itération.

- des couches géographiques des zones exploitables et du tracé des pistes, pour chaque simulation.
- les résultats de l'exploitation pour chaque simulation : volume de grume et de bois énergie, surface exploitable, volume de dégâts d'exploitation, densité de pistes, etc. . .

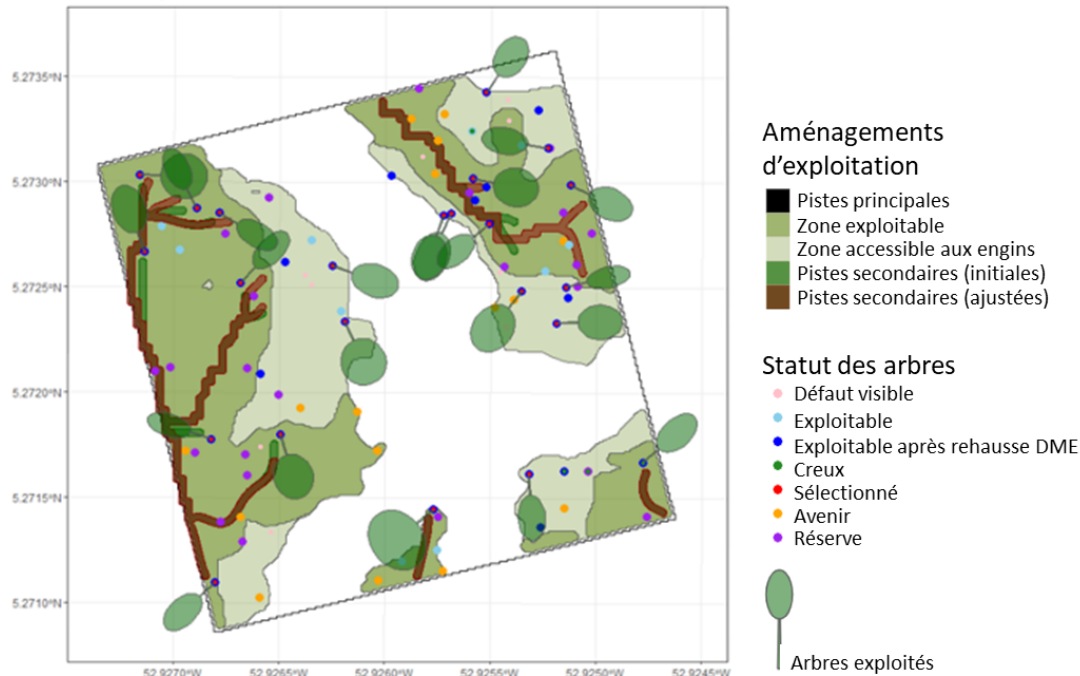


Figure 15: Sortie d'une simulation de LoggingLab (parcelle 6 de Paracou, scénario 9) [38]

Pour une même parcelle et un même scénario d'exploitation, on peut observer de la variabilité entre les simulations, due à la stochasticité de certaines étapes de la simulation de l'exploitation. Au moment de la désignation par exemple, certains arbres considérés comme exploitables peuvent présenter des défauts (modèle probabiliste), d'autres doivent alors être désignés et exploités afin d'atteindre le volume objectif. La désignation n'est pas toujours la même, comme on peut le voir sur la Figure 16. Ensuite, les pistes de débardage secondaires doivent être tracées, de sorte à récupérer les arbres exploités et rejoindre la piste de débardage principale, représentée dans le simulateur par le tour de la parcelle considérée. Le tracé des pistes est optimisé par le simulateur grâce à un raster de coût, qui minimise la longueur totale du tracé et le passage dans des zones dont la topographie est importante, et évite les gros arbres, les arbres réserve et les arbres d'avenir. La distance maximale entre la piste secondaire et le pied des arbres exploités à débusquer dépend du type de mécanisation (l'engin de débusquage peut être un bulldozer, un grappin, ou un grappin et un câble). Ce paramètre induit ainsi de la variabilité entre scénarios. De surcroît, il y a de la variabilité entre itérations d'un même scénario car le point d'entrée de chaque piste secondaire est choisi aléatoirement dans les zones d'intersection entre la surface de l'UP et le tour de la parcelle. Ceci est illustré dans la figure 17. De plus, au moment de l'abattage, une probabilité non-nulle est associée à l'échec de l'abattage directionnel, l'orientation prise par le fût est alors aléatoire. Ce paramètre fait également varier le tracé des pistes secondaires, notamment dans le cas où les houppiers des arbres exploités sont récupérés et où les pistes

sont adaptées après l’abattage. Du fait de cette variabilité, un nombre d’itérations minimal à lancer pour chaque scénario et chaque parcelle a dû être déterminé. Pour ce faire, la distribution de certaines valeurs numériques renvoyées par le simulateur a été analysée. L’attention a été mise sur le nombre d’itérations suffisant pour que la médiane de la valeur numérique se stabilise. Entre 20 et 30 itérations ont été identifiées comme suffisantes pour la stabilité des analyses.

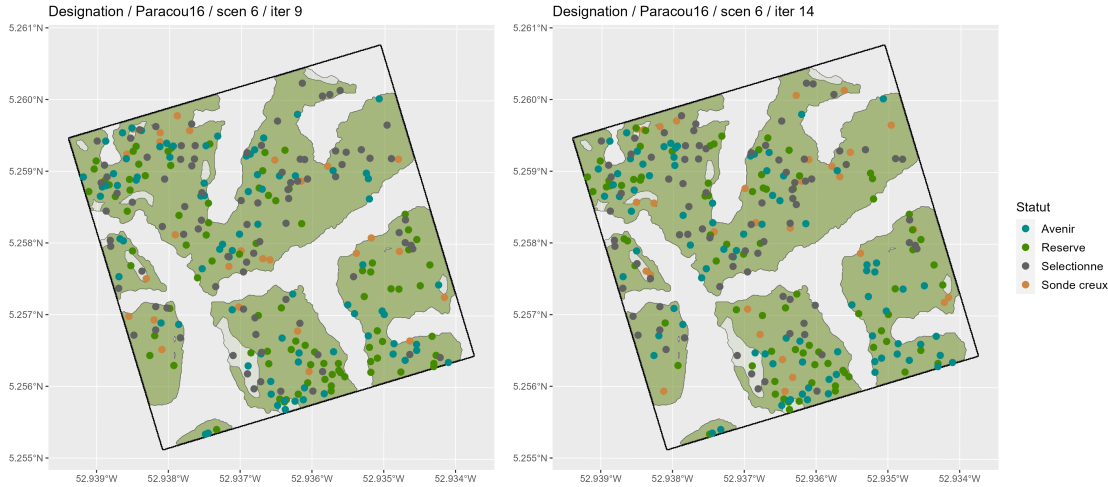


Figure 16: Variabilité de l’étape de désignation: deux itérations de simulation du scénario 5 pour la parcelle 16 du dispositif de Paracou

Les paramètres que *LoggingLab* propose par défaut sont adaptés au contexte de l’exploitation forestière en Guyane, et les scénarios proposés par défaut sont ceux de la présente étude (voir section 3.2). Cependant, ce package a été conçu pour être accessible et flexible, ce qui le rend facilement adaptable à d’autres contextes. Il répond aux critères de bonnes pratiques et est testé et contrôlé pour tous les systèmes d’exploitation. Enfin, comme ce package simule l’exploitation forestière sélective de manière bien plus détaillée que ne le font la majorité des simulateurs de dynamique forestière [38], il est intéressant de l’utiliser de manière couplée avec ces simulateurs afin de simuler le devenir à long terme des forêts exploitées. Il est à ce titre inter-opérable avec le simulateur de dynamique forestière TROLL [39] via le package *rcontroll* [40].

Le code du package *LoggingLab* est libre et disponible sur GitHub (<https://github.com/VincyaneBadouard/LoggingLab>). Un tutoriel d’utilisation y est également proposé (<https://vincyanebadouard.github.io/LoggingLab/index.html>).

4.3 Evaluation des différents scénarios d’exploitation

4.3.1 Choix des parcelles

Le réseau Guyafor comporte 24 parcelles naturelles, qui n’ont pas subi de traitement sylvicole et dont les arbres ont été inventoriés, mesurés et botaniquement identifiés. Pour les besoins de l’activité 3, une sélection basée sur les caractéristiques nécessaires à l’utilisation du simulateur et le calcul du voisinage a permis de ne garder qu’un nombre réduit de ces parcelles. La première condition de la sélection était l’existence et la disponibilité des données topographiques de la parcelle issues du Modèle Numérique de Terrain acquis par LiDAR (*Light Detection and Ranging*). La deuxième étape consistait à évaluer l’exactitude du gap-filling de l’identification botanique à partir des noms vernaculaires effectuée avec le package R *vernabota* [23]. De plus, la proportion d’individus finalement identifiés à l’espèce, après amélioration par le gap-filling a été évaluée,

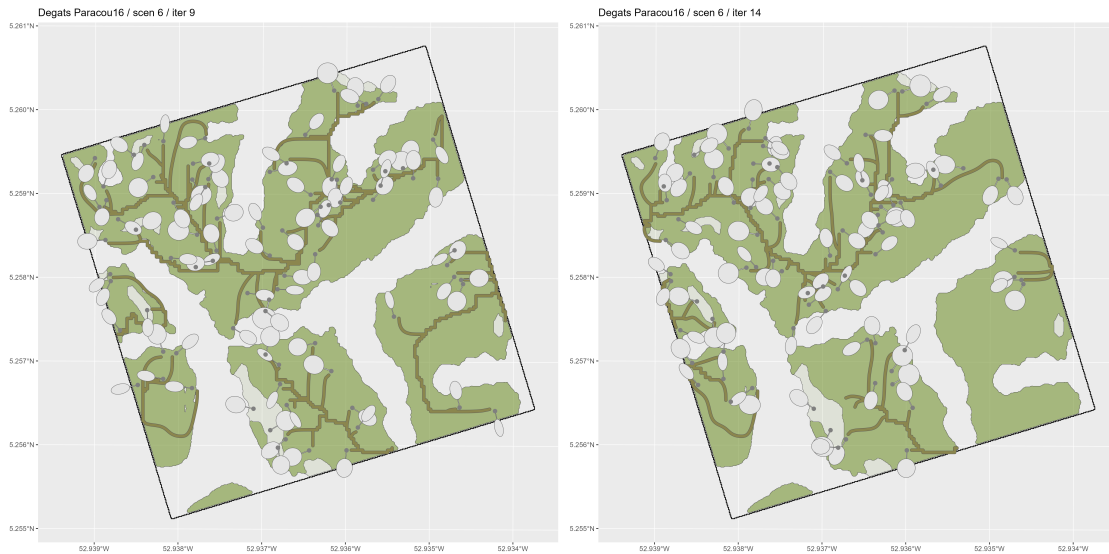


Figure 17: Variabilité du tracé des pistes (deux itérations de simulation du scénario 6 pour la parcelle 16 du dispositif de Paracou)

ainsi que la proportion de surface terrière représentée par des espèces dont les traits ont été mesurés lors de l'activité 1 du projet (section 2.3). Enfin, les parcelles dont la surface des zones exploitables calculée par le simulateur était la plus grande ont été conservées. Ainsi, ont été retenues la parcelle Javouhey à Acarouany, Crique Plomb à Montagne Plomb, ainsi que les parcelles 11 et 16 du dispositif de Paracou et Saut-Lavilette à Régina Saint-Georges (Table 4).

4.3.2 Volumes exploités

A la suite des simulations, le volume de bois d'œuvre produit a été examiné, de manière à vérifier que l'exploitation simulée a bien permis la production d'un volume de bois cohérent avec le volume-objectif (Figure 18). Les résultats montrent que le volume de bois d'œuvre extrait atteint dans la majorité des cas le volume-objectif, de 20 à 25 ou 25 à 30 m³ par hectare, selon les scénarios. Néanmoins, pour deux des parcelles, Acarouany et Paracou 11, le volume-objectif n'est pas atteint pour trois des huit scénarios. Il s'agit

Table 4: Caractéristiques des parcelles ayant été sélectionnées pour l'étude sur les impacts de l'exploitation forestière sur la diversité et les interactions biotiques entre les arbres des forêts de Guyane pour le projet ManagForRes.

Forêt	Parcelle	Surface (ha)	Surface exploitable (ha)	Abondance (nombre d'arbres)	Richesse spécifique (nombre d'espèces)	Individus identifiés à l'espèce (%)	Individus d'espèces dont on a mesuré les traits (%)	Surface terrière d'espèces dont on a mesuré les traits (%)
Acarouany	Javouhey	6	4,22	2 720	268	94,85	50,09	56,99
Montagne Plomb	Crique Plomb	6	4,78	2 950	247	79,39	31,6	52,44
Paracou	11	6,25	4,18	3 844	272	99,53	74,41	80,67
Paracou	16	25	15,8	12 463	428	98,47	62,01	67,04
Régina - St Georges	Saut Lavilette	6	4,16	3 269	273	94,55	42,83	50,72

des cas où l'exploitation est faite sans diversification, c'est-à-dire qu'elle se concentre sur les 8 ECMP. Ces résultats indiquent que ces parcelles sont trop pauvres en individus appartenant à ces espèces. Ceci illustre la nécessité d'exploiter une liste diversifiée d'espèces dans les sites les plus pauvres. Néanmoins, pour les autres parcelles, le simulateur a permis d'atteindre le volume-objectif pour au moins 50% des cas à chaque fois (le losange orange étant la médiane de la valeur). La suite de l'analyse sera donc conduite uniquement sur ces trois parcelles.

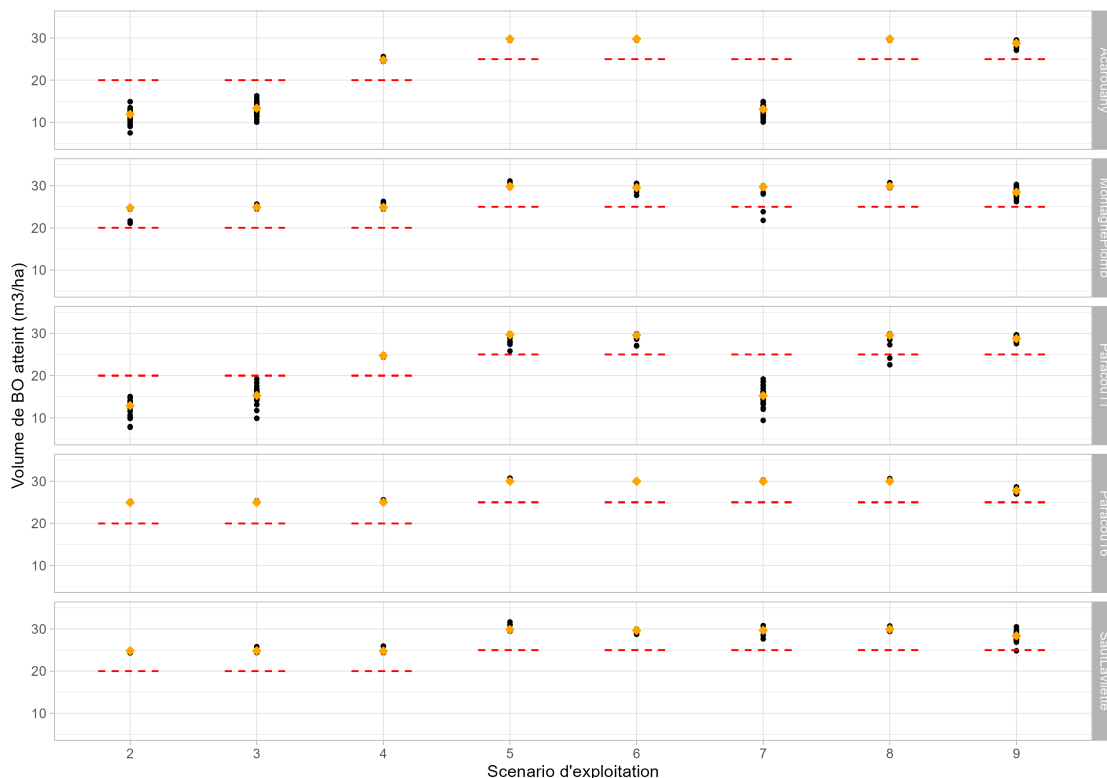


Figure 18: Volume de bois d'œuvre extrait par hectare selon les scénarios d'exploitation testés pour les cinq parcelles étudiées. Les points noirs représentent les 30 itérations de simulation, le losange orange la valeur médiane et le trait rouge pointillé le volume objectif

4.3.3 Dégâts d'exploitation

Pour évaluer les différentes pratiques d'EFI simulées avec *LoggingLab*, elles ont été comparées selon la biomasse aérienne perdue représentée par les arbres morts pour chaque scénario et chaque parcelle. Pour pouvoir comparer les pratiques d'exploitation elles-mêmes et les parcelles testées dans le cadre de cette étude, la quantité de biomasse a été ramenée à l'hectare exploitable et représentée selon le devenir du bois (Figure 19).

Premièrement, on observe que la biomasse de bois d'œuvre (la grume des arbres exploités) est assez stable selon les scénarios pour chaque parcelle, avec cependant des valeurs plus faibles pour les scénarios pour lesquels le volume-objectif est de 20-25 m³/ha (scénarios 2, 3 et 4). La biomasse contenue dans le bois d'œuvre ne représente qu'une faible proportion de la biomasse aérienne perdue totale (Figure 19), ce qui indique que celle-ci est en majorité constituée des dégâts d'exploitation (Table 5). Selon les scénarios, la biomasse considérée comme dégâts est soit laissée sur place, soit en partie valorisée comme bois énergie [41]. Laisser du bois mort sur place après exploitation permet de mimer les phases de sénescence des cycles forestiers naturels [42] en favorisant l'enrichissement du sol via la formation d'humus et crée des micro-habitats utilisés par de nombreux organismes. Toutefois, valoriser une partie de ces dégâts en bois énergie permet d'améliorer le

Table 5: Pourcentage de dégâts (ultimes et valorisés en bois énergie) dans la biomasse perdue totale

Scenario	Montagne Plomb	Paracou 16	Saut Lavilette
2	73.2	76.0	74.4
3	68.7	70.4	67.6
4	73.4	75.3	71.1
5	74.1	74.7	69.9
6	74.3	74.6	71.8
7	73.4	75.0	71.8
8	72.6	74.4	70.8
9	74.4	75.7	71.9

bilan carbone de l'exploitation, à condition que l'énergie ainsi produite se substitue à une énergie fossile plus émettrice [9].

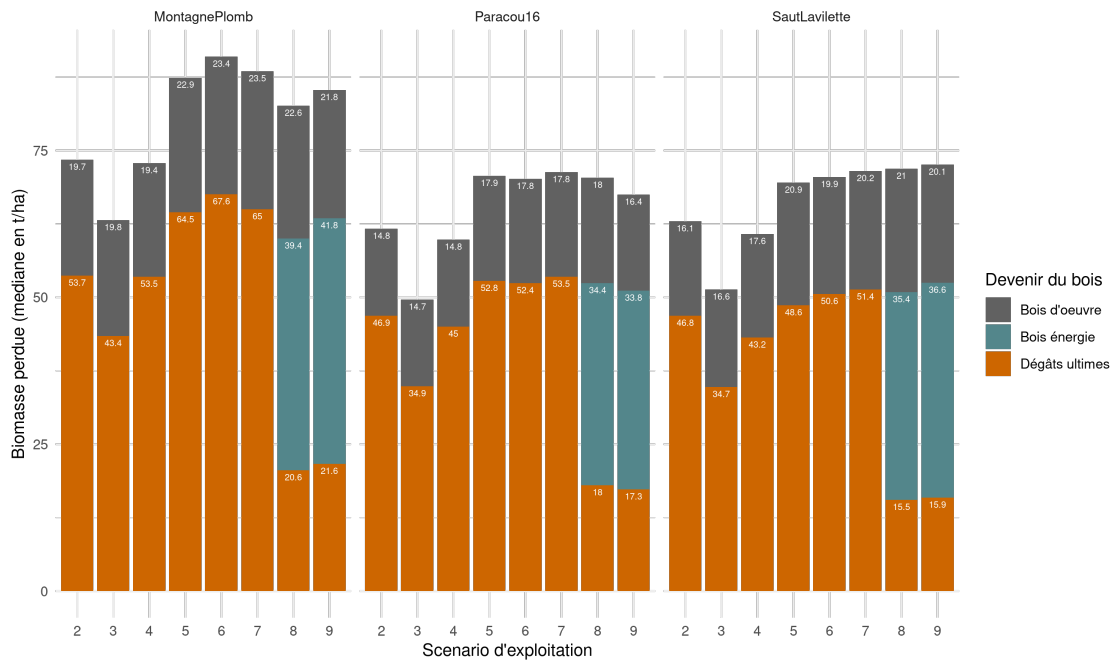


Figure 19: Biomasse perdue selon le devenir du bois en fonction des scénarios d'exploitation

Évaluer les pratiques pour limiter les dégâts reste donc un enjeu majeur. Ainsi, afin de comprendre plus précisément l'influence des pratiques d'exploitation testées au sein des scénarios, identifier les meilleures pratiques et communiquer au gestionnaire les préconisations opérationnelles pour l'EFI en Guyane française, nous avons choisi de considérer la biomasse aérienne perdue selon la cause de la mort des arbres (Figure 20). Enfin, la densité de pistes de débardage secondaires a été analysée (Figure 21).

On observe que les résultats de la parcelle Montagne Plomb sont systématiquement supérieurs à ceux des deux autres parcelles, assez similaires entre eux. Cette différence entre les parcelles pourrait s'expliquer par des caractéristiques propres comme la disposition des zones exploitables (fonction de la topographie) et des arbres d'intérêt commercial.

On observe des différences entre scénarios en ce qui concerne la quantité et les types de dégâts. Ces différences sont similaires entre les parcelles, ce qui confirme que les pratiques sylvicoles choisies influencent beaucoup les dégâts. Ainsi, on observe que le scénario 3 provoque toujours une quantité de biomasse perdue inférieure aux autres scénarios (environ 60 t/ha pour Montagne Plomb, et environ 50 t/ha pour Paracou 16 et Saut Lavilette), même ceux produisant un volume de bois d'œuvre équivalent (scénarios 2 et 4), ainsi qu'une

proportion de dégâts dans la biomasse perdue moins importante (Table 5). Cela s'explique par le paramètre de mécanisation choisi 3. En effet, dans le scénario 3, seul le câble est utilisé, ce qui permet de rester à une distance jusqu'à 40 m du fût à débusquer, diminuant ainsi la densité de pistes, et la biomasse représentée par les arbres tués pour les pistes secondaires. La Figure 20 l'illustre bien : la biomasse perdue représentée par ces arbres est réduite de moitié par rapport aux autres scénarios. L'utilisation du câble est donc très intéressante de ce point de vue.

Les résultats des scénarios 2 et 4 sont assez équivalents entre eux, avec environ 75 t/ha de biomasse perdue pour Montagne Plomb, et environ 60 t/ha pour Paracou 16 et Saut Lavilette. Pourtant, ces scénarios diffèrent selon leur paramètre de mécanisation, d'abattage directionnel et de choix des espèces (diversification). On pouvait donc s'attendre à ce que la biomasse perdue avec le scénario 4 soit bien inférieure, alors qu'elle ne l'est que légèrement. Cependant, l'objectif de l'abattage directionnel est avant tout d'éviter les arbres de réserve ou d'avenir, donc le fait que ce paramètre ne joue pas directement sur la quantité de dégâts n'est pas surprenant.

Pour la mécanisation, on s'attendait à ce que le paramètre du scénario 4 - débusquage à distance par le câble et le grappin - diminue significativement les dégâts vis-à-vis de celui du scénario 2 - débusquage au pied des fûts par le bulldozer. On s'attendait donc à une diminution de la densité des pistes par hectare, ainsi que la quantité de biomasse perdue relative aux arbres de pistes secondaires. La figure (Figure 21) ne soutient pas ces résultats attendus, puisqu'elle montre que la variable densité de pistes varie selon les scénarios de la même façon que la biomasse perdue. Quant aux arbres de pistes, on remarque une diminution de la quantité de biomasse perdue pour Paracou 16 et Saut Lavilette vis-à-vis du scénario 2, mais pas pour Montagne Plomb. Cela peut correspondre au paramètre de mécanisation, ou à la réalisation de l'abattage directionnel du fût vers la piste, même si cela reste à confirmer.

De plus, concernant l'abattage directionnel, on s'attendait à ce que les chablis secondaires soient réduits puisque cette méthode vise à éviter les arbres d'avenir et réserve. Pour Montagne Plomb, on remarque une légère diminution de la quantité de biomasse relative aux arbres morts par chablis secondaires (en rouge), mais ce n'est pas le cas pour les deux autres parcelles. En effet, le fût doit éviter les arbres d'avenir et réserve, mais peut alors être redirigé vers d'autres arbres, ce qui n'influence donc pas la quantité de biomasse détruite.

Pour la diversification, c'est un paramètre qui permet de diminuer l'atteinte sur les populations d'ECMP, néanmoins l'influence de ce paramètre sur la biomasse perdue n'est pas évidente et dépend sans doute beaucoup de la disposition des zones exploitables et celle des arbres d'intérêt commercial. De plus, puisque ce paramètre permet de cibler un pool d'individus plus large à exploiter, il est possible qu'au moment de la désignation, la variabilité soit plus importante entre les itérations. C'est effectivement ce qu'on observe sur la Figure (Figure 21) pour la parcelle Saut Lavilette, mais pas pour les autres parcelles.

Enfin, les résultats des scénarios 5 à 9 montrent une destruction de biomasse globalement supérieure aux autres, ce qui est cohérent puisque le volume-objectif de bois d'oeuvre extrait par hectare est supérieur pour ces scénarios (25 - 30 m³/ha). La parcelle 16 de Paracou montre une variabilité entre les scénarios très faible, et ce pour toutes les catégories de cause de la mort. Le fait que les quantités de biomasse perdues varient peu entre ces scénarios n'est pas surprenant, car ils ne diffèrent que par l'utilisation des dégâts en bois énergie et le paramètre de diversification. Ces paramètres n'ont pas pour objectif premier de réduire les dégâts mais de valoriser ces dégâts et diluer les effets de l'exploitation sur un grand nombre d'espèces, respectivement.

Au vu de ces résultats, l'utilisation du câble semble être la pratique d'exploitation la plus efficace en terme de réduction des dégâts.

4.4 Réponse de la croissance individuelle des arbres aux scénarios de gestion et aux effets du climat

4.4.1 Méthode de prédiction

Pour étudier la réponse de la croissance individuelle des arbres aux effets combinés de l'exploitation forestière et du climat, nous utilisons les modèles de croissances développés dans l'activité 1 (sections 2.5 et 2.6) et le

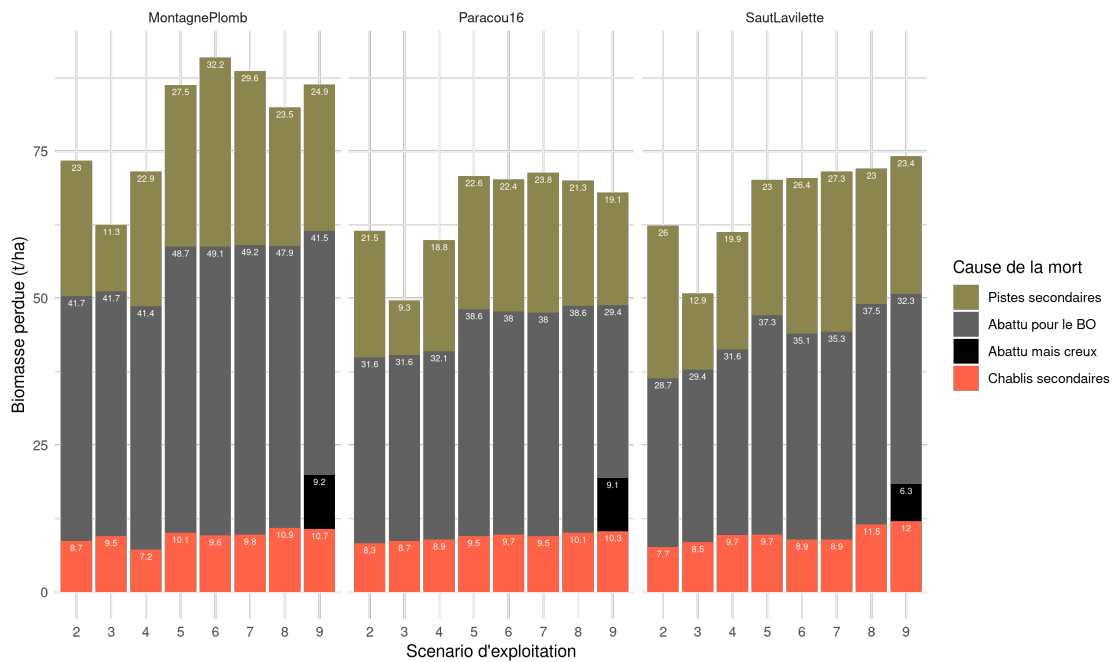


Figure 20: Biomasse perdue selon la cause de la mort des arbres en fonction des scénarios d'exploitation

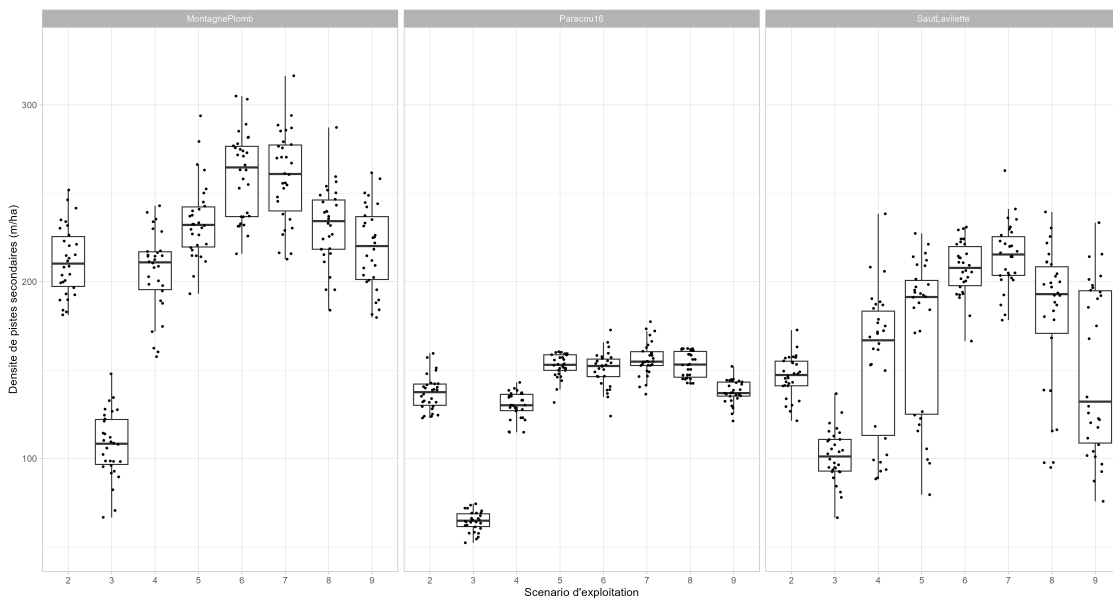


Figure 21: Densité de pistes de débardage secondaires selon les différents scénarios d'exploitation pour les trois parcelles étudiées

simulateur d’exploitation *LoggingLab* (section 4.2.2). Nous appliquons les modèles de croissance de manière prédictive sur les communautés d’arbres pré-exploitation (données réelles d’inventaire) et sur les communautés post-exploitation (après simulation d’exploitation avec *LoggingLab*) pour prédire la croissance individuelle des arbres de ces communautés. Nous réalisons ces prédictions pour deux types d’années :

- les années à climat normal (anomalie climatique nulle, c’est à dire que les variables climatiques de l’année sont égales à la valeur moyenne de ces variables entre 1990 et 2020)
- les années dites “extrêmes” pour lesquelles les anomalies climatiques sont égales au maximum observé entre 1990 et 2020, c’est à dire en 2021 pour la température et en 1999 pour le déficit hydrique climatique (section 2.4.2).

Pour chaque scénario d’exploitation, 30 itérations de simulation d’exploitation sont considérées et 10 tirages sont effectués parmi la distribution postérieure des paramètres des modèles. Ceci aboutit à ce que les effets de chaque scénario d’exploitation et de chaque type d’année soient testés sur 300 communautés correspondant à une parcelle donnée, ce qui permet de considérer les incertitudes liées aux prédictions. Toutes les prédictions sont effectuées sur les données issues de la parcelle 16 de Paracou, qui est la parcelle la plus grande, qui atteint le volume objectif et a une bonne proportion d’arbres identifiés botaniquement et appartenant à des espèces dont on a mesuré les traits (Table 4).

Toutes les variables sont transformées et standardisées en utilisant les mêmes valeurs que pour les données ayant servi à paramétrer les modèles. Les effets aléatoires liés à l’individu et à la parcelle sont fixés à 0, de sorte que tous les individus et la parcelle sont considérés comme des individus et parcelle moyens. Pour les espèces des communautés utilisées pour les prédictions qui appartiennent également au jeu de données ayant servi à paramétrer les modèles, les paramètres spécifiques à l’espèce sont utilisés. Pour les autres, un jeu de paramètres spécifiques à l’espèce différent pour chaque itération et chaque tirage est pris aléatoirement. Pour les espèces pour lesquelles les traits n’ont pas été mesurés, nous utilisons la moyenne des valeurs de traits des espèces pondérées par le nombre d’individus de chaque espèce calculée pour chaque scénario et chaque simulation d’exploitation. Les résultats prédits par le modèle sont ensuite transformés pour être exprimés en croissance annuelle absolue en diamètre mesuré à hauteur de poitrine (DBH).

4.4.2 Application des modèles basés sur les interactions neutres

Nous avons appliqué plusieurs des modèles de croissance basés sur les interactions de voisinage neutres :

- le modèle M1 (sans trait) avec la variable climatique T_{max} (température maximale journalière)
- le modèle M2 pour le trait de densité apparente du bois WSG et la variable climatique T_{max} (température maximale journalière)
- le modèle M2 pour le trait de potentiel hydrique au point de flétrissement de la feuille P_{tlp} et la variable climatique CWD (déficit hydrique climatique)
- le modèle M2 pour le trait de densité stomatique SD et la variable climatique CWD (déficit hydrique climatique)

Les prédictions de ces quatre modèles donnent des résultats similaires. Nous présentons donc ici les résultats du modèle M1. Les autres résultats sont présentés en Annexe 6.

La croissance des arbres prédite par les modèles basés sur les interactions neutres sont présentés dans le Table 6 et la distribution de la croissance des arbres en cm, pour chaque scénario et par type de climat (année normale ou année extrême) dans la Figure 22. Les effets de l’exploitation et du climat sur la croissance prédite par les modèles ont été testés grâce à des modèles mixtes construits avec le package *lmerTest* [43], où la variable expliquée est la croissance individuelle et les variables explicatives sont le scénario d’exploitation forestière et le type de climat (année normale ou année extrême). Une autre variable a été créée en combinant

Model1 for temperature - expected values

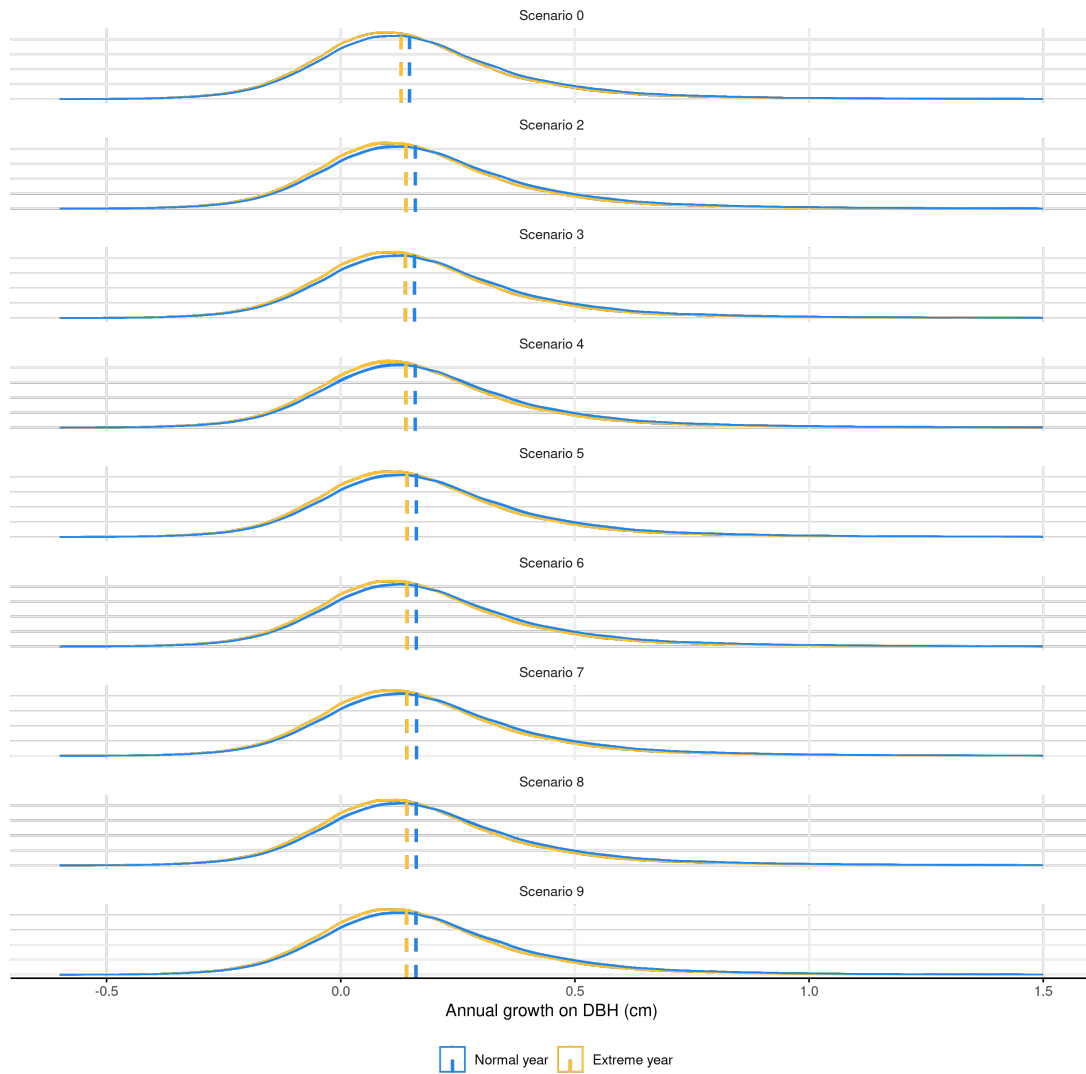


Figure 22: Distribution de la croissance diamétrique des arbres en cm (Annual growth rate on DBH), pour chaque scénario et par type de climat (année normale ou année extrême) (une courbe par itération)

Table 6: Croissances diamétriques médianes prédites et différence relative médiane due à des conditions climatiques extrêmes telles que prédites par le modèle M1 d’interactions de voisinage neutres pour la variable climatique température maximale journalière

Scénario	Croissance diamétrique médiane en conditions climatiques normale (cm/an)	Croissance diamétrique médiane en conditions climatiques extrêmes (cm/an)	Différence relative médiane entre une année normale et une année extrême (%)
0	0.147	0.129	-7.796
2	0.159	0.139	-8.435
3	0.157	0.138	-8.350
4	0.159	0.139	-8.433
5	0.161	0.141	-8.558
6	0.161	0.141	-8.559
7	0.162	0.141	-8.580
8	0.161	0.141	-8.542
9	0.160	0.140	-8.507

l’identifiant de l’arbre, de l’itération *LoggingLab* et de l’itération du modèle. Cette variable a été placée en effet aléatoire de sorte à prendre en compte la pseudo-réplication de nos données.

Il existe une grande variabilité des croissances individuelles prédites (Figure 22), qui reflète la grande variabilité inter-spécifique mais aussi intra-spécifique de la croissance des arbres des forêts guyanaises [44].

Le plus grand effet sur les prédictions est lié au climat. Les résultats du modèle 1 (Figure 22) montrent que la croissance est diminuée de manière significative ($p\text{-value} < 0,001$) dans un contexte climatique extrême vis-à-vis d’un contexte normal (fort *Tmax* ou *CWD*), et ce quel que soit le scénario d’exploitation forestière appliqué. On note que la valeur de changement relatif entre une année extrême et une année normale varie en fonction des modèles utilisés (de l’ordre de -8% de croissance diamétrique pour le M1 et le modèle 2 avec *WSG*, de -1.5% pour le modèle 2 avec *Ptlp* et avec *SD*) (Table 6 et 8). Ces résultats sont cohérents avec ceux présentés dans la partie 2.5.2. Les fortes températures, variable utilisée pour caractériser le climat dans ce modèle, sont effectivement un facteur documenté de réduction de la croissance des arbres en forêt tropicale [20,45,46,47].

Par ailleurs, nos résultats montrent que l’exploitation forestière induit une augmentation de la croissance annuelle des arbres, puisque la croissance des arbres du scénario 0 (pas d’exploitation) est toujours significativement inférieure à celle des autres scénarios ($p\text{-value} < 0,001$), ce qui est cohérent avec l’effet positif de la réduction de la compétition neutre par l’exploitation observé en section 2.5.2. Ainsi, le relâchement de la compétition pour les ressources en lumière ou en eau à l’échelle locale, induit par l’exploitation, permet bien aux survivants en bordure de trouées d’avoir de meilleures performances [11]. Cet effet est d’autant plus important que la perturbation sylvicole est forte puisqu’on retrouve des croissances plus fortes dans les scénarios engendrant la perte de biomasse la plus forte (scénarios 5, 6, 7 et 8) en comparaison du scénario 3 qui est le moins impactant en termes de perte de biomasse par exemple (Figures 19 et 22 et Table 6).

Cependant, l’effet de l’exploitation impacte aussi la réponse de la croissance individuelle à une année climatique extrême, observée par la différence relative de croissance entre une année extrême et une année normale (Table 6). L’effet d’une année climatique extrême est plus fort dans une forêt exploitée que dans une forêt non exploitée, et ce d’autant plus que l’exploitation est forte. Cette différence est subtile (Table 6) mais significative ($p\text{-value} < 0,001$). Ceci s’explique par l’effet d’atténuation des effets des conditions climatiques extrêmes par un voisinage plus dense observé en section 2.5.2.

4.4.3 Application des modèles basés sur les interactions non-neutres

Nous avons appliqué plusieurs des modèles de croissance basés sur les interactions de voisinage non-neutres :

- le modèle pour le trait de potentiel hydrique au point de flétrissement de la feuille *Ptlp* et la variable climatique *CWD* (déficit hydrique climatique)

- le modèle pour le trait de conductance minimale de la feuille G_{min} et la variable climatique T_{max} (température maximale journalière)

La variabilité de la croissance des arbres des forêts guyanaises mentionnée précédemment [44] est également visible dans les résultats de ces modèles (Figure 23 et Figure 27 en annexe).

Pour les deux modèles que nous avons testés, les résultats suivent les mêmes tendances que pour les modèles prenant en compte les interactions de voisinage neutres (cf section 4.4.2) : des conditions chaudes et/ou sèches induisent une réduction de la croissance individuelle des arbres, dans une moindre mesure cependant pour le modèle considérant P_{tlp} que pour celui considérant G_{min} , également moindre que pour les modèles d'interactions neutres (cf section 4.4.2). D'autre part, la croissance est augmentée par l'exploitation forestière, avec un effet faible de l'intensité de cette exploitation (Table 7). Les modèles d'interactions non-neutres montrent également que l'effet d'une année climatique extrême est légèrement plus fort dans une forêt exploitée que dans une forêt non exploitée, et ce d'autant plus que l'exploitation est forte, comme cela avait été observé par pour les modèles d'interactions neutres.

Les prédictions des modèles non-neutres suivent donc des tendances similaires à celles des modèles neutres, ce qui s'explique par le fait que les effets des interactions non-neutres, bien que mise en avant de manière significative par les modèles, ont un effet bien moins fort que celui du climat et du voisinage neutre (cf sections 2.5.2 et 2.6.2). Les effets du climat et du voisinage neutre sont donc prépondérantes dans les prédictions des modèles, y compris ceux intégrant les interactions non-neutres. De plus, les tendances observés par les modèles d'interactions non-neutres sont moins nettes, ce qui peut être dû au fait qu'il y avait plus de valeurs de traits manquantes pour lesquelles la médiane de la communauté a été utilisée.

Il ressort donc de l'application de ces résultats que les interactions non-neutres sont certainement trop subtiles pour impacter la croissance de manière forte à l'échelle de la communauté entière. De plus, notre étude considère les croissances prédites immédiatement après l'exploitation, donc à un moment où la composition fonctionnelle de la communauté a encore peu changée. A plus long terme, les effets de l'exploitation forestière vont inclure des changements de la composition fonctionnelle par arrivée des espèces pionnières [48,49]. Ceci pourrait se traduire par un effet plus sensible des interactions non-neutres. De plus, les espèces pionnières étant généralement plus vulnérables aux conditions climatiques sèches et chaudes ([20] et section 2.3.3), la vulnérabilité accrue des forêts post-exploitations à ces conditions devrait se confirmer dans les premières décennies post-exploitation. Etudier la vulnérabilité des forêts aux effets climatiques au cours de décennies suivant l'exploitation est donc une perspective de recherche intéressante, qui pourrait s'appuyer sur une approche combinant l'utilisation du simulateur d'exploitation *LoggingLab* avec un simulateur de dynamique forestière individu-centré (ex Troll [39]).

Model for climatic water deficit and PTLP - expected values

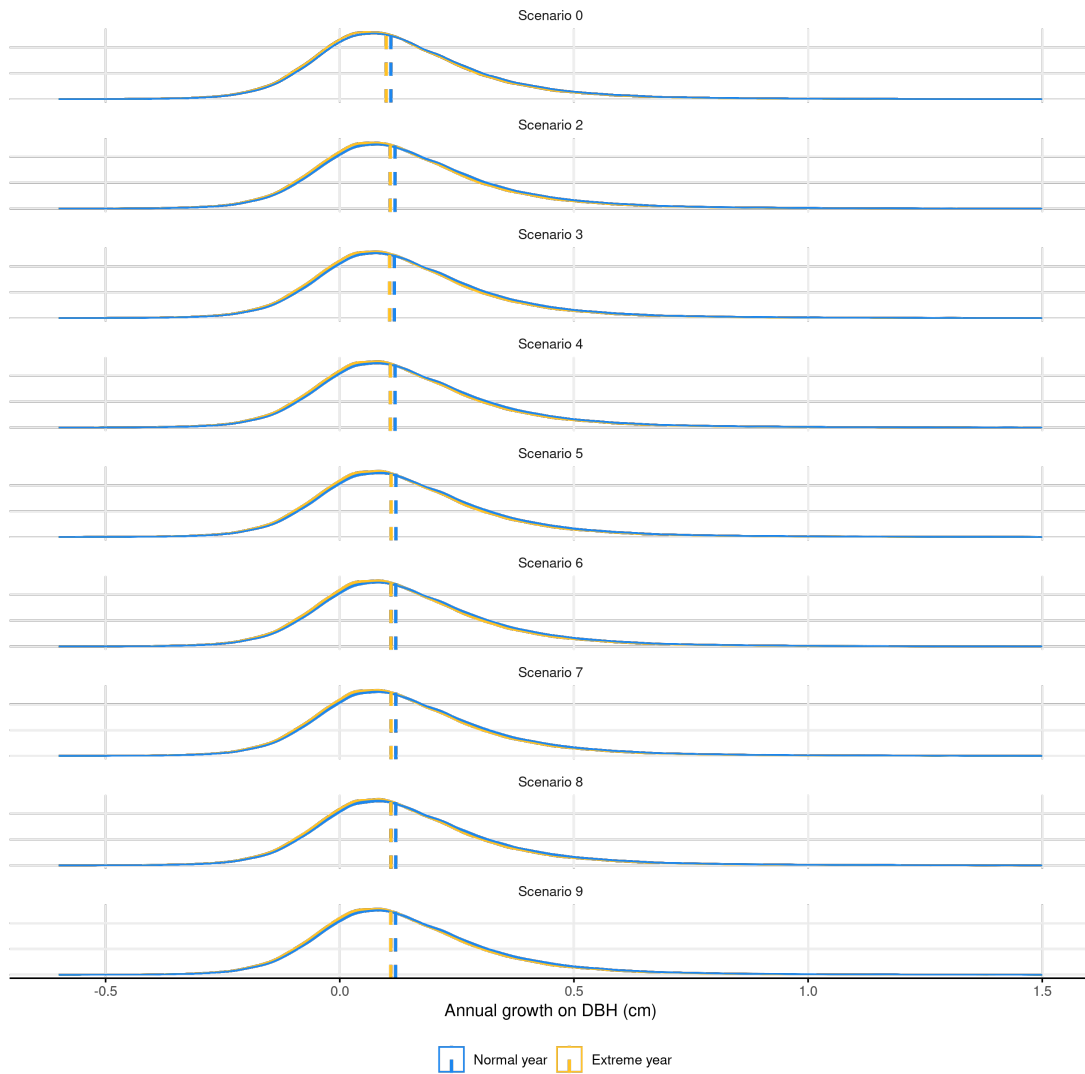


Figure 23: Distribution de la croissance diamétrique des arbres en cm (Annual growth rate on DBH), pour chaque scénario et par type de climat (année normale ou année extrême) (une courbe par itération)

Table 7: Croissances diamétriques médianes prédites et différence relative médiane due à des conditions climatiques extrêmes telles que prédites par les modèles d'interactions de voisinage

Scénario	Croissance diamétrique médiane en conditions climatiques normales (cm/an)	Croissance diamétrique médiane en conditions climatiques extrêmes (cm/an)	Différence relative médiane entre une année normale et une année extreme (%)	Trait fonctionnel	Variable climatique
0	0.109	0.099	-4.049	Ptlp	CWD
2	0.118	0.108	-4.106	Ptlp	CWD
3	0.117	0.107	-4.079	Ptlp	CWD
4	0.118	0.108	-4.096	Ptlp	CWD
5	0.120	0.110	-4.101	Ptlp	CWD
6	0.119	0.109	-4.097	Ptlp	CWD
7	0.120	0.110	-4.101	Ptlp	CWD
8	0.119	0.109	-4.112	Ptlp	CWD
9	0.119	0.109	-4.111	Ptlp	CWD
0	0.135	1.118	-9.324	gmin	Tmax
2	0.143	0.124	-9.990	gmin	Tmax
3	0.142	0.123	-9.877	gmin	Tmax
4	0.143	0.124	-9.957	gmin	Tmax
5	0.145	0.125	-10.100	gmin	Tmax
6	0.145	0.125	-10.114	gmin	Tmax
7	0.145	0.125	-10.127	gmin	Tmax
8	0.145	0.125	-10.096	gmin	Tmax
9	0.144	0.125	-10.047	gmin	Tmax

Productions scientifiques issues du projet

Publications scientifiques dans revues à comité de lecture

- Nemetschek D, Derroire G, Marcon E, Aubry-Kientz M, Auer J, Badouard V, Baraloto C, Bauman D, Le Blaye Q, Boisseaux M, Bonal D, Coste S, Dardevet E, Heuret P, Hietz P, Levionnois S, Marechaux I, McMahon S, Stahl C, Vleminckx J, Wanek W, Ziegler C, Fortunel C (2024) *Climate anomalies and neighbourhood crowding interact in shaping tree growth in old-growth and selectively-logged tropical forests*. Journal of Ecology
- Badouard V, Schmitt S, Salzert G, Gaquiere T, Rojat M, Bedeau C, Brunaux O, Derroire G (2024). *LoggingLab: an R package for simulating reduced impact logging in tropical forests using forest inventory data*. Ecological Modelling
- Nemetschek D, Fortunel C, Marcon E, Aubry-Kientz M, Auer J, Badouard V, Baraloto C, Boisseaux M, Bonal D, Coste S, Dardevet E, Heuret P, Hietz P, Levionnois S, Maréchaux I, Stahl C, Vleminckx J, Wanek W, Ziegler C, Derroire G *Love thy neighbour? Trait similarities and hierarchies at the neighbourhood scale modulate tropical tree response to climate extremes*. In Prep for Ecology Letters.
- Nemetschek D, Boisseaux M, Derroire G, Auer J, Badouard V, Baraloto C, Le Blaye Q, Bonal D, Coste S, Dardevet E, Heuret P, Hietz P, Levionnois S, Marcon E, Maréchaux I, Stahl C, Vleminckx J, Wanek W, Ziegler C, Fortunel C (In Prep.). *Traits related to water use and drought tolerance are decoupled from leaf and wood economics in 104 tropical tree species*

Packages R

- Badouard V, Schmitt S, Salzert G, Gaquiere T, Derroire G (2023). LoggingLab: An R Package to Simulate Forest Logging. R package. <https://vincyanabadouard.github.io/LoggingLab/>
- Derroire G, Aubry-Kientz M, Mirabel A, Krebber D, Marcon E, Hérault B, (2023). vernabota: Association between vernacular and botanical names for Guyana data. R package. <https://ecofog.github.io/vernabota/>

Mémoires d'étudiants

Thèse de doctorat

- Daniela Krebber (2023) *The role of biodiversity in tropical forest response to climate* - Université de Guyane.

Mémoires de Master

- Elia Dardevet (2021) *Impact of logging intensity on tropical tree functional composition, at two scales, 10 and 30 years after the disturbance* – AgroParisTech - DOI: [10.13140/RG.2.2.27287.44967](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27287.44967)
- Johanna Auer (2022) *Beyond soft traits: Ecophysiological diversity of drought response in a hyper-diverse tropical rainforest in French Guiana* - Université de Vienne
- Margaux Rojat (2022) *Impacts de l'exploitation sélective sur les forêts de Guyane française : Biomasse, diversité et interactions biotiques de voisinage* - Université de La Réunion

Communications à des conférences internationales

- Krebber D, Fortunel C, Marcon E, Boisseaux M, Stahl C, Coste S., Auer J., Dardevet E., Badouard V, Ziegler C, Levionnois S, Wanek W, Hietz P, Aubry-Kientz M, Derroire G (2022) *How do tropical tree species differences in water use at the neighbourhood scale shape growth response to climate?* 58th Annual Meeting of the Association for Tropical Biology and Conservation (Cartagena, Colombia)
- Krebber D, Derroire G, Boisseaux M, Marcon E, Stahl C, Coste S, Auer J, Dardevet E, Badouard V, Ziegler C, Levionnois S, Wanek W, Hietz P, Aubry-Kientz M, Fortunel C (2022) *Influence of neighbourhood interactions and water relation traits on tropical forest response to climate.* European Conference of Tropical Ecology (Montpellier, France)

Données

- Les données d'identification botanique des arbres ont été intégrées au DataVerse de de Paracou (<https://dataverse.cirad.fr/dataverse/paracou>).
- Les données de traits fonctionnels récoltés durant le projet sont disponibles sur demande motivée auprès de Daniela Nemetschek.

Signification des principaux sigles

- **AGR** : croissance annuelle absolue (*Absolute Growth Rate*)
- **BE** : Bois énergie
- **Bo** : Bois d'œuvre
- **CWD** : déficit hydrique climatique (*climatic water deficit*)
- **DFP** : Domaine Forestier Permanent
- **DBH** : diamètre à hauteur de poitrine (1.3m) (*Diameter at Breast Height*)
- **ECMP** : Essences Commerciales Majeures Principales
- **EFI** : Exploitation à Faible Impact
- **Gmin** : conductance minimale de la feuille
- **LiDAR** : *Light Detection and Ranging*
- **MNT** : Modèle Numérique de Terrain
- **NCIn** : indice de voisinage neutre (*Neighbourhood crowding index*)
- **NIh** : indice de voisinage hiérarchique (*Neighbourhood index - hierarchical*)
- **NId** : indice de dissimilarité du voisinage (*Neighbourhood index - dissimilarity*)
- **ONF** : Office National des Forêts
- **Ptlp** : potentiel hydrique au point de flétrissement de la feuille
- **SD** : densité stomatique (*Stomatal Density**)
- **SRad** : rayonnement solaire (*Solar radiation*)
- **SRTM** : *Shuttle Radar Topography Mission*
- **Tmax** : température maximale journalière
- **UP** : Unité de Prospection
- **VPD** : déficit de pression de vapeur (*Vapour Pressure Deficit*)
- **WSG** : densité apparente du bois (*Wood Specific Gravity*)

Bibliographie

1. Molino J-F *et al.* 2022 An annotated checklist of the tree species of French Guiana, including vernacular nomenclature. *Adansonia* **44**, 345–903. (doi:[10.5252/ADANSONIA2022V44A26](https://doi.org/10.5252/ADANSONIA2022V44A26))
2. FAO. 2020 [Evaluation des ressources forestières mondiales 2020 - Rapport Guyane française](#).
3. Guitet S, Brunaux O, Traissac S. 2014 *Guide de sylviculture pour la production de bois d'œuvre des forêts du Nord de la Guyane*. ONF. See <http://www1.onf.fr/outils/medias/20161223-171135-904942/++files++/1>.
4. Leroy M, Derroire G, Vendé J, Leménager T. 2013 *La gestion durable des forêts tropicales - De l'analyse critique du concept à l'évaluation environnementale des dispositifs de gestion*. AFD. See <http://agritrop.cirad.fr/587084/>.
5. Shahid N, Justin PW. 2003 Disentangling biodiversity effects on ecosystem functioning: deriving solutions to a seemingly insurmountable problem. *Ecology Letters* **6**, 567–579. (doi:[10.1046/j.1461-0248.2003.00471.x](https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00471.x))
6. Oliver TH *et al.* 2015 Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution* **30**, 673–684. (doi:[10.1016/J.TREE.2015.08.009](https://doi.org/10.1016/J.TREE.2015.08.009))
7. Piponiot C, Derroire G, Descroix L, Mazzei L, Rutishauser E, Sist P, Hérault B. 2018 Assessing timber volume recovery after disturbance in tropical forests – A new modelling framework. *Ecological Modelling* **384**, 353–369. (doi:[10.1016/J.ECOLMODEL.2018.05.023](https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2018.05.023))
8. Piponiot C *et al.* 2016 Carbon recovery dynamics following disturbance by selective logging in amazonian forests. *eLife* **5**. (doi:[10.7554/eLife.21394](https://doi.org/10.7554/eLife.21394))
9. Derroire G, Piponiot C, Descroix L, Bedeau C, Traissac S, Brunaux O, Hérault B. 2021 Prospective carbon balance of the wood sector in a tropical forest territory using a temporally-explicit model. *Forest Ecology and Management* **497**, 119532. (doi:[10.1016/J.FORECO.2021.119532](https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.119532))
10. Fargeon H, Aubry-Kientz M, Brunaux O, Descroix L, Gaspard R, Guitet S, Rossi V, Hérault B. 2016 Vulnerability of Commercial Tree Species to Water Stress in Logged Forests of the Guiana Shield. *Forests* **7**, 105. (doi:[10.3390/f7050105](https://doi.org/10.3390/f7050105))
11. Hérault B, Ouallet J, Blanc L, Wagner F, Baraloto C. 2010 Growth responses of neotropical trees to logging gaps. *Journal of Applied Ecology* **47**, 821–831. (doi:[10.1111/j.1365-2664.2010.01826.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01826.x))
12. Poorter L. 1999 Growth responses of 15 rain forest tree species to a light gradient; the relative importance of morphological and physiological traits. *Functional Ecology* **13**, 396–410. (doi:[10.1046/j.1365-2435.1999.00332.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00332.x))
13. Kunstler G *et al.* 2016 Plant functional traits have globally consistent effects on competition. *Nature* **529**, 204–207. (doi:[10.1038/nature16476](https://doi.org/10.1038/nature16476))
14. Lasky JR, Uriarte M, Boukili VK, Chazdon RL. 2014 Trait-mediated assembly processes predict successional changes in community diversity of tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**, 5616–5621. (doi:[10.1073/pnas.1319342111](https://doi.org/10.1073/pnas.1319342111))
15. Chesson P. 2000 Mechanisms of maintenance of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics* **31**, 343–66. (doi:[10.1146/annurev.ecolsys.31.1.343](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.343))
16. Sakschewski B, Bloh W von, Boit A, Poorter L, Peña-Claros M, Heinke J, Joshi J, Thonicke K. 2016 Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nature Climate Change* **6**, 1032–1036. (doi:[10.1038/nclimate3109](https://doi.org/10.1038/nclimate3109))
17. Poorter L *et al.* 2015 Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography* **24**, 1314–1328. (doi:[10.1111/geb.12364](https://doi.org/10.1111/geb.12364))
18. Liang J *et al.* 2016 Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* **354**, 196. (doi:[10.1126/science.aaf8957](https://doi.org/10.1126/science.aaf8957))
19. Violle C, Navas ML, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. 2007 Let the concept of trait be functional! *Oikos* **116**, 882–892. (doi:[10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x](https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x))

20. Nemetschek D *et al.* 2024 Climate anomalies and neighbourhood crowding interact in shaping tree growth in old-growth and selectively-logged tropical forests. *Journal of Ecology* **11**, 1–23.
21. Aubry-Kientz M, Hérault B, Ayotte-Trépanier C, Baraloto C, Rossi V. 2013 Toward Trait-Based Mortality Models for Tropical Forests. *PLoS ONE* **8**, e63678. (doi:[10.1371/journal.pone.0063678](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063678))
22. Mirabel A. 2018 Réponse et Résilience de la Biodiversité d’une Forêt Tropicale après Perturbation. PhD thesis, Université de Guyane.
23. Derroire G, Aubry-Kientz M, Mirabel A, Krebber D, Marcon É, Hérault B. 2023 [vernabota: Association between vernacular and botanical names for Guyana data](#).
24. Nemetschek D *et al.* In press. Love thy neighbour? Tropical tree growth and its response to climate anomalies is mediated by neighbourhood hierarchy and dissimilarity in carbon and water related traits. *in review for Ecology Letters*
25. Nemetschek D, al. Et. In press. Weak coordination among leaf water-use traits and with commonly measured functional dimensions reveals high dimensional resource niche space in a tropical lowland forest. *in prep*
26. Ziegler C *et al.* 2019 Large hydraulic safety margins protect Neotropical canopy rainforest tree species against hydraulic failure during drought. *Annals of Forest Science* **76**. (doi:[10.1007/s13595-019-0905-0](https://doi.org/10.1007/s13595-019-0905-0))
27. Cambon MC *et al.* 2022 Drought Tolerance Traits in Neotropical Trees Correlate with the Composition of Phyllosphere Fungal Communities. *Phytobiomes Journal*, 1–61. (doi:[10.1094/pbiomes-04-22-0023-r](https://doi.org/10.1094/pbiomes-04-22-0023-r))
28. Maréchaux I, Bartlett MK, Sack L, Baraloto C, Engel J, Joetzjer E, Chave J. 2015 Drought tolerance as predicted by leaf water potential at turgor loss point varies strongly across species within an Amazonian forest. *Functional Ecology* **29**, 1268–1277. (doi:[10.1111/1365-2435.12452](https://doi.org/10.1111/1365-2435.12452))
29. Maréchaux I, Saint-André L, Bartlett MK, Sack L, Chave J. 2019 Leaf drought tolerance cannot be inferred from classic leaf traits in a tropical rainforest. *Journal of Ecology*, 1365–2745.13321. (doi:[10.1111/1365-2745.13321](https://doi.org/10.1111/1365-2745.13321))
30. Fortunel C, Fine PVA, Baraloto C. 2012 Leaf, stem and root tissue strategies across 758 Neotropical tree species. *Functional Ecology* **26**, 1153–1161. (doi:[10.1111/j.1365-2435.2012.02020.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2012.02020.x))
31. Vleminckx J *et al.* 2021 Resolving whole-plant economics from leaf, stem and root traits of 1467 Amazonian tree species. *Oikos* (doi:[10.1002/jcph.834](https://doi.org/10.1002/jcph.834).[This](#))
32. Baraloto C *et al.* 2010 Decoupled leaf and stem economics in rain forest trees. *Ecology Letters* **13**, 1338–1347. (doi:[10.1111/j.1461-0248.2010.01517.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01517.x))
33. Abatzoglou JT, Dobrowski SZ, Parks SA, Hegewisch KC. 2018 TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* (doi:[10.1038/sdata.2017.191](https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191))
34. Rifai SW *et al.* 2018 ENSO Drives interannual variation of forest woody growth across the tropics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **373**. (doi:[10.1098/RSTB.2017.0410](https://doi.org/10.1098/RSTB.2017.0410))
35. Bauman D *et al.* 2022 Tropical tree growth sensitivity to climate is driven by species intrinsic growth rate and leaf traits. *Global Change Biology* **28**, 1414–1432. (doi:[10.1111/gcb.15982](https://doi.org/10.1111/gcb.15982))
36. Hérault B, Bachelot B, Poorter L, Rossi V, Bongers F, Chave J, Paine CET, Wagner F, Baraloto C. 2011 Functional traits shape ontogenetic growth trajectories of rain forest tree species. *Journal of Ecology* **99**, 1431–1440. (doi:[10.1111/j.1365-2745.2011.01883.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01883.x))
37. Collectivité Territoriale de Guyane, Ministère de l’Agriculture et de L’Alimentation, Interpro Bois Guyane, Somival. 2019 *Programme Régional Forêt Bois de Guyane -2019-2029*. See <http://www.daaf.guyane.agriculture.gouv.fr/Programme-regionale-de-la-foret-et>.
38. Badouard V, Schmitt S, Salzert G, Gaquiere T, Rojas M, Bedeau C, Brunaux O, Derroire G. 2024 LoggingLab: an R package for simulating reduced impact logging in tropical forests using forest inventory data. *Ecological Modelling* **487**. (doi:[10.1016/j.ecolmodel.2023.110539](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110539))
39. Maréchaux I, Chave J. 2017 An individual-based forest model to jointly simulate carbon and tree diversity in Amazonia: description and applications. *Ecological Monographs* **87**, 632–664. (doi:[10.1002/ecm.1271](https://doi.org/10.1002/ecm.1271))

40. Schmitt S, Salzert G, Fischer F, Maréchaux I, Chave J. 2023 [rcontroll: Individual-Based Forest Growth Simulator 'TROLL'](#).
41. ONF. 2016 Réalisation de coupes expérimentales de bois énergie en forêt guyanaise., 34.
42. Biache C. 2017 Vieux bois et bois mort 2017., 100.
43. Kuznetsova A, Brockhoff PB, Christensen RHB. 2017 lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* **82**, 1–26. (doi:[10.18637/JSS.V082.I13](#))
44. Schmitt S, Hérault B, Derroire G. 2023 High intraspecific growth variability despite strong evolutionary legacy in an Amazonian forest. *Ecology Letters* (doi:[10.1111/ele.14318](#))
45. Phillips OL *et al.* 2010 Drought–mortality relationships for tropical forests Oliver. *New Phytologist* **187**, 631–646.
46. Way DA, Oren R. 2010 Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree Physiology* **30**, 669–688. (doi:[10.1093/treephys/tpq015](#))
47. Schippers P, Sterck F, Vlam M, Zuidema PA. 2015 Tree growth variation in the tropical forest: Understanding effects of temperature, rainfall and CO₂. *Global Change Biology* **21**, 2749–2761. (doi:[10.1111/gcb.12877](#))
48. Mirabel A, Hérault B, Marcon E. 2020 Diverging taxonomic and functional trajectories following disturbance in a Neotropical forest. *Science of the Total Environment* **720**, 137397. (doi:[10.1016/j.scitotenv.2020.137397](#))
49. Mirabel A, Marcon E, Hérault B. 2021 30 Years of postdisturbance recruitment in a Neotropical forest. *Ecology and Evolution*, 1–11. (doi:[10.1002/ece3.7634](#))

Annexes

Annexe 1 : Équations du modèle 1 d'interactions de voisinage neutres

Annexe 2 : Équations du modèle 2 d'interactions de voisinage neutres

Annexe 3 : Équations du modèle d'interactions de voisinage non-neutres

Annexe 4 : Les scénarios de gestion sylvicole

Annexe 5 : Les étapes de l'exploitation forestière Faible Impact (EFI)

Annexe 6 : Résultats complémentaires d'application des modèles basés sur les interactions neutres

Annexe 7 : Résultats complémentaires d'application des modèles basés sur les interactions non-neutres

Annexe 1 : Équations du modèle 1 d'interactions de voisinage neutres

Ce modèle estime le logarithme de la croissance annuelle absolue (AGR: *Absolute Growth Rate*) de l'individu i appartenant à l'espèce s , sur la parcelle p au cours de l'intervalle t comme suit:

$$\log(AGR_{i,s,t,p}) \sim \mathcal{N}(\mu_{i,s,t,p}, \sigma^2)$$

$$\begin{aligned} \mu_{i,s,t,p} = & \alpha_s + \beta_{1s} \times \log(DBH_{i,s,t-2}) + \beta_{2s} \times CA_t + \beta_{3s} \times \log(NCI_{i,s,t-2}) \\ & + \beta_{4s} \times CA_t \times \log(NCI_{i,s,t-2}) + \gamma_p + \epsilon_i \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_s \\ \beta_{1s} \\ \beta_{2s} \\ \beta_{3s} \\ \beta_{4s} \end{pmatrix} \sim MVNormal \left[\begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \beta_{1,0} \\ \beta_{2,0} \\ \beta_{3,0} \\ \beta_{4,0} \end{pmatrix}, S \right]$$

$$S = \begin{pmatrix} \sigma_\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\beta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_4} \end{pmatrix} \times R \times \begin{pmatrix} \sigma_\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\beta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_4} \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{\alpha,\beta_1} & \rho_{\alpha,\beta_2} & \rho_{\alpha,\beta_3} & \rho_{\alpha,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_1} & 1 & \rho_{\beta_1,\beta_2} & \rho_{\beta_1,\beta_3} & \rho_{\beta_1,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_2} & \rho_{\beta_1,\beta_2} & 1 & \rho_{\beta_2,\beta_3} & \rho_{\beta_2,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_3} & \rho_{\beta_1,\beta_3} & \rho_{\beta_2,\beta_3} & 1 & \rho_{\beta_3,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_4} & \rho_{\beta_1,\beta_4} & \rho_{\beta_2,\beta_4} & \rho_{\beta_3,\beta_4} & 1 \end{pmatrix}$$

où DBH représente le DBH, CA l'anomalie climatique considérée (une par modèle) et NCI l'indice de voisinage neutre.

Annexe 2 : Équations du modèle 2 d'interactions de voisinage neutres

Ce modèle estime le logarithme de la croissance annuelle absolue (AGR: *Absolute Growth Rate*) de l'individu i appartenant à l'espèce s , sur la parcelle p au cours de l'intervalle t , comme suit:

$$\log(AGR_{i,s,t,p}) \sim \mathcal{N}(\mu_{i,s,t,p}, \sigma^2)$$

$$\begin{aligned} \mu_{i,s,t,p} = & \alpha_s + \beta_{1s} \times \log(DBH_{i,s,t-2}) + \beta_{2s} \times CA_t + \beta_{3s} \times \log(NCI_{i,s,t-2}) \\ & + \beta_{4s} \times CA_t \times \log(NCI_{i,s,t-2}) + \gamma_p + \epsilon_i \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_s \\ \beta_{1s} \\ \beta_{2s} \\ \beta_{3s} \\ \beta_{4s} \end{pmatrix} \sim MVN \left[\begin{pmatrix} \alpha_0 + \alpha_1 \times Trait_s \\ \beta_{1,0} \\ \beta_{2,0} + \beta_{2,1} \times Trait_s \\ \beta_{3,0} + \beta_{3,1} \times Trait_s \\ \beta_{4,0} + \beta_{4,1} \times Trait_s \end{pmatrix}, S \right]$$

$$S = \begin{pmatrix} \sigma_\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\beta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_4} \end{pmatrix} \times R \times \begin{pmatrix} \sigma_\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\beta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_4} \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{\alpha,\beta_1} & \rho_{\alpha,\beta_2} & \rho_{\alpha,\beta_3} & \rho_{\alpha,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_1} & 1 & \rho_{\beta_1,\beta_2} & \rho_{\beta_1,\beta_3} & \rho_{\beta_1,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_2} & \rho_{\beta_1,\beta_2} & 1 & \rho_{\beta_2,\beta_3} & \rho_{\beta_2,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_3} & \rho_{\beta_1,\beta_3} & \rho_{\beta_2,\beta_3} & 1 & \rho_{\beta_3,\beta_4} \\ \rho_{\alpha,\beta_4} & \rho_{\beta_1,\beta_4} & \rho_{\beta_2,\beta_4} & \rho_{\beta_3,\beta_4} & 1 \end{pmatrix}$$

où DBH représente le DBH, CA l'anomalie climatique considérée (une par modèle), NCI l'indice de voisinage neutre et $Trait$ le trait fonctionnel considéré (un par modèle).

Annexe 3 : Équations du modèle d'interactions de voisinage non-neutres

Ce modèle estime le logarithme de la croissance annuelle absolue (AGR: *Absolute Growth Rate*) de l'individu i appartenant à l'espèce s , sur la parcelle p au cours de l'intervalle t , comme suit:

$$\log(AGR_{i,s,t,p}) \sim \mathcal{N}(\mu_{i,s,t,p}, \sigma^2)$$

$$\begin{aligned} \mu_{i,s,t,p} = & \alpha_s + \beta_{1s} \times \log(DBH_{i,s,t-2}) + \beta_{2s} \times CA_t \\ & + \beta_{3s} \times \log(NCIn_{i,s,t-2}) + \beta_{4s} \times \log(NIh_{i,s,t-2}) + \beta_{5s} \times \log(NId_{i,s,t-2}) \\ & + \beta_{6s} \times CA_t \times \log(NCIn_{i,s,t-2}) + \beta_{7s} \times CA_t \times \log(NIh_{i,s,t-2}) + \beta_{8s} \times CA_t \times \log(NId_{i,s,t-2}) \\ & + \gamma_p + \epsilon_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \alpha_s \\ \beta_{1s} \\ \vdots \\ \beta_{8s} \end{pmatrix} & \sim MVNormal \left[\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_8 \end{pmatrix}, S \right] \\ S = & \begin{pmatrix} \sigma_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_8} \end{pmatrix} \times R \times \begin{pmatrix} \sigma_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta_1} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta_8} \end{pmatrix} \\ R = & \begin{pmatrix} 1 & \rho_{\alpha,\beta_1} & \rho_{\alpha,\beta_{\dots}} & \rho_{\alpha,\beta_8} \\ \rho_{\alpha,\beta_1} & 1 & \rho_{\beta_1,\beta_{\dots}} & \rho_{\beta_1,\beta_8} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{\alpha,\beta_8} & \rho_{\beta_1,\beta_8} & \rho_{\beta_{\dots},\beta_8} & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

où DBH représente le DBH, CA l'anomalie climatique considérée (une par modèle), $NCIn$ l'indice de voisinage neutre, NIh l'indice de voisinage hiérarchique et NId l'indice de dissimilarité de voisinage.

Annexe 4 : Les scénarios de gestion sylvicole

Simulateur d'exploitation forestière

-

Les scénarios de gestion sylvicole

Vincyane Badouard
Volontariat Service Civique
Sous la tutelle du Dr Géraldine Derroire

En partenariat avec le Pôle Recherche Développement Innovation de l'Office National des Forêts
(ONF Guyane) (représentants : Olivier Brunaux et Caroline Bedeau)

Dans le cadre de l'activité 2 "Définir des scénarios de gestion sylvicole" du projet ManagForRes, l'objectif a été de co-construire avec le partenaire gestionnaire (ONF Guyane), des scénarios de gestion dont on souhaite tester les effets sur la résilience des forêts aux changements climatiques.

Les paramètres de gestion sylvicole à tester sont :

- l'intensité de prélèvement,
- le type d'exploitation,
- la diversité des espèces prélevées.

Le paramètre de répartition spatiale prévu dans le projet initial a été abandonné, car les pratiques relatives ne sont pas formalisées, et sont donc difficiles à tester.

Objectif d'exploitation indiqués par le programme régional de la forêt et du bois (PRFB) :

Augmenter les volumes de bois exploités chaque année avec un objectif de 200 000 m³/an.

Une optimisation des prélèvements à l'hectare est donc nécessaire :

- Augmenter l'intensité d'exploitation tout en restant dans un cadre de gestion durable.
- Mieux valoriser la diversité des essences commerciales plus particulièrement dans les parcelles pauvres en essences commerciales majeures principales.

I. Intensité de prélèvement

- **Actuelle** : 20-25m³/ha de grume (= 4 à 5 tiges/ha).
- **Objectif d'intensification** (PRFB 2019) : 25-30m³/ha de grume (= 5 à 6 tiges/ha).

II. Type d'exploitation

L'Exploitation Faible Impact (EFI) à ses différents stades en Guyane française :

- **EFI1** (2011)
- **EF2 dégradé** (2012)
- **EFI2** (2014)
- **EFI3** (en bois d'œuvre (BO) uniquement)
- **EFI3 BO + BE**
- **EFI3 BO + BE dont exploitation des arbres creux**

	Info géospatiale		Débusquage		Abattage directionnel		Volume Objectif (m³/ha)		Diversification
	SRTM	LIDAR	Grappin	Câble synthétique	Eviter Avenir et réserve	Orientation à la piste (30-45°) si câble	20-25	25-30	
EFI1	X						X		
EFI2 dégradé		X			X		X		
EFI2		X		X	X		X		
EFI3		X	X	X	X	X		X	X
EFI3 BO +BE		X	X	X	X	X		X	X

Table 1 : Modalités des différentes versions de l'Exploitation Faible Impact (EFI) en Guyane française. Jusqu'en EFI2 les pistes allaient jusqu'au pied de l'arbre.

III. Diversification

- **Pas de diversification** : sélection des 8 ECMP (Essences Commerciales Majeures Principales) uniquement.
- **Diversification choisie**: les 8 ECMP + 54 autres espèces économiques exploitées ces 10 dernières années , choisies de manière équiprobable.
- **Diversification seulement si peuplement trop pauvre** pour le volume objectif : les 8 ECMP choisies + 54 autres espèces si le volume n'est pas atteint.

Scénarios

Les scénarios ont été choisis dans l'objectif de comparer les pratiques existantes (EFI1, EFI2 dégradé et EFI3) avec un ensemble de pratiques non encore mises en œuvre pour lesquelles nous souhaitons tester les différentes déclinaisons (EFI3).

Pour l'EFI3, nous avons choisi de ne pas tester toutes les combinaisons possibles mais plutôt de prendre un scénario pivot et de ne faire varier qu'un paramètre à chaque fois, pour bien isoler l'effet des différents paramètres.

Scénario	Type d'exploitation	Intensité de prélèvement	Diversification
1	EFI1	20-25	non
2	EFI2 dégradé		
3	EFI2		
4	EFI3		oui
5 (Pivot)	EFI3	25-30	oui
6	EFI3		oui si trop pauvre
7	EFI3		non
8	EFI3 BO + BE		oui
9	EFI3 BO + BE dont creux		

Table 2. Les scénarios de gestion sylvicole de l'activité 2 du projet ManagForRes.

Annexe 5 : Les étapes de l'exploitation forestière Faible Impact (EFI)

Projet ManagFoRes 2020/2021

Activité 3 : Évaluer in silico les effets des différents scénarios de gestion sur les performances des arbres et la réponse des forêts au climat

Simulateur d'exploitation forestière

-

Les étapes de l'exploitation forestière Faible Impact (EFI)

Vincyane Badouard
Volontariat Service Civique
Sous la tutelle du Dr Géraldine Derroire

En partenariat avec le Pôle Recherche Développement Innovation de l'Office National des Forêts
(ONF Guyane) (représentants : Olivier Brunaux et Caroline Bedeau)

Dans le cadre de l'activité 3 du projet ManagForRes, l'objectif a été de développer un algorithme de simulation des différents scénarios d'exploitation forestière (Livrable "Les scénarios de gestion sylvicole") qui sera appliqué sur des parcelles de forêts naturelles du réseau Guyafor pour donner des communautés forestières virtuelles post-exploitation.

Pour cela il a été nécessaire de recenser les étapes de l'exploitation forestière comme elle est effectuée en Guyane.

L'exploitation forestière en Guyane s'appuie aujourd'hui sur la démarche EFI lancée en Guyane le 31 mars 2008, donnant lieu à la *"Charte d'exploitation à faible impact dans les forêts guyanaises"* en 2011, réactualisée en 2016 et publiée en 2017

(http://www1.onf.fr/guyane/++oid++5748/@@display_media.html#:~:text=Afin%20de%20mgaranti%20une%20exploitation,la%20charte%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20r%C3%A9l%C3%A9e.)

Cette charte a été co-élaborée par des acteurs de la filière-bois, des experts et représentants d'associations de protection de la nature, des représentants des populations tirant traditionnellement leur survie de la forêt, des organismes de recherche, des représentants des administrations, et de la société civile.

Cette charte existe afin d'optimiser chaque étape de l'exploitation, pour réduire les coûts économiques, et réduire les impacts environnementaux de l'exploitation forestière, sur :

- la biodiversité
- les sols
- le peuplement forestier
- les milieux aquatiques.

La charte est ainsi la référence de l'exploitation forestière telle qu'elle doit être menée actuellement en Guyane pour en limiter les impacts.

Les pratiques EFI en Guyane seront bientôt à leur 3ème version dans laquelle l'exploitation en bois énergie (BE) sera incluse (**EFI1** (2011), **EFI2 dégradé** (2012), **EFI2** (2014), **EFI3**, **EFI3 dont BE** (2021-2022)). L'exploitation des bois creux (**EFI3 BO + BE dont creux**) sera une modalité supplémentaire, lorsqu'il sera question d'une exploitation en bois énergie.

	Info géospatiale		Débusquage		Abattage directionnel		Volume Objectif (m³/ha)		Diversification
	SRTM	LIDAR	Grappin	Câble synthétique	Eviter Avenir et réserve	Orientation à la piste	20-25	25-30	
EFI1	X						X		
EFI2 dégradé		X			X		X		
EFI2		X		X	X		X		
EFI3		X	X	X	X	X		X	X
EFI3 BO +BE		X	X	X	X	X		X	X

Table 1 : Modalités des différentes versions de l'Exploitation Faible Impact (EFI) en Guyane française.

En résumé, la *“Charte d’exploitation à faible impact dans les forêts guyanaises”* est un cahier des charges qui précise les bonnes pratiques en matière de désignation de la ressource, d’implantation des pistes de débardage, d’abattage, de débusquage, de débardage, de chargement et de transport du bois. Elle permet ainsi d’optimiser l’exploitation et d’en réduire les coûts sur l’environnement.

Les informations qui vont suivre ont été collectées lors d’interviews avec Laurent Descroix (Chargé de recherche - ancien responsable du Pôle Recherche Développement Innovation de l’Office National des Forêts (ONF Guyane)) à l’occasion des stages de Master de Sylvain Schmitt et de Nino Page, ainsi que de nombreux échanges avec Olivier Brunaux (Responsable Pôle Recherche Développement Innovation de l’Office National des Forêts (ONF Guyane)) et Caroline Bedeau (Chargée de Recherche et Développement (ONF Guyane)). Également plusieurs documents ONF sont références de ces informations.

Les différentes étapes de l’exploitation forestière faible impact (EFI) décrites par l’ONF Guyane

1. La définition de la zone à exploiter.
2. Le tracé des pistes de débardage principales.
3. La désignation.
4. La sélection des arbres par l’exploitant.
5. Le tracé des pistes de débardage secondaires.
6. L’abattage de l’arbre.
7. L’ajustement du tracé des pistes de débardage secondaires dans le cas d’exploitation en Bois Énergie (BE)
8. Le déplacement du fût.

Types de piste & définitions

(Programme Régional Forêt Bois de Guyane - Schéma pluriannuel de desserte forestière, 2019) :

- Routes forestières : pistes principales, secondaires et de fin de réseau mises en œuvre par l'ONF, sur lesquelles les camions sont amenés à cheminer. Elles desservent plusieurs parcelles.
- Piste de débardage (principales, secondaires) : permet d'acheminer les bois hors de la parcelle jusqu'aux routes à camion.
- Pistes/routes à camion : mises en œuvre par les exploitants forestiers dans les parcelles où l'importance du volume de bois à sortir et/ou la distance de débardage sont trop importantes.

Le volume exploitable d'une tige

Le volume exploitable de chaque arbre est calculé à partir des tarifs de cubage de la zone forestière concernée (Est, Centre, Ouest de la Guyane) (Guide de Sylviculture - ONF Guyane, p 17, 2014).

Zone forestière	Tarifs employés $V = a + b D^2$	Coefficients		Classes de diamètre						
		a	b	[10-20[	[20-30[	[30-40[	[40-50[	[50-60[	[60-70[	[70-80[
Est	Cayenne	-0,084516	10,461316	0,18	0,60	1,22	2,06	3,12	4,36	5,83
Centre	Kourou	-0,035829	8,7634	0,18	0,53	1,06	1,76	2,64	3,69	4,92
Ouest	St Laurent	-0,061776	8,8358	0,16	0,51	1,04	1,75	2,63	3,69	4,93
Guyane	Papetier	-0,04155	8,9129	0,18	0,54	1,07	1,79	2,68	3,75	5,00

Source : inventaires papetiers

Figure 1: Tarifs de cubage toutes essences constitués à partir de mesure sur pied (Guide de Sylviculture - ONF Guyane, p 17, 2014).

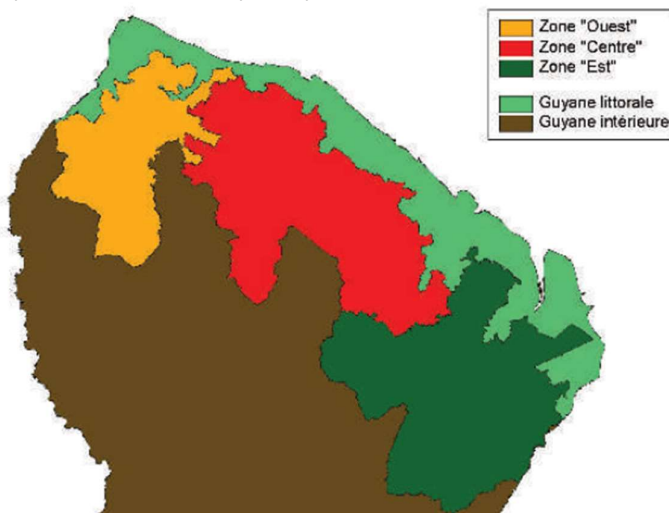


Figure 2 : Cartographie des 3 grandes zones forestières Ouest, Centre et Est (Guide de Sylviculture - ONF Guyane, p 17, 2014)

Distinction parcelles ONF/Guyafor

De par leur différence de taille, la simulation d'une exploitation forestière sur des parcelles de type Guyafor (4 ha) est différente de celle qui pourrait se faire sur une parcelle de type ONF (environ 300 ha). Ces différences seront abordées ci-dessous dans la description des étapes concernées.

L'exploitation du bois énergie

Le bois énergie est récolté prioritairement parmi les dégâts d'exploitation ("ressources fatales") sur les pistes à camion et de débardage, dans la mortalité issue de l'abattage, et sur la part non valorisable en bois d'œuvre des arbres abattus (branches des houppiers et purge). Le bois énergie peut également être prélevé parmi les bois sondés creux. Aucune piste supplémentaire ne doit être créée pour son exploitation.

L'exploitation du bois énergie s'intéresse à du bois allant jusqu'à 25cm de diamètre minimum, si le houppier est accessible au grappin. Après l'exploitation il restera $\frac{1}{4}$ de la biomasse aérienne totale détruite, sur la parcelle (feuilles, rameaux, branches de faibles diamètres) (Réalisation de coupes expérimentales de bois énergie en forêt guyanaise - Rapport technique- FEDER et ADME, 2016). Au sein d'un arbre sain, en moyenne $\frac{2}{3}$ de sa biomasse correspond à sa tige, qui sera exploité en bois d'œuvre. Le tiers restant correspond à son houppier. Au sein d'un arbre creux, $\frac{2}{3}$ de la grume pourront être utilisés en BO, $\frac{1}{3}$ en bois énergie. Pour les arbres morts de l'exploitation (piste, chablis secondaire), le tronc ($\frac{2}{3}$ de la biomasse de l'arbre) sera exploitable en bois énergie) (Figure 4). En ce qui concerne la biomasse exploitable en BE au sein du houppier, nous ne disposons pas encore de manière de la quantifier à l'échelle d'un arbre.

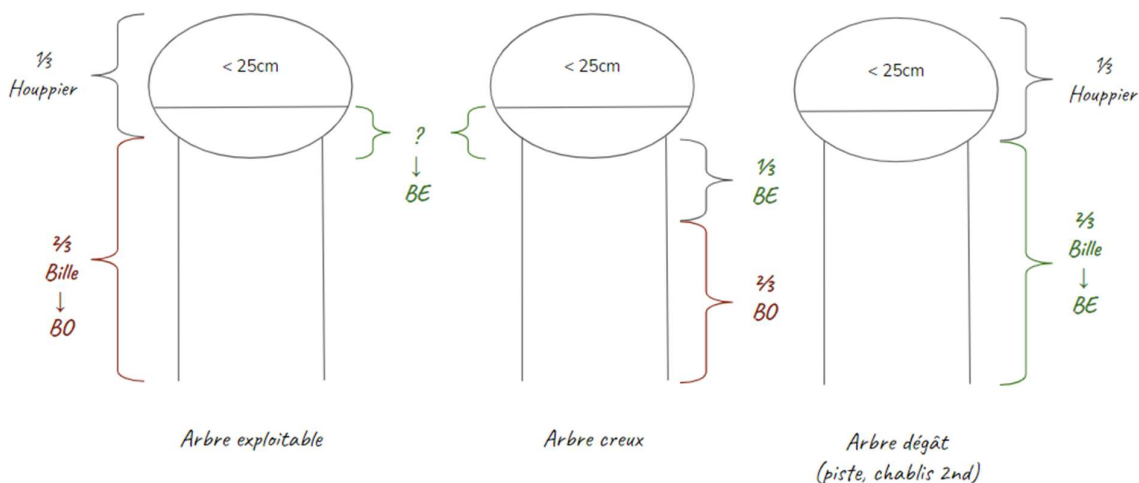


Figure 4 : Les proportions exploitables de l'arbre, en proportion de biomasse de l'arbre.

La purge (des défauts, pourriture, du pied, surbilles, grosses branches) des bois d'œuvre peut représenter une source de BE de 4 tonnes/ha pour une intensité d'exploitation de 25m³/ha de BO. On compte que pour un volume donné de bois d'œuvre exploité, on en tire un volume équivalent de bois énergie. L'optimisation pourrait permettre un doublement du rendu en bois énergie.

Pour le simulateur

- ❖ Pistes principales :
 - dégâts : volume de la bille ($\frac{1}{3}$ de la biomasse de l'arbre) en BE
- ❖ Désignation :
 - arbres non creux
 - arbres creux (Modèle *Rotten*)
- ❖ Tracé préliminaires des pistes secondaires
- ❖ Abattage (en plus des critères de l'EFI choisie (1,2, etc)):
 - **Arbres à ≤ 6 m de la piste & pente de la piste $< 20\%$ → houppier vers piste préliminaire**
 - **Arbres à $[6 ; 40$ m] de la piste et/ou pente de la piste $> 20\%$ → pied vers piste préliminaire (houppier non valorisé)**
 - arbres non creux : X% de l'arbre en BE (pour l'instant pas de manière de le quantifier)
 - les creux (si scénario "BO + BE dont creux" choisi) : $\frac{1}{3}$ de la bille en BO, $\frac{1}{3}$ en BE
 - leurs chablis : tombent dans la même orientation que leur origine : volume de la bille ($\frac{1}{3}$ de la biomasse de l'arbre) en BE
- ❖ Pistes secondaires :
 - dégâts : volume de la bille ($\frac{1}{3}$ de la biomasse de l'arbre) en BE
- ❖ Purge : $0,14 \text{ m}^3$ de BE/ m^3 de BO débarrassé

Stratégie abattage-tracé de piste en exploitation de BE :

Tracé préliminaire des pistes 2ndaires > abattage > tracé ajusté des pistes 2ndaires

- A. Tracé préliminaire des pistes 2ndaires : tracer des pistes qui vont aux arbres à exploiter, qui vont prioritairement jusqu'à 6m maximum de l'arbre avec 20% de pente maximum, si pas possible : 40m maximum de l'arbre.
- B. Abattage selon les critères au dessus.
- C. Ajustement du tracé des pistes pour optimiser la récolte de BE prioritairement au houppier (jusqu'à 6m maximum & 20% maximum de pente) de tous les arbres au sol, sinon au pied de l'arbre ($[6 ; 40 \text{ m}]$).

I. La définition de la zone à exploiter

Dans un premier temps, l'ONF juge à partir des données LIDAR de hauteur de canopée (**EFI2 dégradé/EFI2/EFI3/EFI3 dont BE**), si la forêt est exploitable. Une parcelle doit présenter une hauteur de canopée supérieure à 25 mètres pour être jugée intéressante à exploiter.

La zone exploitable est ensuite définie sous certaines conditions liées aux contraintes techniques des engins employés.

La topographie (en SRTM (**EFI1**) ou en LIDAR) est la principale limite. Il ne sera possible d'exploiter qu'à moins de 27% de pente. Les bas-fonds et le réseau hydrographique (définis par le modèle "HAND" (Height Above the Nearest Drainage) (Rennó et al. 2008) devront être évités.

Par ces critères des UPs (Unités de Prospection) seront délimitées. Elles sont également définies comme des unités topographiques distinctes (collines, plateaux), de la zone exploitable, généralement séparées par des cols.

L'exploitabilité des UPs et l'intégration de certaines parties sont validées sur le terrain, lors de l'étape de pré-désignation.

Distinction parcelles ONF/Guyafor

La zone exploitable d'une parcelle ONF est de surface trop importante pour être exploitée en une fois, elle est donc plus finement définie en unité de prospection (UP). Cette délimitation est

importante pour l'organisation temporelle et spatiale de l'exploitation de la parcelle. Les parcelles Guyafor sont suffisamment petites pour ne pas avoir besoin d'une telle définition. Dans leur cas, les unités de prospection correspondront simplement aux zones exploitables.

Pour le simulateur

Une UP est une zone connectée à une piste à camion ou une piste de débardage principale, avec une pente de moins de 27% évitant les bas-fonds et le réseau hydrographique (30 m de tampon).

EFI1 : c'est le SRTM qui est utilisé.

EFI2 dégradé/EFI2/EFI3/EFI3 dont BE : c'est le LIDAR qui est utilisé.

Parcelle ONF : les UPs sont aussi des unités topographiques (collines, plateaux) de la zone exploitable.

II. Le tracé des pistes de débardage principales

Les pistes principales de débardage doivent desservir toutes les UP's. Elles font 5 à 6 mètres de largeur et peuvent présenter jusqu'à 22% maximum de pente en longueur, et 4% de pente latérale (**EFI1** : le SRTM ne permet pas le calcul des pentes en travers).

Les gros arbres (>50 cm DBH (Diameter at Breast Height)) sont évités car laisseraient des concavités sur la piste.

La densité maximale du réseau de pistes (principales + secondaires) ne doit pas excéder 200 m/ha, soit moins de 8% de la surface exploitée. La longueur, mais surtout la largeur des pistes principales doit donc être optimisée, ainsi que leurs pentes pour des raisons de sécurité.

Dégâts mortels et immédiats :

Les dégâts des pistes principales sur le peuplement, concernent les arbres abattus pour leur conception. Les frottements des arbres le long des pistes peuvent occasionner 10% de mortalité selon les précautions prises.

Les arbres abattus pour l'établissement des pistes n'entraînent pas la mort d'autres arbres car ils chutent sur la piste.

Les arbres abattus à l'établissement des pistes principales peuvent être exploités en BE.

Distinction parcelles ONF/Guyafor

En vue de la différence de taille des parcelles ONF et Guyafor, l'implantation spatiale d'une piste principale dans les parcelles ONF ne s'appliquerait pas de la même manière à l'échelle parcellaire de Guyafor. Elle prendrait plutôt place à l'échelle du dispositif (ensemble des parcelles). On ne pourrait dans ce cas pas juger de l'impact des pistes principales sur une parcelle Guyafor, et nous ne disposons pas non plus d'inventaires des arbres en dehors des parcelles, permettant de juger de l'impact à l'échelle du dispositif. Il n'y a donc pas d'intérêt à simuler des pistes principales dans le cas de simulation d'exploitation sur les parcelles Guyafor.

Pour le simulateur

Parcelle ONF :

La piste principale est une ligne :

- partant de la piste à camion
- entrant dans chacune des UP (1 piste principale/UP)
- visant le barycentre de l'UP
- sur ligne de crête (maintient de haute altitude entre des points)
- Largeur = 5-6 m

- 22% pente maximum en longueur et 4% en largeur calculée sur 6 m (3 m de part et d'autre avec LIDAR. Pas de pente en travers avec le SRTM)
- évitant les gros arbres (>50 cm DBH)
Optimisation : choisir le tracé dont la longueur puis les pentes sont minimales.

Dégâts :

- sur la piste
- en bordure de pistes : négligé.

Si **EF13 BO + BE** : $\frac{1}{4}$ de la biomasse de chacun de ces arbres peut être enregistré en BE.

Parcelle Guyafor : pas de piste principale à l'échelle d'une parcelle Guyafor (~4 ha).

III. La désignation

La désignation réalisée par l'ONF consiste à identifier les "**arbres exploitables**", les arbres qui seront exploités lors des campagnes prochaines ("**arbres d'avenir**"), ainsi que des arbres qui devront être protégés de l'exploitation car choisis comme garants du prochain peuplement ("**arbres de réserve**").

Les arbres à défauts visibles (bois creux, trou, houppier cassé, tronc difforme) sont repérés lors de cet inventaire, et à partir de la classe 3 (>1 défaut) selon la "grille Qualité F.A.O", ne seront pas désignés. Cependant une part des désignés se révélera en fait creux seulement lors du sondage par le bucheron. En conséquence, lorsqu'il est prévu d'exploiter uniquement du Bois d'Oeuvre (BO), 20-30% sont ajoutés au volume objectif afin de remplacer les arbres qui seront trouvés creux.

Lorsqu'en plus du BO, l'exploitant souhaite récolter du Bois Énergie (BE) issu des dégâts et des houppiers (part non-exploitée de l'arbre) mais pas des arbres sondés creux, il aura également droit à 20-30% de plus sur son volume objectif pour pallier la perte des arbres creux. Mais s'il souhaite exploiter ces arbres creux en BE, il ne bénéficiera pas de cet ajout.

Le bois énergie doit prioritairement être collecté parmi les dégâts d'exploitation, avant de collecter les bois creux.

Critères de désignation d'une tige en **arbre exploitable**:

- être une essence commerciale (ECMP (Essences Commerciales Majeures Principales) ou plus si diversification),
- de diamètre entre le DME (Diamètre Minimum d'Exploitabilité) et le DMC (Diamètre Maximum de Coupe (= 120 cm)).
- ne présentant pas de défauts rédhibitoires extérieurs visibles (pourriture, trou, houppier cassé, tronc difforme ...) sur les 8 premiers mètres du tronc.
- non isolée (= à plus de 100m des autres individus de la même espèce (Charte de l'EFI Guyane ONF 2016, Guide sylvicole Guyane, 2014).
- sur des pentes < 22%.
- pas de nombre requis d'individus par essence.

Si le volume exploitable est plus élevé que le volume objectif, le DME des ECMP est prioritairement rehaussée à 60 voire 65 cm. Si ça ne suffit pas, le DME des autres espèces (si une diversification a été opérée) est également rehaussé.

Si le volume exploitable est trop faible, l'ONF en concertation avec l'exploitant, peut choisir d'agrandir sa liste d'essences (diversification) pour atteindre son objectif, ou de ne pas exploiter cette parcelle.

Seuls sont considérés "**arbres d'avenir**", les tiges appartenant aux ECMP, de diamètre entre 35cm et le DME, ou le DME réhaussé s'il l'a été. Ils seront à préserver si possible lors de l'exploitation dont ils ne sont pas la cible.

Les "**arbres de réserve**" sont sélectionnés parmi les plus beaux arbres d'avenir (= ECMP) en même nombre que les tiges à exploiter. Ces arbres sont à préserver obligatoirement (sauf abattage directionnel raté).

Les arbres exploitables exclus (cas d'un peuplement riche) ne font pas l'objet d'une protection particulière dans la charte EFI actuelle.

Pour le simulateur

Les arbres à défauts visibles à l'œil nu sont identifiés (par un modèle prenant en compte leur DBH) et donc pas désignés.

Volume objectif : Si l'utilisateur a choisi de ne pas exploiter en bois énergie les bois sondés creux (identifiés par un autre modèle prenant lui aussi en compte le DBH), 20-30% seront ajoutés au volume objectif afin de compenser ces arbres désignés creux. Si l'utilisateur a choisi d'exploiter les arbres sondés creux en bois énergie, il exploitera strictement son volume objectif, sans bonus.

Seront désignés "exploitables" les arbres :

- appartenant aux ECMP ou plus si diversification
- de DBH compris entre le DME et le DMC.
- non isolés (>100m des autres individus de la même espèce)
- sur des pentes < 22%
- hors des pistes principales

Si le volume exploitable est plus élevé que le volume objectif, le DME des ECMP est prioritairement rehaussée, puis celui des autres espèces (si diversification), si ça ne suffit pas. Le volume à exploiter est ajusté si nécessaire en prenant les arbres par ordre décroissant de volume, jusqu'à atteindre le volume objectif.

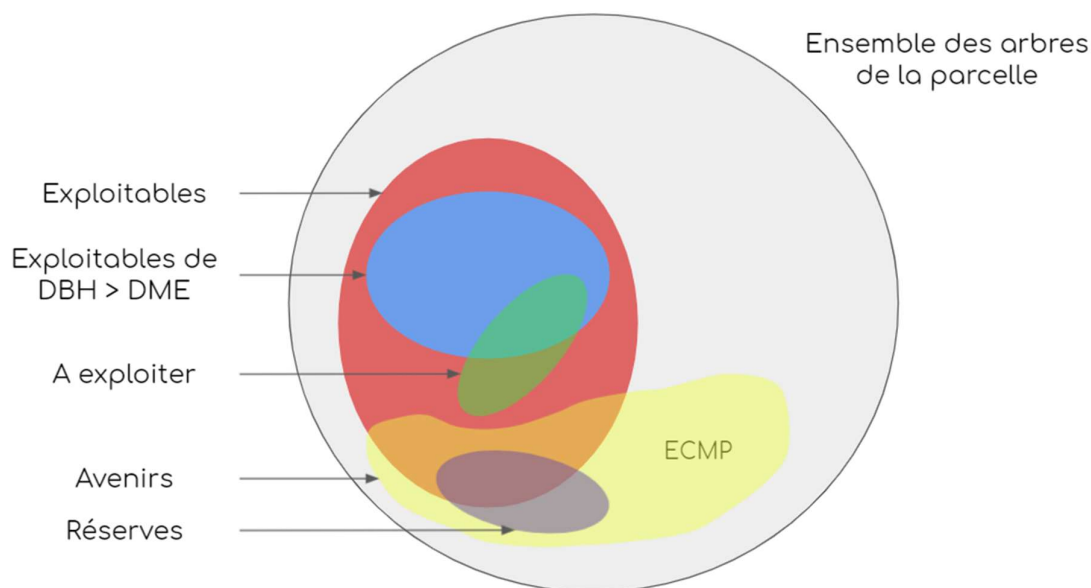
Si le volume exploitable est trop faible, la diversification peut être appliquée si elle ne l'était pas encore (les arbres d'ECMP ou d'autre essence commerciale, sont sélectionnés par ordre décroissant de volume jusqu'à atteindre le volume objectif), ou l'exploitation peut se poursuivre malgré un volume objectif non atteint, ou être abandonnée.

Les arbres d'avenir seront :

- d'ECMP
- de DBH ≥ [35 ; DME ou DME réhaussé s'il l'a été pour son espèce]

Les arbres de réserves seront :

- des arbres d'avenir
- en même nombre que d'arbres à exploiter.



IV. La sélection des arbres par l'exploitant

L'exploitant doit collecter tous les arbres que lui indique l'ONF, mais il peut justifier qu'il ne prenne pas un arbre car défectueux. La probabilité qu'un arbre soit pourri sans que cela soit visible de l'extérieur dépend de son essence (Goupi, Wacapou et Balata par exemple sont plus sujets à être creux) et de son diamètre (probabilité d'être creux plus importante chez les arbres de plus de 80 cm de diamètre. La taille du creux est proportionnelle au diamètre). En moyenne, pour une exploitation de 20-25m³/ha, 20-25% des désignés sont sondés creux (dire d'expert confirmé par le modèle *Rotten* de S.Schmitt).

Parmi eux, 50% sont complètement pourris, et les 50 autres % ne sont creux qu'à 10%, donc 90% est encore exploitable en bois d'œuvre.

Pour le simulateur

Les arbres désignés, avérés creux au sondage, sont modélisés par le modèle *Rotten* créé par S.Schmitt, à partir des données post-désignation de Laurent Descroix. Cette probabilité que l'arbre désigné soit trouvé creux est liée au DBH et à l'essence.

V. Le tracé des pistes de débardage secondaires

Depuis l'**EF12**, les pistes ne doivent pas nécessairement atteindre chaque arbre, car les engins disposent d'un câble synthétique pour les tracter. Les pistes sont donc conçues pour passer entre les arbres, en les approchant à une distance de 40 mètres maximum. Depuis l'**EF13**, les arbres peuvent être aussi collectés au grappin, à maximum 6 m de la piste. Le grappin est préféré au câble car moins coûteux en temps et en argent. Le câble sera utilisé lorsque la pente ne permettra pas au grappin d'accéder à l'arbre (>20% de pente), ou lorsque l'arbre à débusquer est isolé d'autres arbres à exploiter, de 6 à 40m.

Les pistes secondaires font 4 mètres de largeur et ne peuvent être établies que sur des pentes en longueur inférieure à 22%, et à 4% pour les pentes latérales.

Les pistes secondaires seront placées de manière à préserver les arbres de réserve, et si possible les arbres d'avenir. Les gros arbres (>50 cm DBH) seront également évités car laisseraient des concavités sur la piste.

La densité maximale du réseau de pistes (principales + secondaires) ne doit pas excéder 200 m/ha, soit moins de 8% de la surface exploitée. Leur longueur doit donc être minimale, ainsi que leurs pentes pour des raisons de sécurité. On favorisera le passage par des pistes déjà ouvertes autant que possible. Au-delà d'une vingtaine de bois transitant sur un axe secondaire, on considérera que ce n'est plus une piste secondaire mais principale.

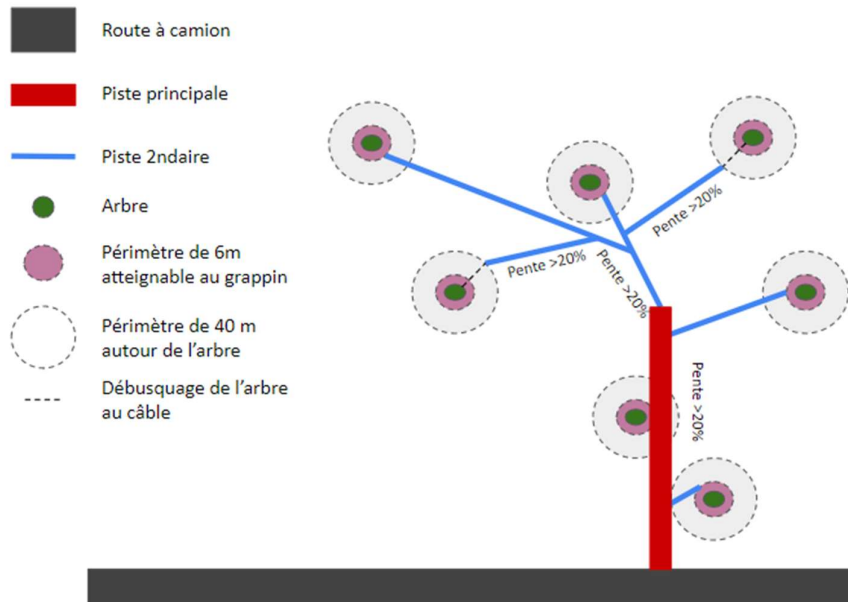


Figure 3 : Architecture des pistes favorisant le grappin au câble. Le câble est utilisé uniquement lorsque la pente en long est supérieure à 20%.

Dégâts mortels et immédiats :

Les dégâts des pistes secondaires sur le peuplement concernant les arbres abattus pour leur conception. Les frottements des arbres le long des pistes peuvent occasionner 10% de mortalité selon les précautions prises.

Les arbres abattus pour l'établissement des pistes n'entraînent pas la mort d'autres arbres car ils chutent sur la piste.

L'impact des pistes secondaires est moins important que celui des pistes principales car leur largeur et le nombre de passages qu'elles supportent sont moins importants.

Les arbres abattus à l'établissement des pistes secondaires peuvent être exploités en bois énergie.

Pour le simulateur

Les pistes secondaires font 4 m de largeur, 22% de pente maximum en longueur et 4% maximum de pente latérale (prise en compte en présence de LIDAR). Elles contournent les arbres à exploiter, les arbres de plus de 50 cm de DBH, et les arbres de réserve. Elles rejoignent en priorité 1 : les groupes par ordre décroissant de leur abondance en arbres, en priorité 2 : ceux dont la distance à la piste la plus proche est la plus courte, en priorité 3 : évitant les arbres d'avenir, et enfin priorité 4 : minimisant les pentes en longueur et en largeur.

EFI1/EFI2 dégradé : pistes vont jusqu'au pied des arbres

EFI2 : câble uniquement : les pistes vont jusqu'à maximum 40 m des arbres.

EFI3/EFI3 dont BE : grappin (pistes de pente en long <20%)(pistes vont jusqu'à 6 m des arbres), et le câble (pistes vont jusqu'à 40 m des arbres) est utilisé uniquement lorsque la pente en long est supérieure à 20% ou lorsque l'arbre à débusquer est isolé d'autres arbres à exploiter, de 6 à 40m. Les houppiers ne peuvent être pris qu'au grappin, si le houppier n'est pas accessible il ne sera pas exploité, seul le tronc pourra être utilisé en BE.

Si le nombre d'arbres connectés à une piste secondaire excède 20, la piste secondaire prendra les caractéristiques (largeur) d'une piste principale.

Dégâts :

- sur la piste
- en bordure de piste : négligé.

Si **EFI3 BO + BE**, récolte BE :

- morts à l'établissement de la piste : $\frac{2}{3}$ de la biomasse de l'arbre (volume de la bille)
- les creux (si scénario "BO + BE dont creux" choisi) : $\frac{1}{3}$ du volume de la bille de l'arbre.

VI. L'abattage de l'arbre

Depuis l'**EFI2**, l'abattage est voulu directionnel afin de réduire son impact sur les arbres d'avenir et de réserve. Depuis l'**EFI3**, la chute de l'arbre devra éviter avenir et réserve, ainsi qu'être orienté à 30-45° vers la piste de débardage la plus proche (principale ou secondaire), pour optimiser son débusquage. L'arbre peut tomber sur la piste. Cet angle à la piste (30-45°) produit un effet *essuie-glace* (*herringbone system* en anglais) lors de la traction de la grume, permettant de faciliter le dérapage, le positionnement des grumes pour le transport, et donc la réduction des dommages causés par le débardage (Henderson, J., 1990).

Dans 40% des cas, l'orientation échoue, et l'angle de chute dépend de l'orientation naturelle de l'arbre, de sa couronne et de la topographie.

Dégâts mortels et immédiats :

La chute de l'arbre quel qu'il soit (non creux, creux) crée des torches (arbres cassés) sur toute la longueur de chute de l'arbre, et par ses frottements.

Ces dégâts peuvent être exploités en bois énergie si les dégâts de pistes ont déjà été collectés.

Pour le simulateur

L'abattage de l'arbre crée un arbre (dont houppier) au sol, de dimensions calculées avec des allométries spécifiques.

EFI1 : chute aléatoire

EFI2 dégradé/EFI2 :

- à 40% : chute aléatoire
- à 60% : **priorité 1** : **pied** vers la voie la plus proche (principale ou 2ndaire), **priorité 2** : éviter les réserves, **priorité 3** : éviter les avenir

EFI3/EFI3 BO + BE :

- à 40% : chute aléatoire
- à 60% :

* si **EFI3 BO + BE** & arbres à < 6 m de la piste et pente <20% : **priorité 1** : houppier vers la voie la plus proche, **priorité 2** : éviter les réserves, **priorité 3** : éviter les avenir, **priorité 4** : orientation 30-45°

* sinon (**EFI3, EFI3 BO + BE** arbres > 6 m de la piste et/ou >20%) : **priorité 1** : pied vers la voie la plus proche, **priorité 2** : éviter les réserves, **priorité 3** : éviter les avenir, **priorité 4** : orientation 30-45°

Dégâts :

Chablis 2ndaires : tous les arbres se trouvant sous l'arbre (exploité en BO ou BE) tombé au sol seront considérés morts.

VII. Le déplacement du fût.

Après l'abattage de l'arbre, celui-ci est débusqué (de sa position à la piste de débardage) par son pied au grappin ou au câble synthétique, ou par le centre de son houppier, au grappin uniquement. Le débusquage n'occasionne pas de mortalité sur le peuplement (du moins au stade adulte).

Puis a lieu le débardage (transit des grumes sur les pistes de débardage primaires et secondaires jusqu'à une place de dépôt). La quantité/le volume transité/e par trajet dépend du diamètre des grumes. Le billonnage (réduire les grumes à 16 m maximum de longueur) n'est pas toujours appliqué avant le débardage. La limite de l'engin de débardage est la charge qu'il peut supporter.

Les places de dépôt, vers lesquelles sont acheminées les grumes (à destination BO ou BE), sont placées en plateau (5% de pente maximum), dans la parcelle ou en bordure, connectées aux pistes principales. En EFI la taille maximale d'une place de dépôt est de 1500 m² (~200 grumes). En général, une surface de 20 x 25 mètres suffit à stocker 250 à 300 m³, ou encore on compte 500 m² de place de dépôt pour 15 à 20 hectares exploitables (Charte EFI Guyane ONF 2016). Elles sont donc établies en nombre nécessaire au volume à exploiter.

Distinction parcelles ONF/Guyafor

Les places des dépôts doivent être proposées à partir d'un certain volume exploité à l'échelle de la parcelle. Ce volume n'est pas atteint par une parcelle Guyafor, elles ne pourraient exister qu'à l'échelle du dispositif. On ne pourrait dans ce cas pas juger de l'impact de la mise en place de places de dépôt sur une parcelle Guyafor, et nous ne disposons pas non plus d'inventaires des arbres en dehors des parcelles, permettant de juger de l'impact à l'échelle du dispositif. Il n'existera donc pas de places de dépôt sur les parcelles Guyafor.

Pour le simulateur

Parcelle ONF :

Création de la place de dépôt :

Localisation :

- dans la parcelle ou en bordure
- connectées aux pistes principales
- à chaque embranchement piste 2nd-primaire

Critères topo : en plateau (5% maximum de pente)

Surface : taille proportionnelle au volume exploité (1m^3 de grume = 2 m^2)

Taille maximale = 1500 m^2

Nombre : plusieurs par parcelle. Autant que nécessaire.

Dégâts : Mort des arbres se trouvant à l'endroit où les places de dépôts sont créées.

Si **EF13 BO + BE**, récolte BE :

- arbres morts à l'élaboration des places de dépôt : volume de la bille ($\frac{2}{3}$ de la biomasse de l'arbre)
- purge : $0,14\text{ m}^3$ de BE/ m^3 de BO débardé

Parcelle Guyafor : pas de place de dépôt à l'échelle d'une parcelle Guyafor ($\sim 4\text{ ha}$).

Si **EF13 BO + BE**, récolte BE : purge : $0,14\text{ m}^3$ de BE/ m^3 de BO débardé

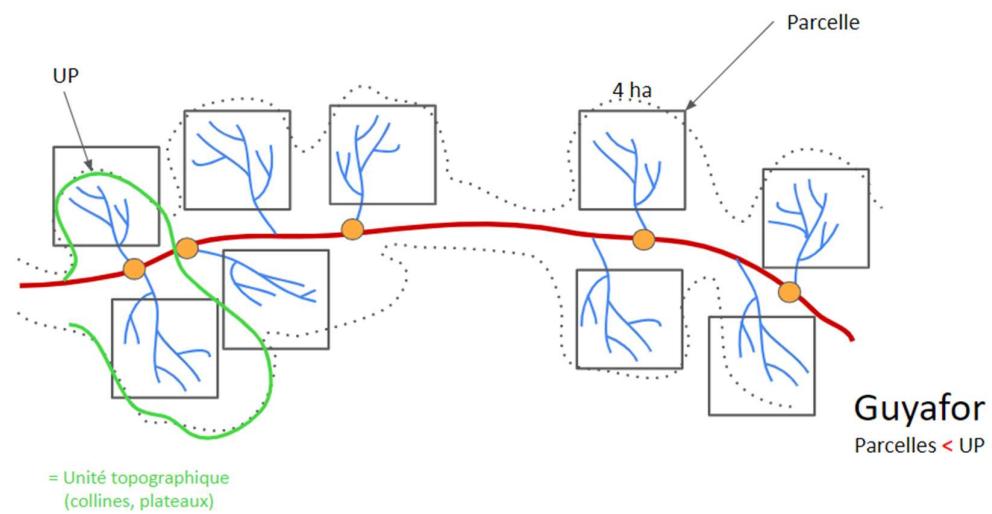
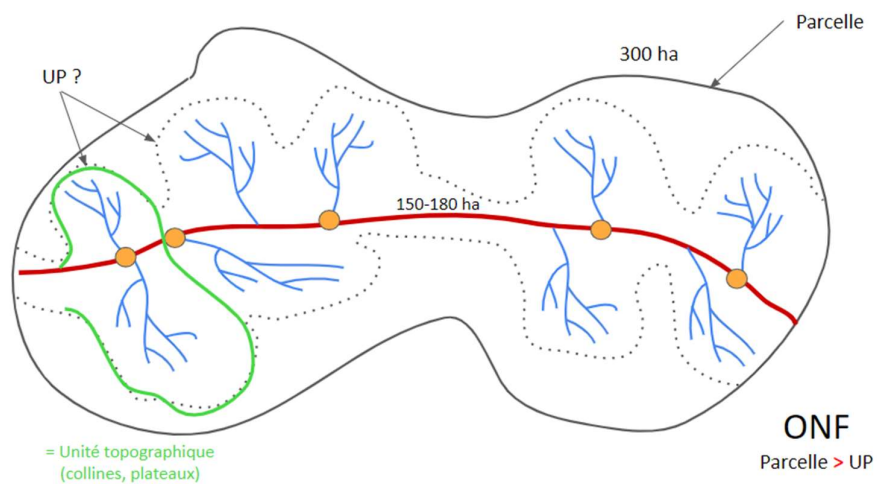


Figure 5 : Schématisation des différences spatiales entre l'exploitation forestière sur une parcelle ONF et une parcelle Guyafor.

RÉFÉRENCES

Hendrison, J. (1990). *Damage-controlled logging in managed tropical rain forest in Suriname*. Hendrison.

Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., & Tomasella, J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469-3481.

DOCUMENTS SOURCE

Guide de Sylviculture - ONF Guyane, 2014

Diagnostics Post Exploitation - DPE, 2017

Programme Régional Forêt Bois de Guyane - Schéma pluriannuel de desserte forestière, 2019

Note Régionale d'application du guide de sylviculture pour la production de bois d'œuvre des forêts du Nord de la Guyane, 2015

Programme Régional Forêt Bois de Guyane -PRFB, 2019

Développement de l'exploitation à Faible Impact (EFI) dans les peuplements naturels en Guyane-

Emploi du treuillage longue distance par câble synthétique - Rapport de réalisation technique, 2015

Convention d'expertise pour l'élaboration d'un modèle d'implantation des pistes de débardage en forêt tropicale humide guyanaise, 2007

Notice d'utilisation du logiciel PISTES 2.0, 2010

Développement du logiciel piste 3.0 - Rapport de réalisation technique, 2015

Plugin PisteCreator – Notice d'utilisation

Annexe 6 : Résultats complémentaires d'application des modèles basés sur les interactions neutres

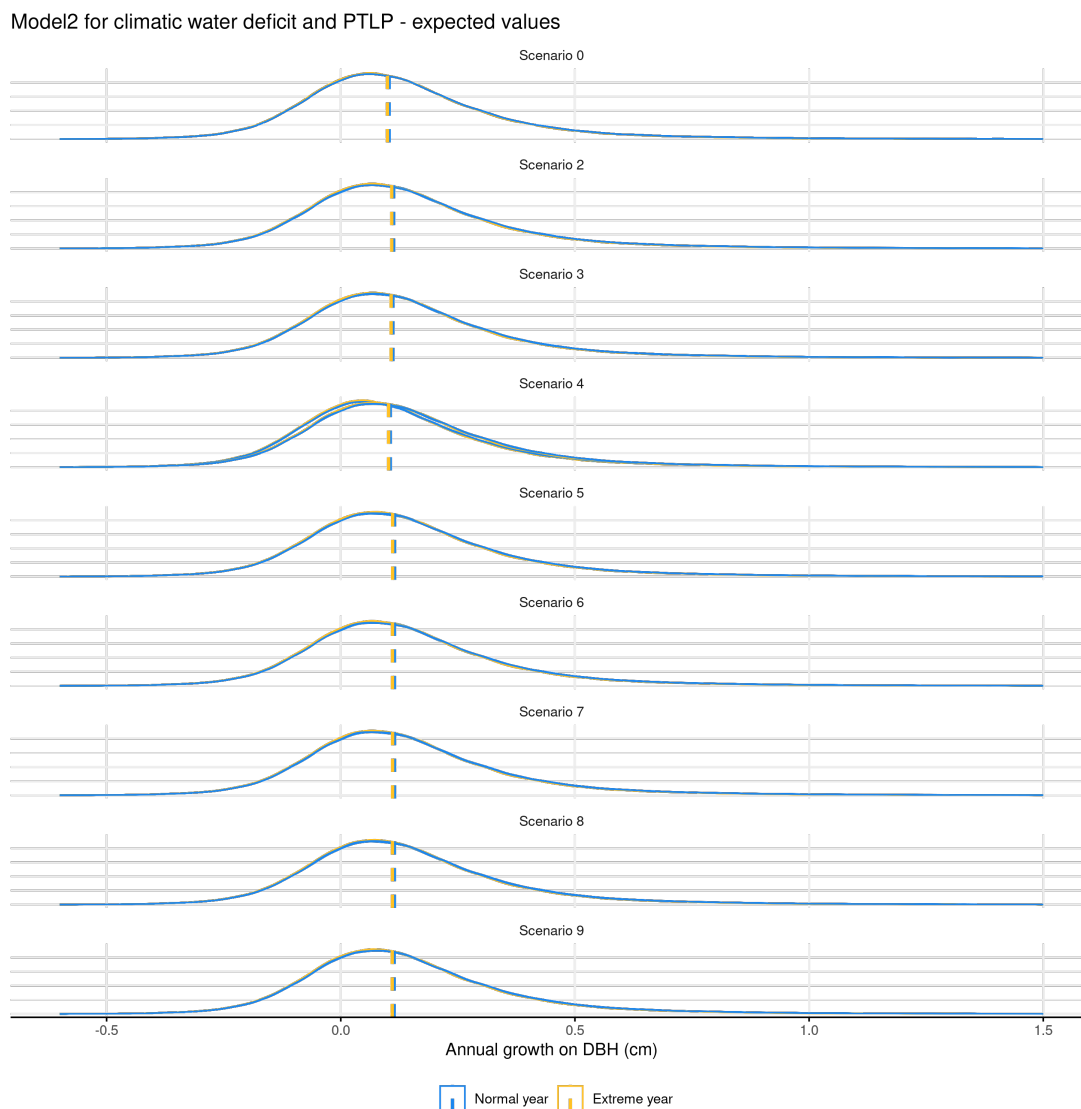


Figure 24: Distribution de la croissance diamétrique des arbres en cm (Annual growth rate on DBH), pour chaque scénario et par type de climat (année normale ou année extrême) (une courbe par itération)

Model2 for climatic water deficit and STODENS - expected values

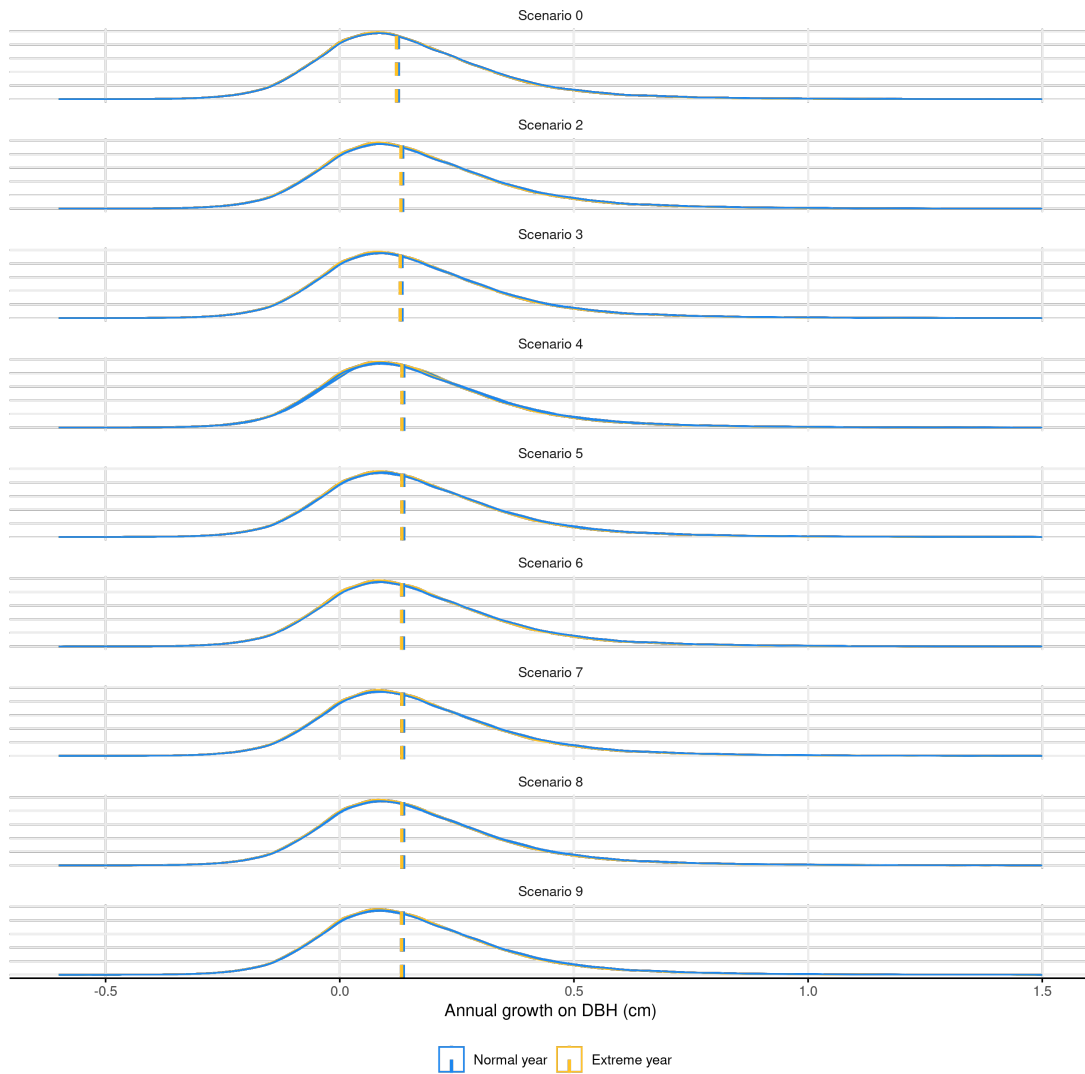


Figure 25: Distribution de la croissance diamétrique des arbres en cm (Annual growth rate on DBH), pour chaque scénario et par type de climat (année normale ou année extrême) (une courbe par itération)

Model2 for temperature and WSG - expected values

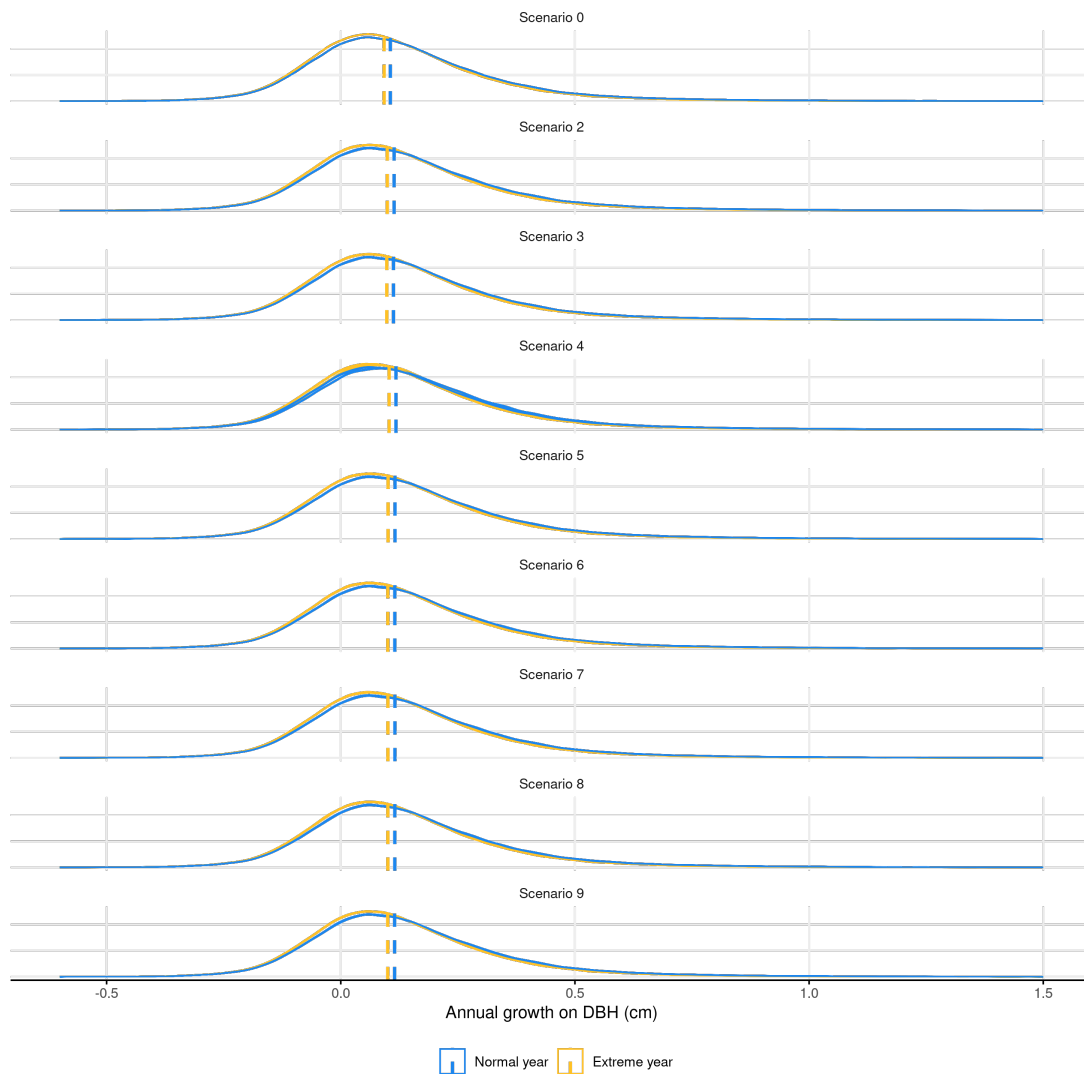


Figure 26: Distribution de la croissance diamétrique des arbres en cm (Annual growth rate on DBH), pour chaque scénario et par type de climat (année normale ou année extrême) (une courbe par itération)

Table 8: Croissances diamétriques médianes prédites et différence relative médiane due à des conditions climatiques extrêmes telles que prédites par les modèles M2 d'interactions de voisinage neutres

Scénario	Croissance diamétrique médiane conditions climatiques normale (cm/an)	Croissance diamétrique médiane conditions climatiques extremes (cm/an)	Différence relative médiane entre une année normale et une année extreme (%)	Trait fonctionnel	Variable climatique
0	0.103	0.100	-1.378	PTLP	CWD
2	0.113	0.109	-1.411	PTLP	CWD
3	0.111	0.108	-1.406	PTLP	CWD
4	0.106	0.102	-1.396	PTLP	CWD
5	0.115	0.111	-1.420	PTLP	CWD
6	0.115	0.110	-1.411	PTLP	CWD
7	0.115	0.111	-1.417	PTLP	CWD
8	0.114	0.110	-1.414	PTLP	CWD
9	0.114	0.110	-1.415	PTLP	CWD
0	0.125	0.121	-1.599	STODENS	CWD
2	0.134	0.131	-1.607	STODENS	CWD
3	0.133	0.129	-1.603	STODENS	CWD
4	0.137	0.133	-1.602	STODENS	CWD
5	0.136	0.133	-1.611	STODENS	CWD
6	0.136	0.132	-1.602	STODENS	CWD
7	0.136	0.132	-1.602	STODENS	CWD
8	0.136	0.132	-1.611	STODENS	CWD
9	0.136	0.132	-1.619	STODENS	CWD
0	0.106	0.093	-7.116	WSG	TX
2	0.114	0.099	-7.678	WSG	TX
3	0.113	0.098	-7.580	WSG	TX
4	0.118	0.103	-7.657	WSG	TX
5	0.116	0.101	-7.791	WSG	TX
6	0.115	0.100	-7.781	WSG	TX
7	0.116	0.101	-7.796	WSG	TX
8	0.115	0.101	-7.776	WSG	TX
9	0.115	0.100	-7.726	WSG	TX

Annexe 7 : Résultats complémentaires d'application des modèles basés sur les interactions non-neutres

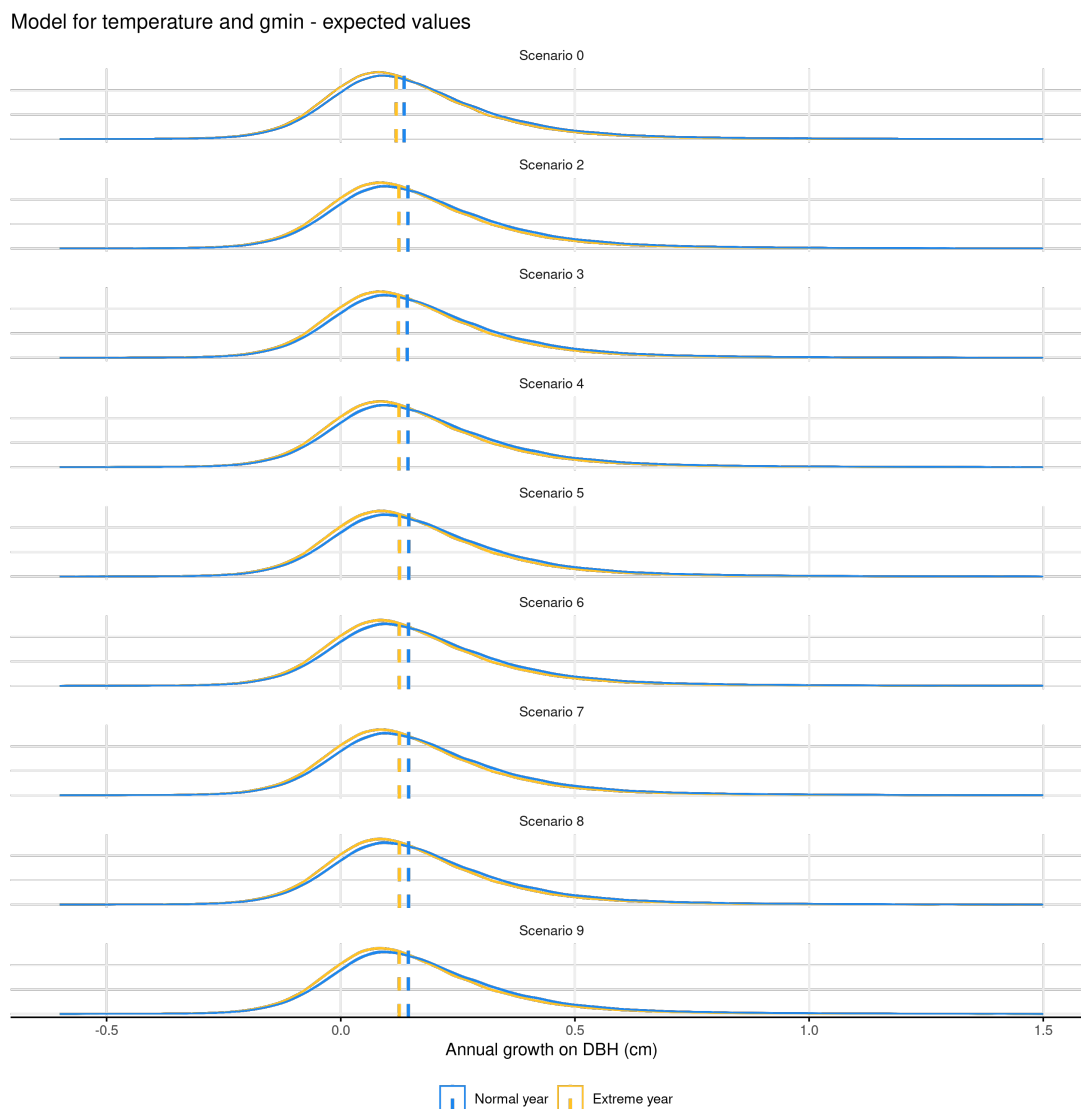


Figure 27: Distribution de la croissance diamétrique des arbres en cm (Annual growth rate on DBH), pour chaque scénario et par type de climat (année normale ou année extrême) (une courbe par itération)