



CENTRE INTERNATIONAL DE RECHERCHE EN
AGRONOMIE POUR LE DÉVELOPPEMENT

**Projet GFclim
FEDER 2014 2020, Convention
GY0006894**

**Gestion Forestière et Changements
Climatiques en Guyane Française**

Rapport Final

...

Bruno HÉRAULT

...

Sabrina COSTE

Géraldine DERROIRE

Laurent DESCROIX

Maguy DULORMNE

Loïc LOUISON

Camille PIPONOT-LAROCHE

Stéphane TRAISSAC

...



European Union

European Regional

Development Fund

Investing in your future

20 mai 2020

Table des matières

1	Résumé du Projet GFclim	1
1.1	Contexte	1
1.2	Objectifs	1
1.3	Retombées potentielles	1
1.3.1	Pour la Guyane	1
1.3.2	A l'international	2
1.4	Caractères innovants du projet	2
1.5	Résultats attendus et livrables	2
1.6	Equipe Projet	3
2	Atténuer la contribution de la Guyane aux Changements Climatiques	4
2.1	Amélioration de la comptabilité Carbone WP1	4
2.1.1	Responsables	4
2.1.2	Contexte	4
2.1.3	Objectifs spécifiques	4
2.1.4	Liste des travaux réalisés et Livrables	4
2.1.5	Principaux résultats	5
2.1.5.1	Fonctionnement global du modèle de bilan carbone	5
2.1.5.2	Sous-modèle de dégâts et Exploitation à Faible Impact (EFI)	7
2.1.5.3	Reconstitution des stocks de carbone en forêt naturelle	7
2.1.5.4	Sous-modèle de plantation	8
2.1.5.5	Bois énergie	9
2.1.5.6	Exploitation hors Domaine Forestier Permanent	9
2.1.6	Conclusions	9
2.2	Simuler différents scénarios de développement de la filière bois WP2	10
2.2.1	Responsables	10
2.2.2	Contexte	10
2.2.3	Objectifs spécifiques	11
2.2.4	Liste des travaux réalisés	11
2.2.4.1	Co-construction des scénarios alternatifs de développement de la filière bois	11
2.2.4.2	Simulation des bilans carbone des différents scénarios	11
2.2.4.3	Analyse de sensibilité de l'ensemble des scénarios	11
2.2.5	Principaux résultats	11
2.2.5.1	Scénarios alternatifs de développement de la filière bois retenus	11
2.2.5.2	Bilan carbone des différents scénarios et analyse comparée	12
2.2.5.3	Le cas du scénario Historique	13
2.2.5.4	Effet de la réduction des impacts de l'exploitation en forêt naturelle	14
2.2.5.5	Cas du scénario Plantation en augmentation de la récolte	14
2.2.5.6	Les émissions évitées représentent un élément important du bilan carbone de la filière	15
2.2.6	Conclusions	16
2.3	Trouver des compromis de développement entre Services Ecosystémiques WP3	17
2.3.1	Responsables	17

2.3.2	Contexte	17
2.3.3	Objectifs spécifiques	17
2.3.4	Liste des travaux réalisés	18
2.3.5	Principaux résultats	18
2.3.5.1	Les modèles de services écosystémiques dans les forêts exploitées	18
2.3.5.2	Cadre méthodologique de loptimisation multi-critères	18
2.3.5.3	Elaboration de 8 scénarios prospectifs	18
2.3.5.4	Principal compromis entre production et conservation	19
2.3.5.5	Imposer des intensités et cycles dexploitation intermédiaires donne des résultats sous-optimaux	19
2.3.6	Conclusions	21
3	Adapter la production de bois aux changements climatiques	22
3.1	Tester la vulnérabilité démographique des essences commerciales WP4	22
3.1.1	Responsables	22
3.1.2	Contexte	22
3.1.3	Objectifs spécifiques	22
3.1.4	Liste des travaux réalisés	22
3.1.4.1	Acquisition de données	22
3.1.4.2	Modélisation	24
3.1.5	Principaux résultats	25
3.1.5.1	Calcul d'un indice de stress hydrique pour chacun des sites du réseau Guyafor	25
3.1.5.2	Résultats sur la vulnérabilité démographique des espèces étudiées	25
3.1.5.3	Classement des espèces selon leur vulnérabilité démographique au stress hydrique	26
3.1.5.4	Autres résultats	26
3.1.6	Conclusions	29
3.2	Tester la vulnérabilité écophysologique des essences commerciales WP5	29
3.2.1	Responsables	29
3.2.2	Contexte	29
3.2.3	Objectifs spécifiques	29
3.2.4	Liste des travaux réalisés	30
3.2.5	Principaux résultats	31
3.2.5.1	Vulnérabilité des espèces à la défaillance hydraulique des tiges	31
3.2.5.2	Déterminants anatomiques de la vulnérabilité à l'embolie du xylème	31
3.2.5.3	Vulnérabilité des feuilles à la dessiccation	32
3.2.5.4	Variabilités inter-sites des traits foliaires impliqués dans la résistance à la sécheresse	33
3.2.6	Conclusions	33
3.3	Manipuler la compétition pour simuler l'évolution des peuplements WP6	36
3.3.1	Responsables	36
3.3.2	Contexte	36
3.3.3	Objectifs spécifiques	36
3.3.4	Liste des travaux réalisés	36
3.3.4.1	Simulateur SELVA	37
3.3.4.2	Simulateur TROLL	37
3.3.4.3	Simulateur FORMIND	37
3.3.5	Principaux résultats	39
3.3.5.1	Rôle du climat dans la dynamique de la forêt à long terme	39
3.3.5.2	Effet de la perturbation par l'exploitation forestière sur les trajectoires de reconstitution de la biodiversité	39
3.3.5.3	Effet conjoint de l'exploitation forestière et du changement climatique	41
3.3.6	Conclusions	42

4	Transfert et Valorisation	43
4.1	Responsables	43
4.2	Contexte	43
4.3	Objectifs spécifiques	43
4.4	Liste des travaux réalisés	44
4.5	Principaux résultats	44
4.5.1	Analyse comparée des empreintes socio-économiques	44
4.5.2	Analyse croisée empreinte carbone/socio-économie	46
4.5.2.1	Pratiques d'exploitation à faible impact (EFI)	46
4.5.2.2	Bois Énergie	47
4.5.2.3	Effet de la mise en place de plantations	47
4.5.2.4	Besoin en investissement important de la filière	47
4.6	Conclusions et Recommendations	47
4.6.1	Un nouveau modèle efficient : les plantations pour le bois d'oeuvre	47
4.6.2	Concilier Augmentation de la production de bois d'oeuvre et Récolte de bois énergie	48
4.6.3	Une stratégie à moyen terme ?	48
4.7	Perspectives	48
	Bibliographie	50

1. Résumé du Projet GFclim

1.1 Contexte

La Guyane, avec une surface de 8,35 millions d’hectares et un taux de boisement dépassant les 95%, a une production de bois actuellement essentiellement cantonnée sur les 2,4 millions d’hectares du Domaine Forestier Permanent (DFP). Avec un accroissement démographique soutenu, les projections prévoient un doublement de la population de Guyane avant 2030. Cet accroissement démographique conduit à envisager une augmentation sensible de la récolte dans le DFP. Or les forêts de Guyane française sont considérées comme vulnérables aux changements climatiques (CC), les dernières projections du GIEC au niveau global indiquant une diminution des précipitations de l’ordre de 20-30% à l’horizon 2100 selon le scénario tendanciel RCP8.5, business-as-usual.

1.2 Objectifs

L’objectif général du projet GFclim est de tester la sensibilité des forêts guyanaises aux effets combinés de l’exploitation forestière et des CC avec l’ambition explicite d’adapter les modes d’exploitation actuels aux enjeux du changement global (émissions carbone) et aux climats du futur. L’objectif général se décline en 2 objectifs spécifiques, chacun faisant l’objet de 3 Work-Package particuliers. En outre un Work-Package transversal est spécifiquement dédié à l’intégration des acteurs de la filière au cur de la démarche de recherche et aux transferts des résultats vers les acteurs guyanais. Chaque Work-Package a pour ambition de produire des résultats à la fois d’une portée scientifique générale mais aussi concrets pour les acteurs de la filière bois en Guyane.

- Atténuer la contribution de la Guyane aux CC
 - WP1 - Amélioration de la comptabilité Carbone
 - WP2 - Simuler différents scénarios de développement de la filière Bois
 - WP3 - Trouver des compromis de développement entre Services Ecosystémiques
- Adapter la production de bois aux CC
 - WP4 - Tester la vulnérabilité démographique des essences commerciales
 - WP5 - Tester la vulnérabilité écophysiological des essences commerciales
 - WP6 Manipuler la compétition pour simuler l’évolution des peuplements
- WPt Transfert et valorisation

1.3 Retombées potentielles

1.3.1 Pour la Guyane

L’objectif final du projet GFclim est de permettre l’émergence et l’appropriation des éléments d’atténuation et d’adaptation aux CC dans la stratégie de la filière, pragmatiques et réalistes, sur la base d’un processus itératif. La première étape sera de traduire en indicateurs chiffrés, en termes d’émission de CO_2 (augmentation des prélèvements, plantations, bois-énergie...) ou en

termes d'impact du changement climatique (perte de productivité, mortalité etc...), les différents scénarios d'évolution possibles en fonction des orientations stratégiques de la filière. L'impact socio-économique de ces scénarios sera ensuite évalué avec la filière de manière à intégrer dans la stratégie à long terme de la filière des éléments d'adaptation de nature diverse (gestion forestière, équipement et machinisme, réglementation...) aux CC. Ce travail devra aboutir à un plan d'action, autant que possible chiffré pour la filière.

1.3.2 A l'international

L'équipe projet est partie prenante du réseau TmFO (<http://www.tmfo.org/>) qui regroupe, pour l'amazone, à la fois les services forestiers nationaux et les instituts de recherche [41]. Les recherches menées dans GFclim participeront du rayonnement de la recherche guyanaise à l'international tout comme elles bénéficieront de l'expérience et des connaissances des partenaires du réseau. Les forêts de production représentent actuellement 50% des surfaces de forêts tropicales mais mobilisent globalement beaucoup moins d'effort de recherche [9]. A travers GFclim, nous montrerons que ces forêts jouent un rôle crucial pour les zones tropicales et que les choix des trajectoires de développement pour ces forêts sont cruciaux pour l'avenir des paysages forestiers tropicaux. Chaque WP fera l'objet d'une publication scientifique de Rang A, avec pour ambition de montrer que la situation guyanaise, particulière à bien des égards dans le paysage tropical, est une situation privilégiée pour être à l'avant-garde des questions de recherches de demain.

1.4 Caractères innovants du projet

GFclim propose une approche originale de la question de la gestion forestière des forêts tropicales en contexte de changements climatiques sur au moins deux aspects.

- L'analyse des trajectoires de développement de la filière se fera suivant une approche multicritères qui correspond aux multiples enjeux auxquels doit répondre la prise de décision. Ces approches multicritères dans l'espace et dans le temps ont été développées récemment, pour répondre aux enjeux de gestion des écosystèmes, mais encore très peu appliquées aux écosystèmes tropicaux.
- Notre approche de la vulnérabilité des essences commerciales aux changements climatiques se fera à la fois dans une perspective démographique (évolution des populations d'arbres dans le temps) et écophysiological (capacité d'une essence donnée à supporter biologiquement un stress hydrique). Ces deux perspectives, parce qu'elles impliquent des disciplines scientifiques différentes, sont très rarement intégrées dans un schéma d'analyse cohérent. A travers notre approche de modélisation (WP6), nous proposons de réunir ces deux points de vue dans une approche intégrée la vulnérabilité des essences commerciales de Guyane française aux changements climatiques.

1.5 Résultats attendus et livrables

- WP1 - Amélioration de la comptabilité Carbone
 - Modèle de bilan Carbone des forêts de production V2.0
 - Analyse filière-bois' du bilan Carbone
- WP2 - Simuler différents scénarios de développement de la filière Bois
 - Scénarios prospectifs d'évolution de la filière bois
 - Bilan Carbone des scénarios
- WP3 - Trouver des compromis de développement entre Services Ecosystémiques
 - Analyse multicritère comparative des scénarios WP2
 - Cartes d'irremplaçabilité
- WP4 - Tester la vulnérabilité démographique des essences commerciales
 - Classement des essences selon leur vulnérabilité démographique

- Simulations du renouvellement de la ressource
- WP5 - Tester la vulnérabilité écophysiological des essences commerciales
 - Identification des traits écophysiological clés
 - Classement des essences selon leur vulnérabilité écophysiological
- Manipuler la compétition pour simuler l'évolution des peuplements
 - Réhabilitation du dispositif de Risquetout
 - Simulations du renouvellement de la ressource sous différents scénarios climat-exploitation

1.6 Equipe Projet

Work Package	Nom	Institution
WP1	Camille Pioniot-Laroche	Université de la Guyane
	Géraldine Derroire	Cirad
WP2	Laurent Descroix	Office National des Forêts
	Géraldine Derroire	Cirad
WP3	Bruno Hérault	Cirad
	Camille Pioniot-Laroche	Université de la Guyane
WP4	Loïc Louison	Université de la Guyane
	Stéphane Traissac	AgroParisTech
WP5	Sabrina Coste	Université de la Guyane
	Maguy Dulormne	Université des Antilles
WP6	Laurent Descroix	Office National des Forêts
	Bruno Hérault	Cirad
WPt	Géraldine Derroire	Cirad
	Stéphane Traissac	AgroParisTech

TABLE 1.1 : Tableau récapitulatif des responsables des Works-Packages du projet

2. Atténuer la contribution de la Guyane aux Changements Climatiques

2.1 Amélioration de la comptabilité Carbone WP1

2.1.1 Responsables

- Camille Piponiot-Laroche, *Université de la Guyane*
- Géraldine Derroire, *Cirad*

2.1.2 Contexte

On estime que la destruction des forêts tropicales à l'échelle mondiale est à l'origine de 7 à 12% des émissions de gaz à effet de serre provenant des activités humaines. Quantifier les émissions de carbone liées à la déforestation reste, malgré la difficulté à estimer les stocks initiaux, relativement simple car les effets sont directs et définitifs. Les conséquences de l'exploitation forestière sur le cycle du carbone sont, elles, plus difficiles à quantifier car les dimensions spatiales (e.g. intensités et modalités d'exploitation) et temporelles (e.g. dégradation des bois morts, reconstitution des stocks) sont inhérentes au processus étudié. Paradoxalement, bien que 400 millions d'hectares de forêts tropicales soient aujourd'hui dédiées à la production de bois, le rôle des forêts de production dans le cycle global du carbone reste peu connu et peu étudié [9].

Dans ce contexte, l'objectif général du WP1 est de développer un modèle de bilan carbone de la filière forestière guyanaise. Ce modèle permettra à la fois de quantifier les émissions liées aux activités passées, et ainsi de fournir les données nécessaires à une observation des émissions de la Guyane, mais aussi de simuler le bilan carbone de différents scénarios prospectifs de développement de la filière (WP2) afin de proposer aux décideurs les éléments nécessaires à la définition des stratégies de production de bois pour les années à venir.

2.1.3 Objectifs spécifiques

Le travail conduit dans le cadre du WP1 s'appuie sur la modélisation rigoureuse des différents flux (émissions et stockage) intervenant sur l'ensemble de la filière forestière. Pour cela, il mobilise les connaissances, données et modèles produits par la communauté scientifique. Il s'appuie en particulier sur un premier travail réalisé en 2014-2015 [12] qui avait proposé une modélisation de l'exploitation forestière et identifié un certain nombre de points à améliorer, qui sont devenus les objectifs spécifiques initiaux du WP1

- Améliorer le sous-modèle de dégâts pour diminuer les incertitudes
- Gérer les exploitations hors Domaine Forestier Permanent
- Intégrer les itinéraires techniques Bois-Energie + Exploitation à Faible Impact
- Faire une analyse filière

2.1.4 Liste des travaux réalisés et Livrables

- Inventaires forestiers
 - Paracou (3 campagnes, 15 parcelles)

- Arbocel (1 campagne, 1 parcelle)
- Manaré (1 campagne, 2 parcelles)
- Risquetout (1 campagne, 4 parcelles)
- Diagnostics post-exploitation
 - Les données de suivi des diagnostics post-exploitation ont été analysées et un rapport a été produit par l'ONF en 2017
- Modèle de bilan Carbone des forêts de production V2.0
 - Le modèle développé est présenté ci-après. L'ensemble des codes ainsi que la description détaillée du modèle et de l'ensemble des sous-modèles sont disponibles sur GitHub . Ce modèle a permis de simuler le bilan carbone de différents scénarios de développement de la filière bois (WP2) présenté dans un rapport à destination de la filière (WPt)

2.1.5 Principaux résultats

2.1.5.1 Fonctionnement global du modèle de bilan carbone

Le modèle permet de calculer le bilan carbone de la filière depuis les activités menées en forêt et en plantation, jusqu'à la première transformation du bois. C'est un modèle dynamique, c'est-à-dire qu'il attribue les émissions/stockage au moment où ces flux ont réellement lieu (par exemple, les émissions liées à la décomposition du bois s'étalent sur plusieurs années [34]). Ce modèle considère les émissions et stockage de carbone résultant de la production annuelle d'une quantité de bois d'œuvre fixée, qui peut être issue de forêt naturelle ou de plantation. La production de bois énergie est considérée comme connexe, c'est-à-dire qu'aucune activité n'a pour objectif principal la production de bois énergie. Le modèle comporte une partie historique (1974-2018) en prenant les volumes réels de bois produits (source ONF), et une partie prospective (2019-2088) basée sur les paramètres fixés pour chacun des scénarios.

En **forêt naturelle**, l'exploitation sélective produit du bois d'œuvre qui est transporté en scierie. L'exploitation produit également des dégâts (arbres tués par l'abattage ou le débardage) et conduit aussi à abattre des arbres pour faire les routes forestières, les pistes principales et les aires de stockage. Une partie de ces arbres sont récupérés pour être valorisés sous forme de bois énergie. Le reste de ces arbres, ainsi que les houppiers des arbres exploités, se décomposent en forêt pendant les années qui suivent l'exploitation. Par ailleurs, l'écosystème forestier récupère progressivement le carbone perdu dans la biomasse exploitée et les dégâts, jusqu'à ce qu'il retrouve une quantité de biomasse similaire à celle d'avant exploitation (récupération). La forêt se réinstalle naturellement sur les zones défrichées pour les pistes principales et les aires de stockage (mais pas les routes forestières qui restent ouvertes), ce qui stocke du carbone (régénération).

Pour produire du bois d'œuvre en **plantation**, une défriche initiale est réalisée sur des parcelles de forêt naturelle exploitées entre 1974 et 1994, sur une surface suffisante pour atteindre les objectifs de production fixés par le scénario considéré lors de la récolte finale (30 ans après plantation). La défriche n'a lieu que pour le premier cycle de plantation. Chaque parcelle de plantation est replantée après récolte et il n'y a alors plus besoin de défricher. Une partie du bois de défriche est valorisée sous forme de bois d'œuvre, une partie sous forme de bois énergie, le reste se décompose sur place. La croissance des arbres en plantation stocke du carbone et les arbres morts naturellement se décomposent sur place. Une partie du bois d'éclaircie est valorisée sous forme de bois énergie, le reste se décompose sur place. La récolte finale produit du bois d'œuvre ainsi que du bois énergie et laisse une partie de la biomasse se décomposer sur place.

Les émissions liées aux **opérations logistiques** et de planification, les **transports** (flèches rouges de la Figure 2.1, page 6), le **fonctionnement** de la scierie et de la centrale biomasse, la **décomposition des sciages** en fin de vie et la **combustion des bois en centrale biomasse** sont également comptabilisés. Le modèle prend également en compte deux types d'**émissions évitées**. Une partie (40%) des sciages sont considérés avoir une utilisation qui vient en remplacement d'un autre matériau. Les émissions liées à la production de cet autre matériau sont donc considérées comme évitées. Pour ce qui est des émissions évitées en centrale biomasse, ce sont les émissions qui résulteraient de la production de la même quantité d'énergie à base de carburant fossile.

EXPLOITATION SÉLECTIVE EN FORÊT NATURELLE

PLANTATIONS FORESTIÈRES

9

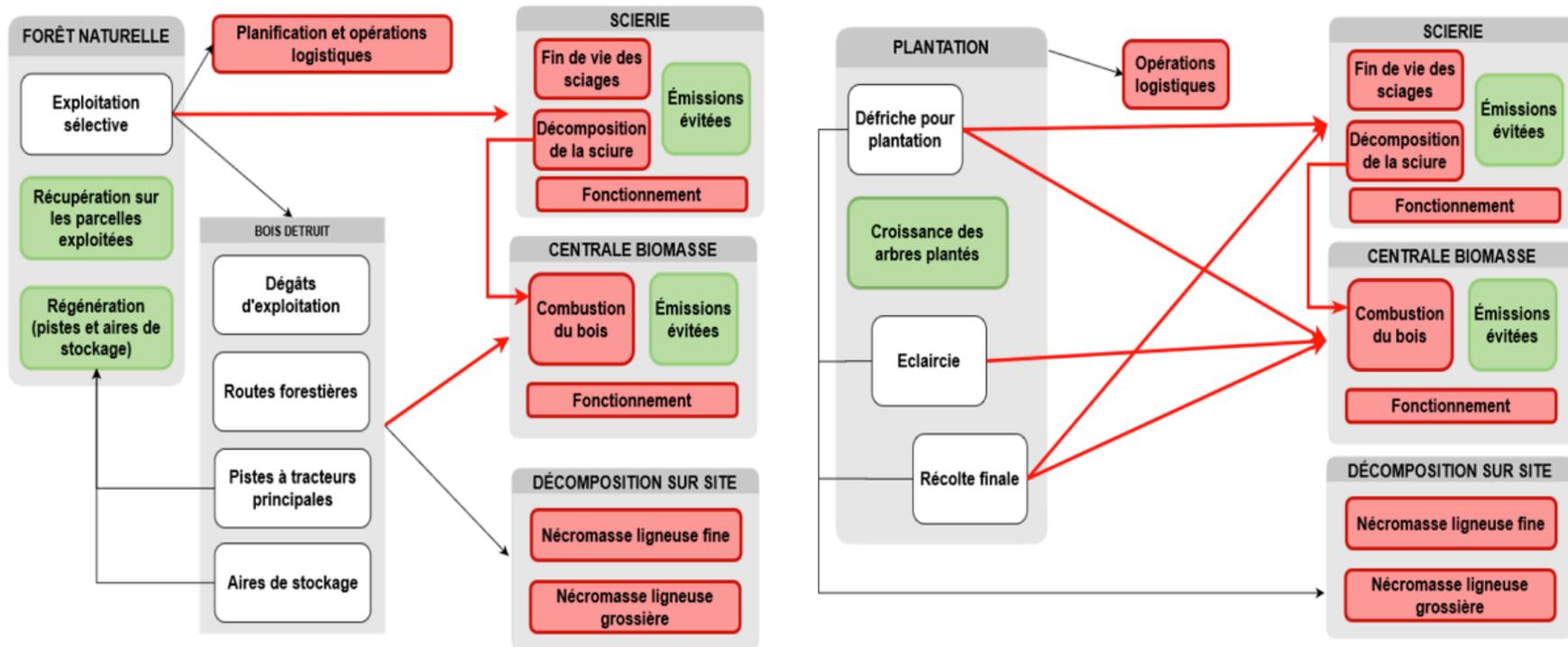


FIGURE 2.1 : Schéma conceptuel du modèle de Bilan Carbone © G. DERROIRE

Les sous-modèles constituant le modèle global (*i.e.* chaque \acute{n} boîte \acute{z} de la Figure 2.1, page 6) sont des modèles statistiques bayésiens. Ces sous-modèles ont été calibrés à partir de données de dispositifs de suivi de long terme de la dynamique forestière (réseaux Guyafor et TmFO, station de recherche forestière expérimentale de Paracou), de données issues d'études et du dire d'expert de l'ONF, ou de la littérature scientifique ou grise. Le modèle global a été écrit avec le langage de programmation R. Nous présentons ci-après les principaux sous-modèles.

2.1.5.2 Sous-modèle de dégâts et Exploitation à Faible Impact (EFI)

Les données de suivi des parcelles permanentes de TmFO pour l'Amazonie ainsi que celles des diagnostics post-exploitation (DPE) ont été utilisées pour différentes parties de ce sous-modèle (Figure 2.2, page 7). Dans un premier temps, nous avons utilisé les données de TmFO pour calibrer un modèle estimant la quantité de carbone dans les dégâts C_{dgt} en proportion de $C_{initial} - C_{grumes}$, selon l'équation suivante :

$$\frac{C_{dgt}}{C_{initial} - C_{grumes}} \sim Beta(\alpha, \beta) \text{ avec } \alpha = \frac{C_{grumes}^\gamma}{C_{initial}} \times \phi > 0 \text{ et } \beta = \left(1 - \frac{C_{grumes}^\gamma}{C_{initial}}\right) \times \phi > 0$$

Les valeurs médianes (intervalle de crédibilité à 95%) des paramètres postérieurs sont $\gamma = 0.5439$ (0.5249-0.5624) et $\phi = 36.98$ (27.57-49.26). Ces dégâts sont considérés être ceux d'une exploitation telle que conduite actuellement en Guyane. Pour tester l'importance de l'amélioration des pratiques par le développement de l'exploitation à faible impact, les dégâts sont obtenus en appliquant un coefficient de réduction des dégâts $R_{reduc} \sim Beta(2.72, 3.063)$.

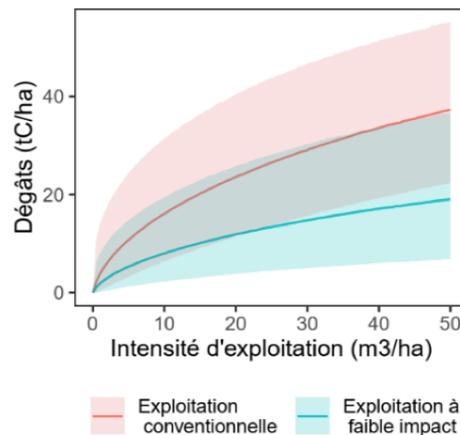


FIGURE 2.2 : Sous-modèle de dégâts (NB : la quantité de dégâts dépend de la biomasse initiale de la parcelle, les valeurs présentées ici correspondent à une parcelle de biomasse initiale médiane) © G. DERROIRE

2.1.5.3 Reconstitution des stocks de carbone en forêt naturelle

Après exploitation en forêt naturelle, deux types de processus permettent une récupération du carbone émis lors de l'exploitation :

- sur la parcelle, la croissance des arbres et le recrutement (installation de nouveaux arbres) permet la récupération d'une partie carbone émis lors de l'exploitation, selon un modèle calibré à l'aide des données du dispositif TmFO pour l'Amazonie pour lequel la vitesse de récupération dépend d'un ensemble de covariables propres à la parcelle (intensité de la perturbation liée à l'exploitation, quantité de carbone présente initialement, précipitation annuelle, saisonnalité des précipitations et densité apparente du sol) (Figure 2.3, page 8)

- hors de la parcelle, il y a régénération de la forêt sur les zones défrichées pour les pistes principales et les aires de stockage, selon un modèle calibré à l'aide des données de la parcelle permanente de forêt secondaire Arbocel (piste de St Elie) (Figure 2.3, page 8)

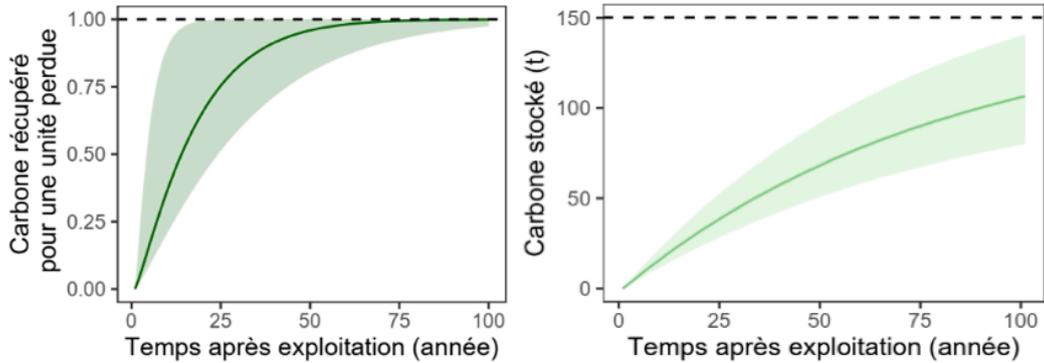


FIGURE 2.3 : Sous-modèle de récupération pour une parcelle médiane (gauche) et Sous-modèle de régénération pour une parcelle médiane de 1ha, la ligne pointillée représentant la quantité de carbone initiale (droite) © G. DERROIRE

2.1.5.4 Sous-modèle de plantation

Le sous-modèle de plantation se base sur les données de productivité des plantations expérimentales réalisées à Paracou (espèces les plus performantes). Les éclaircies (3 éclaircies pour une durée de cycle de plantation de 30 ans) sont réalisées de manière à anticiper la mortalité naturelle, c'est-à-dire que la quantité de bois correspondant à la mortalité naturelle en l'absence d'éclaircie est prélevée de manière anticipée au moment d'une éclaircie. A partir de la deuxième éclaircie, une partie du bois est valorisée sous forme de bois énergie. Le sous-modèle donne les quantités de carbone correspondants au bois mort qui se décompose sur place (nécromasse fine et grossière), au bois énergie et au bois d'oeuvre (Figure 2.4, page 8).

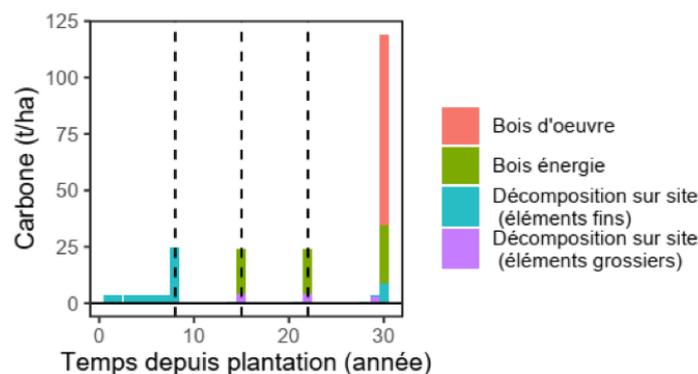


FIGURE 2.4 : Différents flux de carbone pour une plantation médiane d'un hectare (un cycle de plantation, hors défriche) © G. DERROIRE

2.1.5.5 Bois énergie

Une partie des dégâts d'exploitation, du bois présent sur les aires défrichées (les routes et pistes forestières, les aires de stockage et l'installation des plantations), et des connexes de scierie est valorisée pour produire de l'électricité. La combustion émet l'intégralité du carbone contenu dans la biomasse brûlée. Les émissions évitées correspondent à la production de la même quantité d'énergie (calculée à partir du pouvoir calorifique inférieur des bois brûlés si elle avait été produite par combustion d'énergie fossile).

2.1.5.6 Exploitation hors Domaine Forestier Permanent

Contrairement à l'objectif fixé en début de projet, le modèle ne prend pas en compte les exploitations hors du Domaine Forestier Permanent (DFP). En effet, nous ne disposons pas de données chiffrées sur l'exploitation qui y est conduite et qui diffère de l'exploitation conduite par l'ONF sur le DFP (intensité d'exploitation, quantité de dégâts produits), et encore moins sur les dynamiques forestières post-exploitation qui s'en suivent.

2.1.6 Conclusions

Le modèle de bilan carbone de la production de bois d'oeuvre V2.0 comporte de nombreux développements nouveaux par rapport au modèle réalisé en 2014-2015 [12]. Les sous-modèles de dégâts, de récupération et de régénération ont été modifiés pour proposer une modélisation plus réaliste (non linéaire). Ceci conduit à un ajustement des résultats pour les exploitations passées. La prise en compte de l'exploitation des connexes pour le bois énergie, des plantations, de l'exploitation à faible impact et des émissions évitées permet d'utiliser ce modèle pour simuler des bilans prospectifs de la filière forêt-bois.

Afin d'interpréter correctement les résultats des simulations de scénarios prospectifs utilisant ce modèle, il est nécessaire de comprendre les hypothèses sous-jacentes, ainsi que leurs influences sur les résultats de bilan carbone. C'est le cas particulièrement pour les trois points suivants :

- Le modèle considère qu'il y a des émissions évitées par l'utilisation de bois énergie en remplacement d'énergie fossile et par utilisation d'une partie des sciages (40%) en remplacement d'un autre matériau. Ces émissions sont estimées dans le contexte guyanais actuel. Elles influencent fortement les résultats. Un changement important de la politique énergétique de la Guyane favorisant les énergies renouvelables changerait fortement les émissions évitées pour l'énergie. Pour ce qui est des émissions évitées pour une partie des sciages, le coefficient de déplacement est obtenu à partir d'une méta-analyse à l'échelle internationale [40] et n'est donc pas spécifique à la Guyane.
- Le modèle de plantation prévoit une replantation après récolte. Les émissions initiales liées à la défriche sont rapidement compensées par les autres flux (et en particulier le stockage de carbone dans les arbres plantés). Cependant, si plantation est abandonnée après la première récolte, le bilan net redevient rapidement émetteur (Figure 2.5, page 10).
- La productivité des plantations a été estimée sur la base des essais de plantations parmi les plus productifs conduits en Guyane. Si cette productivité était modifiée par des changements de pratiques, cela changerait le bilan carbone des plantations. Il en va de même pour ce qui est des rendements de scierie et de centrale biomasse (fixés respectivement à 30% et 22%).

Le développement du modèle de Bilan C (WP1) a permis de mettre en avant la nécessité de poursuivre et développer les efforts d'acquisition de données, en particulier pour ce qui concerne le suivi de la dynamique post-exploitation des forêts naturelles (dispositif de Paracou et réseau Guyafor), les diagnostics post-exploitation permettant de quantifier les dégâts (notamment dans le cadre de l'exploitation à faible impact), le suivi de productivité des plantations récemment mises en place en Guyane, les pratiques d'exploitation telles qu'elles sont conduites en dehors du Domaine Forestier Permanent et les dynamiques forestières qui s'en suivent. Les perspectives possibles de développement de ce modèle comprennent :

- Le développement de l'approche spatialisée : pour l'instant, le modèle se base sur les caractéristiques environnementales des parcelles du Domaine Forestier Permanent, mais ne permet pas de simuler un changement des massifs exploités dans le temps

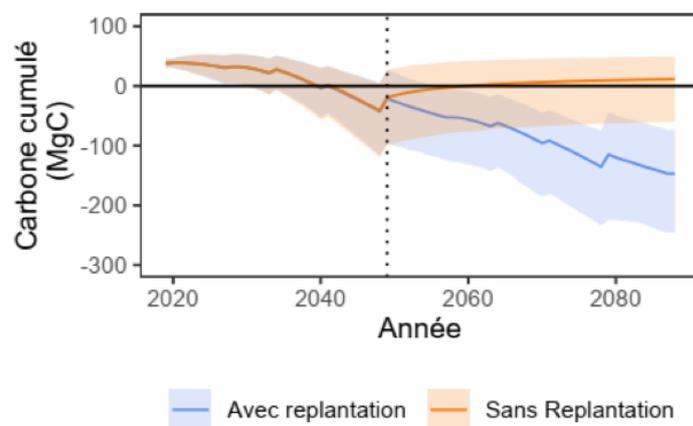


FIGURE 2.5 : Bilan carbone cumulé pour une parcelle de plantation d'un hectare plantée en 2019 avec et sans replantation après récolte © G. DERROIRE

- Le développement d'une interface en ligne facile d'utilisation permettant à l'utilisateur de simuler les scénarios qu'il souhaite et de réaliser un suivi du bilan carbone en temps réel, sans avoir besoin d'utiliser directement le code informatique du modèle

2.2 Simuler différents scénarios de développement de la filière bois WP2

2.2.1 Responsables

- Laurent Descroix, *Office National des Forêts*
- Géraldine Derroire, *Cirad*
- Caroline Bedeau, *Office National des Forêts*

2.2.2 Contexte

Le fort accroissement démographique de la Guyane actuel et attendu dans les prochaines décennies conduit à envisager une hausse conséquente de la demande en bois d'oeuvre et de la consommation d'énergie. Actuellement d'environ $80\,000\text{m}^3\cdot\text{an}^{-1}$, la récolte du bois d'oeuvre n'est réalisée qu'en forêt naturelle, et seule une petite partie des connexes de scierie sont utilisés en centrale biomasse pour la production d'énergie. Tandis que plusieurs projets de centrale biomasse électrogène approvisionnées en partie par les connexes d'exploitation issus des coupes de bois d'oeuvre sont en cours, les études sur le développement des plantations de bois d'oeuvre se poursuivent. Dans un contexte de changements climatiques où la forêt est au coeur des politiques d'atténuation internationales et nationales, la filière bois guyanaise de demain est aujourd'hui confrontée à des choix stratégiques parmi lesquels figure la question du bilan carbone de la gestion forestière. Le modèle développé dans le WP1 a été conçu comme un outil prospectif permettant de simuler le bilan carbone de la filière, des phases de l'exploitation à la première transformation du bois. Plusieurs scénarios alternatifs de développement de la filière ont ainsi été construits et leurs bilans carbonés analysés afin de fournir aux décideurs les éléments nécessaires à la définition de production de bois des années à venir.

2.2.3 Objectifs spécifiques

- Établir différents scénarios alternatifs de développement de la filière bois dans une démarche de co-construction.
- Faire le bilan Carbone des différents scénarios alternatifs
- Faire une analyse de sensibilité de l'ensemble des scénarios pour identifier les choix politiques importants en termes d'impact Carbone

2.2.4 Liste des travaux réalisés

2.2.4.1 Co-construction des scénarios alternatifs de développement de la filière bois

- Une première proposition de scénarios alternatifs a été élaboré à partir de l'étude de Sabbadin [39], tenant compte des perspectives d'évolution actualisées, notamment des projections d'augmentation de la récolte de BO et de nouvelles pratiques engagées ou envisagées (récolte de BE dans les connexes d'exploitation, intensification des prélèvements par la diversification des essences, diminution des impacts par l'amélioration des pratiques EFI-2, plantation de bois d'oeuvre, etc.)
- Ces scénarios actualisés ont fait l'objet d'un examen et d'une validation par les principaux acteurs de la filière bois en Guyane au cours d'un atelier de travail le 16 janvier 2018.

2.2.4.2 Simulation des bilans carbone des différents scénarios

- Le modèle de bilan carbone des forêts de production développé dans le WP1 a été utilisé pour simuler le bilan carbone prospectif de chaque scénario.
- Les résultats globaux fournissent les flux annuels et bilans cumulés, pour l'ensemble de l'exploitation forestière et pour les différents sous-ensembles (opérations logistiques, scierie, centrale biomasse, décomposition sur parcelle, récupération en forêt naturelle, etc.), permettant une analyse plus détaillée de leurs contributions respectives.

2.2.4.3 Analyse de sensibilité de l'ensemble des scénarios

- Le modèle du WP1 intègre la propagation des incertitudes des paramètres considérés comme des quantités incertaines, et les résultats en sortie incluent les intervalles de confiance à 95%. La prise en compte des effets de chaque paramètre sur ces intervalles de confiance a permis de dégager les sources d'incertitudes les plus fortes, d'identifier les efforts d'acquisition de données et d'analyse à poursuivre, et de dégager des recommandations pour les choix de gestion.
- De plus, des simulations ont été faites sur une parcelle d'1ha en faisant varier les valeurs de certains paramètres fixés par les scénarios (ex : la quantité de bois d'uvre donnant lieu à des émissions évitées) pour observer les effets sur le bilan carbone.

2.2.5 Principaux résultats

2.2.5.1 Scénarios alternatifs de développement de la filière bois retenus

Huit scénarios ont été retenus en premier lieu (Figure 2.6, page 12), selon les caractéristiques décrites ci-après. Ces 8 scénarios n'ont pas pour objectif de représenter exhaustivement les voies exclusives de développement de la filière. Ils sont construits pour fournir un panel suffisamment contrasté permettant d'identifier les effets des variables et des choix possibles. Il est important de comprendre que les variables d'entrées peuvent être combinées autrement.

Le scénario n° bois énergie dédié à initialement retenu, n'a pas été conservé dans la suite de l'étude. L'étude de cas en forêt de Balata Saut-Léodate [24], seule base de cet itinéraire, avait amené des premiers éléments montrant son bilan carbone défavorable en forêt naturelle qui ont conduit à l'écartier des objectifs de gestion forestière en DFP. Le modèle de bilan carbone n'ayant pas pu être déployé sur des forêts hors-DFP, et du fait du peu de données et du temps imparti de l'étude, le déploiement de ce scénario n'a pas été poursuivi.

Nom Scénario	Description
Historique	Ce scénario correspond à l'exploitation en moyenne telle qu'elle est menée historiquement en Guyane Française pendant les 15 dernières années. Le bois d'œuvre provient uniquement de forêt naturelle. L'objectif annuel de production de bois d'œuvre est 80 000 m ³ . L'intensité d'exploitation est 20 m ³ /ha. Il n'y a pas de valorisation des connexes d'exploitation pour la production d'énergie, seule une partie des déchets issus du sciage sont utilisés en BE.
Historique avec EFI-2	Ce scénario diffère du scénario historique uniquement par le fait que l'exploitation est faite en suivant les méthodes d'EFI-2 (pour la partie prospective uniquement). Le bois d'œuvre provient uniquement de forêt naturelle. L'objectif annuel de production de bois d'œuvre est 80 000 m ³ . L'intensité d'exploitation est 20 m ³ /ha. Il n'y a pas de valorisation des connexes d'exploitation pour la production d'énergie, seule une partie des déchets issus du sciage sont utilisés en BE.
Historique avec valorisation des connexes en BE (aussi appelé Scénario « Pivot »)	Ce scénario diffère du scénario historique uniquement par le fait qu'il y a valorisation des connexes d'exploitation pour la production d'énergie. Le bois d'œuvre provient uniquement de forêt naturelle. L'objectif annuel de production de bois d'œuvre est 80 000 m ³ . L'intensité d'exploitation est 20 m ³ /ha.
Augmentation de la récolte	Pour ce scénario, l'objectif annuel de production de bois d'œuvre est augmenté à 200 000 m ³ . Le bois d'œuvre provient uniquement de forêt naturelle. L'intensité d'exploitation est augmentée à 30 m ³ /ha, avec application des méthodes EFI-2. Il y a valorisation des connexes d'exploitation pour la production d'énergie.
Plantation en augmentation de la récolte	Pour ce scénario, l'objectif annuel de production de bois d'œuvre est fixé à 200 000 m ³ . Des plantations sont mises en place avec l'objectif de produire 120 000 m ³ de bois d'œuvre par an quand elles arriveront à maturité. L'exploitation en forêt naturelle s'ajuste sur la quantité de bois produit en plantation pour obtenir le volume total de bois d'œuvre fixé. Tant que les premières plantations ne sont pas arrivées à maturité, la forêt naturelle assure donc l'ensemble de la production de bois d'œuvre. L'intensité d'exploitation en forêt naturelle est 20 m ³ /ha. Il y a valorisation des connexes d'exploitation pour la production d'énergie.
Plantation en substitution de la récolte en forêt naturelle	Pour ce scénario, des plantations sont mises en place avec l'objectif de produire 80 000 m ³ de bois d'œuvre par an quand elles arriveront à maturité. L'exploitation en forêt naturelle permet de fournir l'objectif annuel de production de bois d'œuvre de 80 000 m ³ avant que les premières plantations n'arrivent à maturité. L'intensité d'exploitation en forêt naturelle est 20 m ³ /ha. Il y a valorisation des connexes d'exploitation pour la production d'énergie. Quand les premières plantations arrivent à maturité, la production de bois d'œuvre en forêt naturelle s'arrête et tout le bois d'œuvre provient de plantation.
Plantation isolée	Pour ce scénario, l'intégralité du bois d'œuvre provient de plantations. Il n'y a pas d'exploitation en forêt naturelle. Des plantations sont mises en place avec l'objectif de produire 80 000 m ³ de bois d'œuvre par an quand elles arriveront à maturité. Avant cela, il n'y a pas de production de bois d'œuvre (hormis celui provenant de la défriche pour installer les plantations et la production historique).
Arrêt de l'exploitation	Pour ce scénario, il n'y a ni exploitation en forêt naturelle, ni plantation. <i>L'objectif de ce scénario est uniquement de voir à quel moment le bilan carbone cumulé des exploitations passées devient nul.</i>

FIGURE 2.6 : Synthèse des scénarios alternatifs de développement de la filière bois retenus © L. DESCROIX

2.2.5.2 Bilan carbone des différents scénarios et analyse comparée

La figure 2.7 page 13 présente les bilans carbone cumulés pour chacun des scénarios, c'est-à-dire le bilan net des flux liés à toutes les activités menées en forêt et en plantation jusqu'à la première transformation du bois, intégrés sur la période 1974-2088. La période 1974-2018 (partie *historique*) étant basée sur les surfaces réellement exploitées et volumes de bois produits, la courbe

est la même pour tous les scénarios. Elle montre que sur cette période, la filière a été globalement émettrice, avec un net émis de 0.47 TgC (IC 95% : [0.41 ; 0.52] sur la période 1974-2018. La suite de l'interprétation porte donc uniquement sur la période *prospective*, 2019-2088.

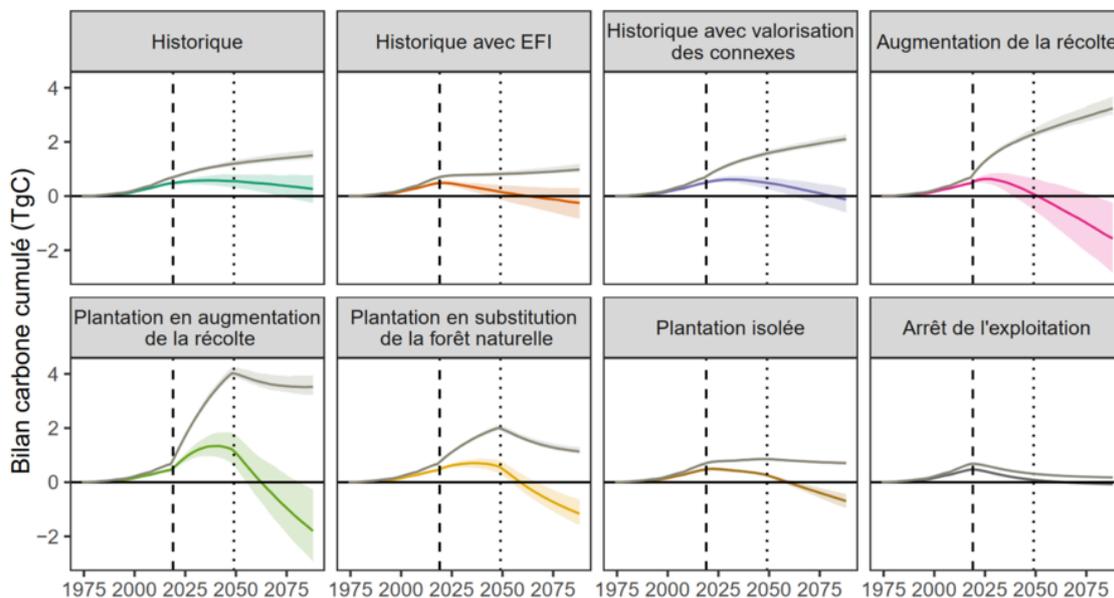


FIGURE 2.7 : Bilans carbone cumulés sur la période 1974-2088. Les bilans et intervalles de confiance à 59% sont représentés par les courbes et aplats colorés. La courbe grise représente la modalité où les émissions évitées ne sont pas prises en compte. Ligne verticale tirets : début de la période prospective; ligne verticale pointillée : début de récolte des plantations (2049) © G. DERROIRE

2.2.5.3 Le cas du scénario Historique

Le scénario Historique présente le bilan carbone le moins bon en fin de période prospectée, la filière restant globalement émettrice. On note cependant une première phase pendant laquelle le bilan continue de croître (i.e. les émissions sont plus fortes que le stockage), suivie d'une phase où le bilan net cumulé décroît. Pendant cette 2e phase, les processus de stockage deviennent plus importants que les émissions et la filière passe alors sur une tendance *stockeuse*, sans jamais atteindre le stade de *stockage net* (i.e. sur toute la période, la quantité cumulée de carbone stocké est plus forte que celle émise).

La figure 2.8 page 14 détaille les grandes composantes du scénario. Les émissions de carbone sont fortement dominées par le processus de décomposition sur site qui correspond au bois détruit restant en forêt. Dans une moindre mesure, la composante *Centrale Biomasse* est globalement émettrice, les émissions par la combustion du bois et le fonctionnement de la centrale étant plus importants que les émissions évitées. Le poste *Opérations logistiques*, comprenant les transports, représente une portion infime des émissions (0.054 TgC entre 1974 et 2088). Le stockage est lui principalement dû à la récupération de la biomasse sur les parcelles exploitées. Les composantes *régénération* et *scierie* contribuent elles aussi dans une faible mesure en stockage net de carbone.

Comparés au scénario Historique, tous les autres scénarios ont un impact positif sur le bilan de la filière qui devient alors *stockeuse nette* en stockant plus de carbone qu'elle n'en émet. Les amplitudes et dates d'inversion de l'état *émetteur net* à *stockeur net* varient fortement.

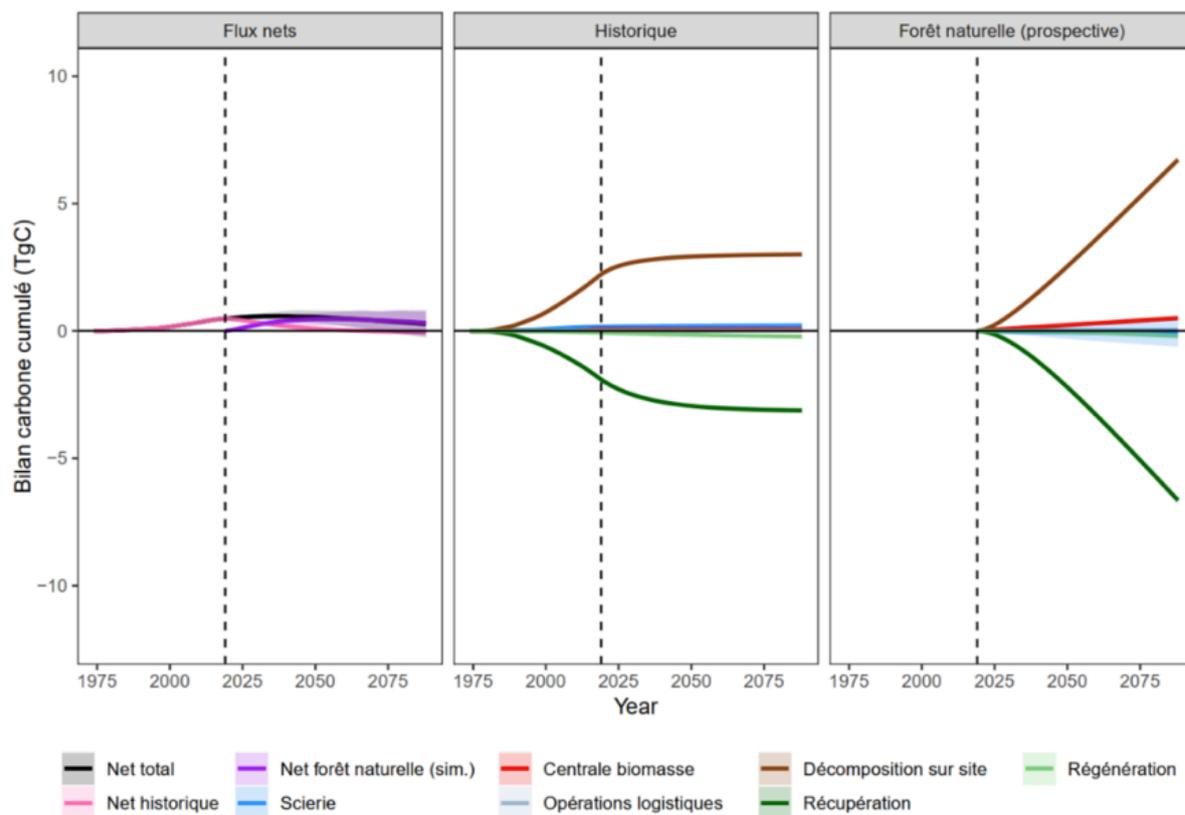


FIGURE 2.8 : Bilan carbone cumulé du scénario Historique sur la période 1974-2088 © G. DERROIRE

2.2.5.4 Effet de la réduction des impacts de l'exploitation en forêt naturelle

Dans le scénario Historique avec EFI-2, qui diffère du scénario Historique uniquement par la réduction du niveau de dégâts sur les parcelles, les flux liés à la décomposition sur site sont fortement diminués (Figure 2.9, page 15). La réduction des impacts apporte donc à elle seule une amélioration importante, permettant de faire passer la filière à un état de stockeuse nette de carbone à partir de 2063 (empreinte finale en 2088 de -0.26 Tg C (IC à 95% : $[-0.83 ; 0.29]$)).

2.2.5.5 Cas du scénario Plantation en augmentation de la récolte

Présentant le bilan carbone en fin de période le plus favorable, ce scénario combine plusieurs évolutions qui contribuent à favoriser plus de stockage que d'émissions (Figure 2.10, page 16). L'exploitation en forêt naturelle s'ajuste à la production des plantations pour arriver à un volume annuel de $200\,000 \text{ m}^3$. Elle produit donc $200\,000 \text{ m}^3$ par an de 2019 à 2049, période pendant laquelle elle présente un bilan net émetteur de carbone, notamment du fait de l'augmentation des volumes exploités qui engendre une augmentation du bois laissé en décomposition sur site. Lorsque les plantations deviennent productives, les surfaces exploitées annuelles diminuent, et la récupération en forêt naturelle amène plus de stockage que les émissions issues de la décomposition et du poste Centrale biomasse additionnées. La forêt naturelle passe en stockage.

L'effet de la récolte du bois énergie est constaté dans le scénario Historique avec valorisation des connexes. Il est intéressant de constater qu'elle a un effet moins important que l'amélioration des impacts par les pratiques EFI-2.

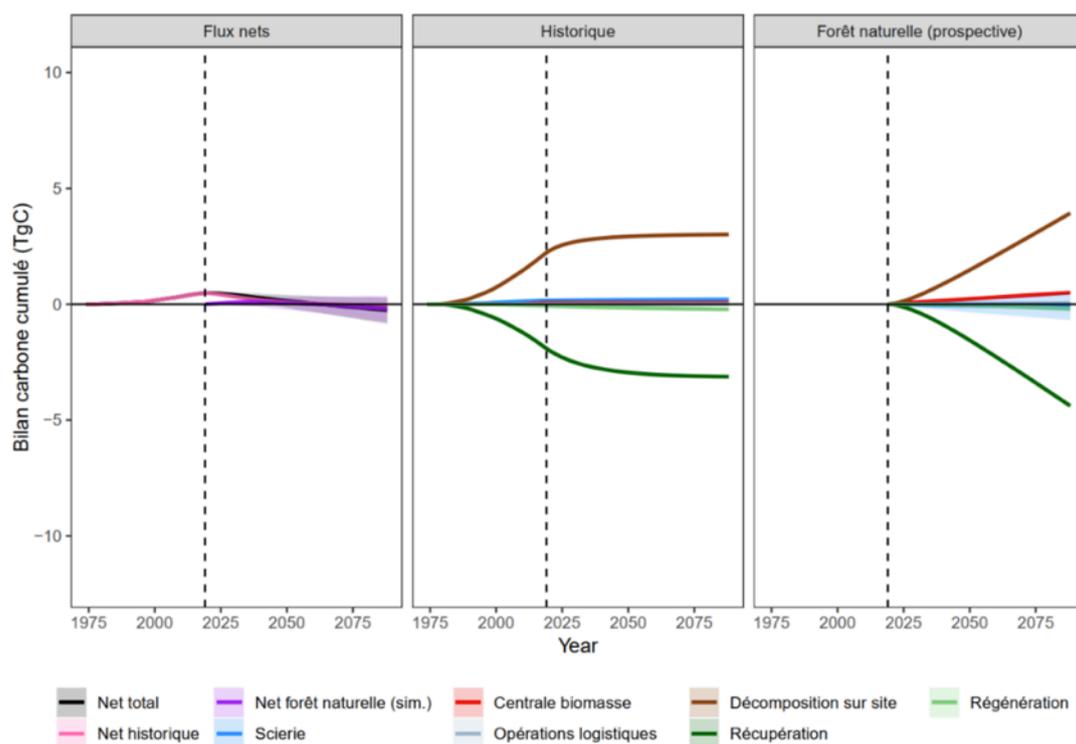


FIGURE 2.9 : Bilan carbone cumulé du scénario Historique avec EFI-2 sur la période 1974-2088 © G. DERROIRE

Les plantations présentent un bilan cumulé émetteur pendant la phase où elles sont improductives. On note tout de même que la tendance de la courbe s'infléchit avant cette date, du fait de la récolte et valorisation de bois lors des épisodes d'éclaircie. Il est intéressant de noter que l'amplitude des valeurs lors de la phase d'émission nette est bien inférieure à celle de la forêt naturelle. Lors de la phase de production des plantations, le carbone stocké, principalement du fait de la croissance des arbres, reste toujours nettement supérieur aux émissions, elles principalement associées à la décomposition sur site et au poste Centrale biomasse, entraînant ainsi un état global de stockage.

2.2.5.6 Les émissions évitées représentent un élément important du bilan carbone de la filière

Il est intéressant de comparer les bilans cumulés à celui du scénario *Arrêt de l'exploitation*, pour lequel la balance devient faiblement négative après 2064. Hormis le scénario Historique, tous conduisent à un bilan où les activités liées à la production de bois entraînent plus de stockage net de carbone que l'arrêt de l'exploitation.

Les émissions évitées représentent un élément important dans le bilan net de la filière. Les modalités sans prise en compte des émissions évitées montrent que dans les cas des scénarios sans plantations, et hors scénario Arrêt, les bilans cumulés restent émetteurs et sur une tendance à l'augmentation continue des émissions nettes. Le scénario Plantation isolée montre que, sans tenir compte des émissions évitées, le bilan des plantations est globalement neutre tant que les parcelles récoltées sont replantées.

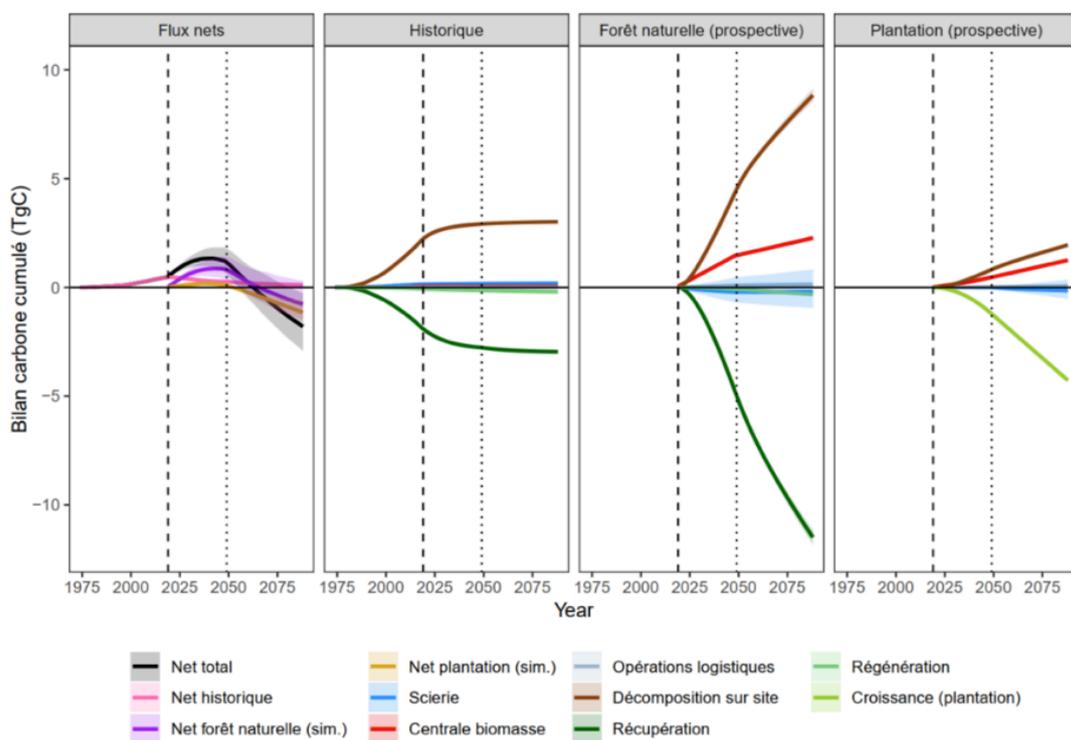


FIGURE 2.10 : Bilan carbone cumulé du scénario Plantation en augmentation de la récolte sur la période 1974-2088 © G. DERROIRE

2.2.6 Conclusions

Le travail de prospective mené ici a permis de simuler le bilan carbone de 8 scénarios alternatifs de développement de la filière bois, et de fournir une vision sur le long terme grâce à une approche dynamique.

D'un point de vue carbone, le scénario Historique est celui qui présente le moins bon bilan en fin de période prospective. Toutes les évolutions de modalités de récolte, isolées ou combinées, permettent de l'améliorer. Le scénario Plantation en augmentation de la récolte, combinant augmentation de la récolte de bois d'œuvre, récolte du bois énergie et développement des plantations en complément de la forêt naturelle, conduit au meilleur bilan. Ce scénario est aussi celui qui entraîne le plus d'émissions carbone dans les premières décennies, celles-ci étant ensuite compensées par la forte capacité de stockage de ce système.

Si l'exercice de scénarisation permet de percevoir très concrètement les résultats d'une voie par rapport aux autres, il est aussi essentiel de s'intéresser aux effets des différentes variables d'évolution. D'une part, les scénarios construits ici ne se veulent pas totalement réalistes (il est par exemple difficilement envisageable de passer d'une année à l'autre d'une production annuelle de 80 000m³ à 200 000m³). D'autre part, ils ne sont pas exhaustifs. Ces premières analyses, complétées par les analyses socio-économiques (cf chapitre Wpt), ont justement pour but de dégager les variables clé et l'intensité de leurs effets pour les ajuster de façon éclairée dans une stratégie de filière.

Les résultats exposés ici sont à analyser en tenant compte des hypothèses et incertitudes sous-jacentes au modèle de bilan carbone. Les hypothèses concernant les émissions évitées et les plantations, ainsi que les préconisations pour renforcer les parties les moins robustes du modèle sont détaillées dans le chapitre WP1. Il est aussi important de rappeler que le modèle est construit pour fournir un bilan émission/stockage de carbone en intégrant les flux de carbone des différents

processus de la production de bois. L'approche ne distingue pas les différents gaz à effet de serre (GES) et leur pouvoir de réchauffement global. La prise en compte des émissions de méthane (qui a un potentiel de réchauffement global 25 fois supérieur à celui du CO₂) avait été identifiée lors des échanges avec les acteurs de la filière comme un point à développer. Les données identifiées sur cet aspect sont cependant peu abondantes, et cette évolution nécessite d'autres études et développements, plus pertinents dans une approche dédiée GES.

Enfin, il est utile de rappeler que le modèle ne peut pas être appliqué dans des perspectives de planification spatialisée. La prise en compte de l'évolution de la localisation des massifs forestiers naturels exploités et zones de plantation demande des développements supplémentaires, à la fois au sein du modèle mais aussi en termes de méthodologie d'analyse prospective, la prise en compte de ces questions nécessitant en effet de raisonner à une échelle plus large, intégrant des facteurs plus nombreux et relevant de problématiques plus générales, du domaine de l'aménagement du territoire (bassins de vie, réseaux, etc).

2.3 Trouver des compromis de développement entre Services Écosystémiques WP3

2.3.1 Responsables

- Camille Piponiot-Laroche, *Université de la Guyane*
- Bruno Hérault, *Cirad*

2.3.2 Contexte

Si l'impact de la déforestation sur les émissions de CO₂ et les pertes de biodiversité en région tropicale ont fait l'objet de nombreuses études, les impacts à long terme de l'exploitation commerciale de bois sur ces forêts restent à ce jour très peu étudiés. Or les enjeux sont grandissants pour ces forêts de production. Non seulement elles doivent alimenter le commerce du bois tropical, et maintenant du bois énergie, mais leur rôle dans le stockage de carbone et dans la préservation de la biodiversité est de plus en plus reconnu.

La notion de services écosystémiques, apparue dans les années 1970, connaît depuis une dizaine d'années un succès croissant, tant auprès de la communauté scientifique que dans les sphères décisionnelles et gestionnaires. Les services écosystémiques sont définis comme étant les bénéfices que les êtres humains tirent du fonctionnement des écosystèmes. L'expression a été forgée dans le champ des sciences biologiques pour mettre en évidence les liens de dépendance de l'humanité vis-à-vis des milieux naturels. Elle a été popularisée dans le rapport Millenium Ecosystem Assessment (2005) et de plus en plus utilisée dans des situations concrètes de gestion. Si le concept de service écosystémique est récent, il peut être mis en rapport avec celui, assez traditionnel dans le monde forestier, de multifonctionnalité. En effet, les forêts ne sont pas censées remplir uniquement une fonction économique (production de bois, de bois-énergie) mais également des fonctions écologiques (maintien de la biodiversité, stockage de carbone...).

Dans ce contexte, l'objectif général du WP3 est d'explorer différents scénarios prospectifs afin d'identifier des compromis entre services écosystémiques (bois d'œuvre, carbone, biodiversité). Le développement d'un cadre méthodologique d'optimisation multicritères permet de combiner des modèles de perte (lors des opérations d'exploitation du bois d'œuvre) et de récupération post-exploitation de services écosystémiques dans les forêts exploitées de Guyane, afin d'explorer un ensemble de scénarios prospectifs pour la production de bois.

2.3.3 Objectifs spécifiques

- Développer un cadre méthodologique pour effectuer une analyse multicritère comparative des scénarios prospectifs
- Identifier les scénarios qui offrent le meilleur compromis entre services écosystémiques (carbone, production de bois, diversité)

- Spatialiser les trajectoires de développement obtenues grâce à des techniques d’optimisation multicritère

2.3.4 Liste des travaux réalisés

- Un modèle de récupération du volume de bois d’œuvre post-exploitation Le modèle a été dans un premier temps calibré avec les données du dispositif de Paracou. Une description complète du modèle a été publiée dans la revue scientifique *Ecological Modelling* [35]. Le modèle a ensuite été calibré à l’échelle de l’Amazonie avec les données du réseau TmFO, et publié dans la revue scientifique *Environmental Research Letters* [36].
- Un cadre méthodologique pour l’optimisation des services écosystémiques (bois d’œuvre, carbone et biodiversité), réalisés dans le cadre d’optimisation multicritères du logiciel Marxan [7]. Ce cadre d’analyse a été utilisé pour l’exploration de 8 scénarios d’exploitation à l’échelle de l’Amazonie. Les résultats ont été publiés dans la revue scientifique *Environmental Research Letters* [37].

2.3.5 Principaux résultats

2.3.5.1 Les modèles de services écosystémiques dans les forêts exploitées

Les trois services écosystémiques optimisés sont (1) les émissions (coût) et la récupération post-exploitation (bénéfice) des stocks de carbone ; (2) la récupération des stocks de bois d’œuvre post-exploitation (bénéfice) ; (3) la perte d’espèces post-exploitation (coût). Le modèle utilisé pour les émissions de carbone est celui développé dans le WP1. Le modèle de récupération de bois d’œuvre a été élaboré dans le cadre de GFCLim et calibré d’abord à partir des données de Paracou [35] puis avec celles de l’ensemble du réseau TmFO-Amazonie [36]. Des cartes de richesse des mammifères et amphibiens [29], deux groupes ayant une grande importance dans le fonctionnement des écosystèmes, ont été utilisées afin de spatialiser la biodiversité pré-exploitation. Les pertes de biodiversité liées à l’exploitation ont ensuite été quantifiées à partir des résultats d’une méta-analyse réalisée à l’échelle pantropicale [11].

2.3.5.2 Cadre méthodologique de l’optimisation multi-critères

La procédure d’optimisation trouve la meilleure configuration spatiale de l’exploitation forestière sélective en Amazonie, sur une grille comprenant l’ensemble des forêts définies comme forêts de production. Pour refléter l’éventail des pratiques d’exploitation forestière actuellement utilisées dans la région, chaque cellule de la grille peut être attribuée à l’un des types d’exploitation forestière suivants : une intensité d’exploitation de 10 (faible), 20 (moyenne) ou 30 (élevée) $m^3.ha^{-1}$, et une durée de cycle de coupe de 15 (courte), 30 (moyenne) ou 65 (longue) années, ou aucune exploitation. L’intensité moyenne et la durée du cycle de coupe correspondent aux pratiques d’exploitation forestière médianes actuelles en Amazonie. L’optimisation cherche à obtenir la configuration spatiale qui maximise une fonction de provision de services écosystémiques (carbone, bois d’œuvre et biodiversité), sous contrainte d’objectifs prédéfinis. Les objectifs prédéfinis comprennent toujours un objectif annuel de production totale de bois d’œuvre : la solution optimale doit inclure suffisamment de zones exploitées pour atteindre l’objectif de production.

2.3.5.3 Elaboration de 8 scénarios prospectifs

Nous avons testé différentes stratégies pour répondre à la future demande de bois en Amazonie : (1) **Bois d’œuvre** : seule la récupération du bois est maximisée pour garantir le maintien des stocks de bois à long terme, (2) **Carbone** : seule le stockage de carbone est maximisé en tant que stratégie d’atténuation du changement climatique, (3) **Biodiversité** : seule la biodiversité est maximisée en tant que stratégie de conservation, (4) **Équilibré** : la récupération du bois d’œuvre, du carbone et la conservation de la biodiversité sont équilibrés dans l’optimisation en tant que stratégie multifonctionnelle, (5) **Cycle de coupe imposé** : les trois services écosystémiques sont équilibrés dans l’optimisation, mais les cycles de coupe sont fixés à 30 ans, (6) **Récupération complète du bois d’œuvre (RCBO)** : priorité équilibrée des services écosystémiques avec une

contrainte supplémentaire : le volume de bois extrait doit être récupéré à la fin du premier cycle de coupe (définition forte de la durabilité de l'exploitation). Dans les scénarios (1)-(6), les forêts de production sont limitées aux zones en dehors des aires protégées, et à moins de 25 km d'une route ou piste (praticable par des camions). Les deux derniers scénarios (7-8) incluent également toutes les zones non protégées, même inaccessibles (sous l'hypothèse d'une ouverture de nouvelles pistes forestières) : (7) **Accessibilité accrue** : priorisation équilibrée des services écosystémiques lorsque toutes les forêts non protégées sont rendues accessibles, et (8) **RCBO + Accessibilité accrue** : priorisation équilibrée des services écosystémiques avec une contrainte de récupération complète du bois d'œuvre lorsque toutes les forêts non protégées sont rendues accessibles.

2.3.5.4 Principal compromis entre production et conservation

Nos résultats révèlent que le principal compromis entre les services écosystémiques considérés dans cette étude est entre un approvisionnement en bois à long terme et la conservation des stocks de carbone et de la biodiversité (Figure 2.11, page 20). Ces résultats s'inscrivent dans le débat plus large sur le partage des terres par opposition à leur préservation, et sur la question de savoir si l'extraction du bois doit se concentrer sur quelques zones intensément exploitées (stratégie appelée dans la littérature anglo saxonne *land sparing*, ou préservation des terres) ou si elle doit se faire à faible intensité sur l'ensemble du paysage (stratégie de *land sharing*, ou partage des terres). Il a été démontré que la stratégie de *land sparing* dans les forêts exploitées crée des paysages hétérogènes qui favorisent des niveaux plus élevés de bêta-diversité et le maintien de la biodiversité à l'échelle du paysage, ce qui corrobore les résultats obtenus dans notre étude. Toutefois, nos résultats montrent que les stratégies de *land sparing* (comme dans le cas des scénarios 2 et 3, qui optimisent respectivement le carbone et la biodiversité) entraînent une faible récupération des stocks de bois d'œuvre. Il n'existe donc pas de stratégie optimale pour assurer un maintien des stocks de bois d'œuvre sur le long terme tout en préservant les stocks de carbone et la biodiversité animale dans les forêts de production.

2.3.5.5 Imposer des intensités et cycles d'exploitation intermédiaires donne des résultats sous-optimaux

Les réglementations actuelles en matière d'exploitation forestière (par exemple, le cycle de coupe maximum de 35 ans en Amazonie brésilienne et de 65 ans en Guyane française) ont été considérées comme un compromis entre la production d'une quantité suffisante de bois pour générer des bénéfices financiers et le fait de laisser la forêt se reconstituer suffisamment longtemps pour rendre l'exploitation forestière durable. Plusieurs études ont montré que ces règles d'exploitation ne sont pas suffisantes pour récupérer les caractéristiques des forêts avant l'abattage. De plus, nos résultats montrent que les réglementations actuelles (par exemple, l'imposition de cycles de coupe fixes et nationaux, similaires à la stratégie 5 - Cycle de coupe imposé) augmentent la perte de tous les ES et conduisent à une gestion sous-optimale. La stratégie standard souvent préconisée pour le maintien des stocks de bois dans les forêts tropicales consiste à modifier les réglementations nationales de manière à ce que les cycles de coupe soient plus longs et les intensités d'exploitation plus faibles, mais ces recommandations peuvent entraîner une augmentation significative des surfaces forestières totales exploitées pour compenser la réduction du bois extrait par ha et par an.

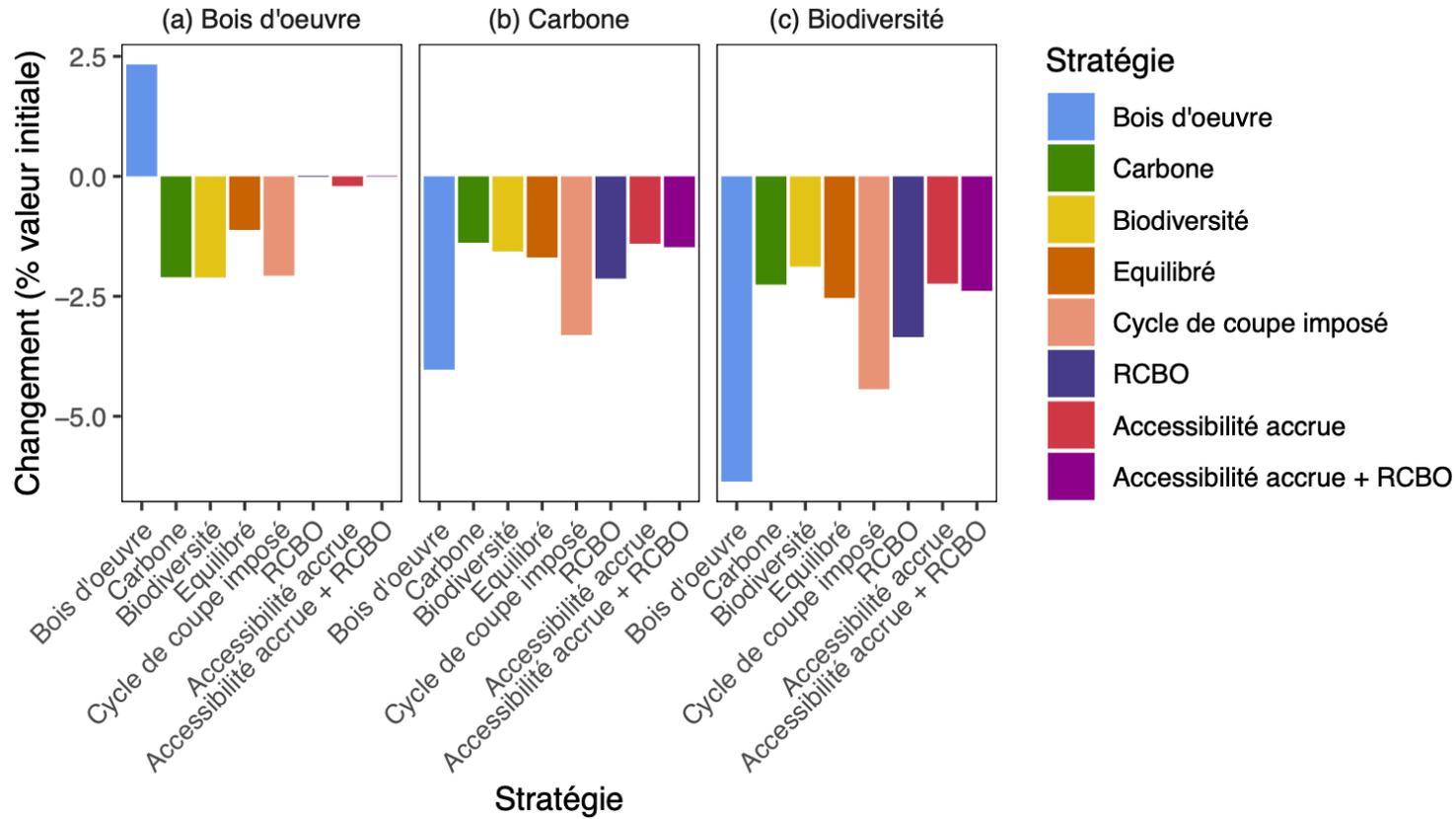


FIGURE 2.11 : Coût en services écosystémiques des 8 scénarios prospectifs étudiés © C. PIPONIOT

2.3.6 Conclusions

Le sort des forêts de production amazoniennes dépend donc des choix politiques et de la future demande sociétale en services écosystémiques. Si l'objectif est de maintenir à long terme l'approvisionnement en bois des forêts naturelles de production, alors l'exploitation forestière à faible intensité devrait être préférée et appliquée dans la majeure partie des forêts de production guyanaises. Il est important de noter, cependant, que nous n'avons pas intégré la rentabilité économique dans les étapes d'optimisation. Les coûts économiques liés à la construction de routes et au transport des grumes sur de plus longues distances pourraient désavantager des stratégies de land sharing, ou partage des terres. De plus, dans la mesure où les pistes d'exploitation forestière rendent les forêts vulnérables aux incendies, à la chasse, et autres perturbations anthropiques, la dégradation incontrôlée des forêts dans les nouvelles forêts de production pourrait augmenter les coûts environnementaux des stratégies de land sharing, ou partage des terres.

En revanche, si les objectifs de maintien des stocks de carbone et de la biodiversité des forêts deviennent primordiaux dans la gestion des forêts de production guyanaises, les gestionnaires devraient se concentrer sur la conservation des forêts intactes dans le domaine forestier permanent, tout en permettant une exploitation forestière intensive dans les bassins ayant déjà été exploités. L'exploitation forestière intensive entraînera une forte diminution des ressources en bois dans les zones surexploitées. Cette stratégie devrait donc s'accompagner d'autres sources d'approvisionnement de bois d'œuvre, telles que la production en plantation décrite dans le modèle du WP1 et les scénarios du WP2.

Parmi les perspectives qui restent à explorer pour l'optimisation des services écosystémiques dans les forêts de production guyanaises, nous pouvons citer :

- Une amélioration du modèle de biodiversité (en intégrant par exemple les changements de biodiversité floristiques après exploitation)
- Un modèle de récupération du volume de bois d'œuvre calibré à une échelle spatiale plus fine avec des données de parcelles guyanaises, afin de pouvoir avoir une optimisation spatiale adaptée à l'échelle du DFP guyanais
- Intégrer d'autres services écosystémiques dans l'optimisation (par exemple l'érosion des sols), et les coûts financiers de l'exploitation (par exemple en ajoutant une contrainte de rentabilité de l'exploitation),
- Intégrer les plantations dans l'optimisation,
- Calibrer les modèles de services écosystémiques sur plusieurs cycles de coupe (pour l'instant, faute de données, les prédictions sont limitées au premier cycle uniquement)

3. Adapter la production de bois aux changements climatiques

3.1 Tester la vulnérabilité démographique des essences commerciales WP4

3.1.1 Responsables

- Loïc Louison, *Université de la Guyane*
- Stéphane Traissac, *AgroParistech*

3.1.2 Contexte

La vulnérabilité démographique est définie comme l'incapacité d'une espèce donnée à assurer le maintien de sa population d'arbres. Cette incapacité peut avoir plusieurs causes dont un déficit de croissance de l'espèce et/ou une surmortalité massive en périodes de stress hydrique. Nous sommes actuellement en mesure de pouvoir tester la vulnérabilité démographique des 16 essences commerciales prioritaires au stress hydrique grâce à la profondeur historique des jeux de données consolidés en Guyane depuis 30 ans. Ce WP s'appuiera donc fortement sur des données inter-annuelles de dynamique (naturelle et post-exploitation) forestière acquise depuis 30 ans en Guyane qui seront couplées aux données météo (propriété de MétéoFrance, mise à disposition de l'UMR EcoFoG par l'intermédiaire de l'INRAE). Une pré-analyse, restreinte aux données de Paracou, a été engagé en 2014-2015 pour tester les potentialités de la méthode envisagée (Figure 3.1 , page 23).

3.1.3 Objectifs spécifiques

- Etendre les résultats obtenus sur Paracou à l'ensemble du réseau Guyafor
- Identifier, par essence commerciale, les processus démographiques sensibles au stress hydrique dans les forêts exploitées
- Classer les espèces selon leur degré de vulnérabilité démographique au stress hydrique

3.1.4 Liste des travaux réalisés

3.1.4.1 Acquisition de données

La majorité des travaux portant sur l'acquisition de données et l'adaptation des méthodes aux données du réseau Guyafor a pu être réalisé, à savoir :

- Ré-inventaires des parcelles du réseau Guyafor dont des parcelles exploitées, soit environ 1.8 millions de mesures :
 - Paracou : 3 campagnes sur 15 parcelles ;
 - Arbocel : 1 campagne sur 1 parcelle ;
 - Manaré : 1 campagne 2 parcelles ;
 - Risquetout : 1 campagne sur 4 parcelles.
- soit environ 1.8 millions de mesures.

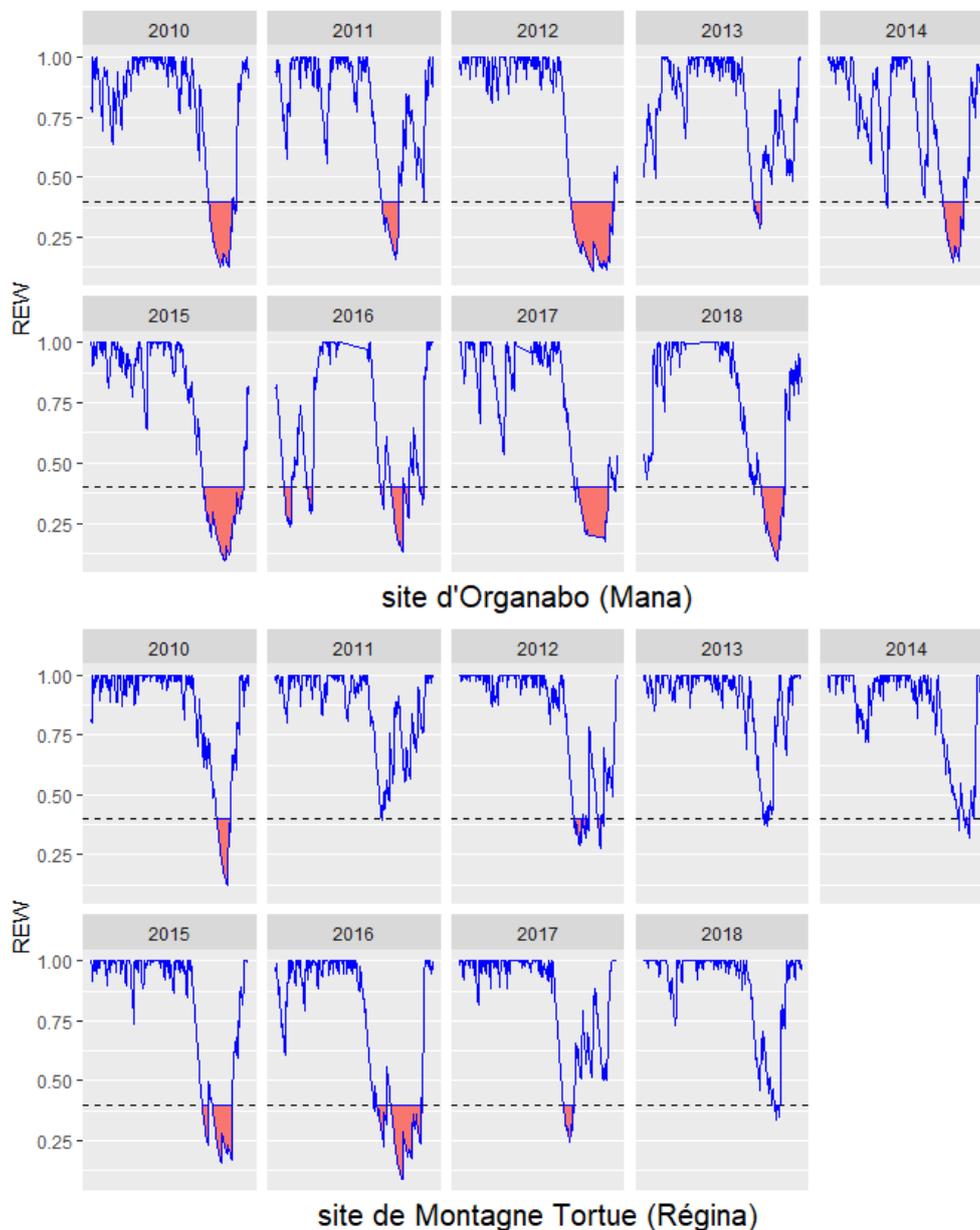


FIGURE 3.1 : Indices REW journaliers sur deux sites du réseau Guyafor. Ligne bleue REW journalier ; ligne pointillée : seuil REW = 0.4, Aire en rouge : indices de stress hydrique calculés sur une année calendaire © S. TRAISSAC

- Déterminations botaniques sur l'ensemble du réseau en dehors du site de Paracou (cf. Figure 3.1 , page 23)
- Adaptation du modèle de F. Wagner [44] pour une utilisation sur des données climatiques extérieures au site de Paracou
- Construction d'un modèle joint croissance et mortalité, multi-spécifique et multi-site.

A cause de la disparité des données démographiques, fréquence d'inventaire et/ou taille des parcelles, le modèle joint, a nécessité un travail important d'homogénéisation. Par ailleurs, le modèle

initial créé sur les données du site de Paracou, a dû être complexifié, notamment par l'ajout d'effets aléatoires permettant la prise en compte des 16 espèces et de tous les sites par un même modèle.

3.1.4.2 Modélisation

On considère les indices et variables suivantes :

- a) L'entier $j \in \{1, 16\}$ correspond à la $j^{\text{ème}}$ espèce commerciale dans l'ensemble des 16 espèces commerciales sur l'ensemble du réseau GuayFor.
- b) L'entier i_j correspond à l'individu i de la $j^{\text{ème}}$ espèce commerciale.
- c) L'entier t est le temps et correspond à une date d'inventaire sur un site donné prise dans l'intervalle $[t - 1, t]$.
- d) L'entier s correspond a un site dans le réseau guyafor.

Le modèle joint est constitué d'un modèle de mortalité et d'un modèle de croissance :

- 1) Modèle de mortalité :

$$\begin{aligned}
p_{i_j,t} = & \text{logit}^{-1} \left((\theta_{m_0} + \mathcal{P}_{j_{m_0}}) + \theta_{m_1} \times \log \left(\frac{\widehat{AGR}_{i_j,t-1} + 1}{\widehat{AGR}_{i_j,t-1} + 1} \right) \right. \\
& + \theta_{m_2} \times \frac{DBH_{i_j,t}}{DBH_{max_j}} + \theta_{m_3} \times \left(\frac{DBH_{i_j,t}}{DBH_{max_j}} \right)^2 + (\theta_{m_4} + \mathcal{P}_{j_{m_4}}) \times Water_t \\
& \left. + (\theta_{m_5} + \mathcal{P}_{j_{m_5}}) \times ABGL_{i_j} + (\theta_{m_6} + \mathcal{P}_{j_{m_6}}) \times Water_t \times ABGL_{i_j} \right) \quad (3.1)
\end{aligned}$$

avec $\mathcal{P}_{j_{m_k}} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_k)$ où $k = 0, 4, 5, 6$.

Le terme $p_{i_j,t}$ correspond à la probabilité de décès de l'individu i de l'espèce j au temps t .

La variable $\mathcal{P}_{j_{m_k}}$ est un effet aléatoire mis sur la $j^{\text{ème}}$ espèce commerciale dans le modèle de mortalité où $k = 0, 4, 5, 6$.

Le terme $\theta_{m_1} \times \log \left(\frac{\widehat{AGR}_{i_j,t-1} + 1}{\widehat{AGR}_{i_j,t-1} + 1} \right)$ correspond à la vigueur.

- 2) Modèle de croissance :

$$\begin{aligned}
\log(\widehat{AGR}_{i_j,t} + 1) = & \left((\theta_{c_0} + \mathcal{G}_{j_{c_1}}) + \theta_{c_1} \times DBH_{max_j} + ((\theta_{c_2} + \mathcal{G}_{j_{c_2}}) \times Water_t \right. \\
& \left. + (\theta_{c_3} + \mathcal{G}_{j_{c_3}}) \times ABGL_{i_j} + (\theta_{c_4} + \mathcal{G}_{j_{c_4}}) \times Water_t \times ABGL_{i_j} \right) \\
& \times e^{\left(-\frac{1}{2} \left[\log \left(\frac{DBH_{i_j,t-2}}{\theta_{c_5} \times DBH_{max_j,s}} \right) / (\theta_{c_6} \times WD_j) \right]^2 \right)} \quad (3.2)
\end{aligned}$$

où

$$\log(AGR_{i,t} + 1) = \log(\widehat{AGR}_{i,t} + 1) + \varepsilon_{i_{j_s}}$$

avec $\mathcal{G}_{j_{c_k}} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_k)$ où $k = 1$ à 4.

Le réel $p_{i,t}$ correspond à la probabilité de mourir entre $t - 1$ et t .

La variable $Water_t$ correspond au stress hydrique subit par l'arbre au temps t ; son échelle de calcul spatiale est le site avec une variabilité temporelle (indice annuel moyen calculé entre deux dates d'inventaires).

La variable $ABGL_{i_j}$ correspond à la perte de biomasse de la parcelle (échelle de calcul) contenant l'individu i de la $j^{\text{ème}}$ espèce commerciale, due à l'exploitation forestière. Elle comprend les arbres retirés de la forêt et les arbres décédés pendant et juste après l'exploitation. Cette variable n'a pas de variabilité temporelle.

La variable $\mathcal{G}_{j_{c_k}}$ est un effet aléatoire mis sur la $j_{c_k}^{\text{ème}}$ espèce commerciale dans le modèle de croissance où k va de 1 à 4.

La variable WD_j est la densité du bois de l'espèce.

La variable $DBHmax$ est le diamètre maximum (en pratique le percentile à 95 %) atteint par l'espèce sur un site donné. Cette variable n'a pas de variabilité temporelle. Si le nombre d'individus sur le site est trop faible on attribut le $DBHmax$ sur l'ensemble du dispositif Guyafor.

Nous avons utilisé des techniques d'inférence bayésienne (maximisation de la vraisemblance du modèle) pour déterminer les paramètres θ de chaque variable.

3.1.5 Principaux résultats

Les routines de calcul réalisées sur ce WP sont en accès libre sur un compte GitHub® : <https://github.com/EcoFoG/GFClimWP4>

3.1.5.1 Calcul d'un indice de stress hydrique pour chacun des sites du réseau Guyafor

A partir de données pluviométrie et de données sur des caractéristiques physiques du sol et de son fonctionnement hydrique, il est possible de calculer un indice journalier de disponibilité en eau du sol pour les arbres : le REW (Relative Extractable Water [44]). Un REW de valeur 1 correspond à une disponibilité maximale, une valeur de 0 à une absence totale de disponibilité en eau. En dessous d'un REW de 0.4 on considère que les arbres souffrent de stress hydrique. Les données météo à notre disposition et le travail sur l'adaptation de l'algorithme de F. Wagner a permis de calculer un indice journalier REW pour chacun des sites de Guyafor (Figure 3.1, page 23).

A partir d'indice REW journalier, il est possible de construire un indice de stress hydrique sur des durées supra-journalières (semaine, mois, années) en sommant, uniquement pour les journées avec un REW inférieur à 0.4, les écarts entre le REW observé et le seuil de 0.4. Sur un graphique montrant l'évolution journalière du REW, cet indice correspond à l'aire rouge sous la droite REW=0.4 [4, 5, 6, 19] (Figure 3.1, page 23).

Le diamètre maximum ($DBHmax$) utilisé dans le modèle est le percentile à 95 %. Pour certaines espèces la variabilité régionale est importante (Figure 3.2, page 26).

Pour calculer la variable AGBL, il faut disposer idéalement d'un inventaire pré- et post-exploitation forestière, ou de données permettant d'estimer la biomasse avant exploitation. Si un bon nombre de sites du réseau Guyafor possède effectivement des parcelles exploitées, seulement trois d'entre eux, dont le site de Paracou, ont un réel inventaire pré-exploitation. L'exploration des données annexes à notre disposition n'a pas réellement permis de d'estimer une biomasse pré-exploitation sur d'autres sites. L'analyse concernant l'exploitation s'est donc faite sur une base de donnée réduite.

3.1.5.2 Résultats sur la vulnérabilité démographique des espèces étudiées

Les résultats obtenus pour toutes espèces confondues, montre qu'il existe une vulnérabilité générale au stress hydrique pour la croissance, qui est plus faible lorsque le stress hydrique augmente. Par contre le résultat moyen pour la mortalité est contre-intuitif. En effet lorsque le stress hydrique augmente la probabilité de mourir baisse significativement. Des études précédentes [5] avaient trouvé des résultats similaires. Une explication est que la mortalité par chablis des arbres serait diminuée en cas de faibles précipitations. Si on exclu de l'analyse les arbres morts par chablis, il apparaît que le stress hydrique augmente significativement la mortalité des arbres (mortalité dite "sur pied").

Ces résultats généraux varient peu lorsque l'on fait une analyse espèce par espèce. La figure 3.3 page 27 présente la valeur des paramètres spécifiques de vulnérabilité sur modèle de croissance et de mortalité. Les axes du graphique représentent les impacts nuls et délimitent quatre zones dans le graphe. Toutes les espèces se situent dans la même partie du graphe, Partie D : espèces sensibles au stress hydrique pour la croissance uniquement

Pour la croissance, seulement deux espèces ne sont pas significativement vulnérables (au seuil de 5%). En effet, les intervalles de confiance des paramètres, représentés par les traits, incluent

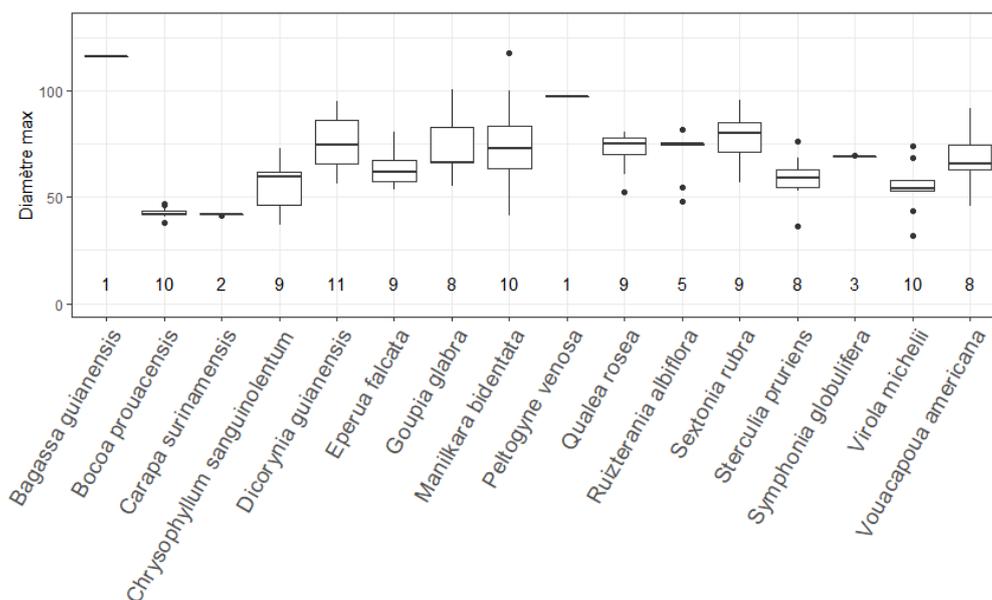


FIGURE 3.2 : Valeurs et amplitudes de DBHmax pour chaque espèce. Les nombres correspondent aux nombres de sites sur lesquels le calcul a été possible © S. TRAISSAC

le 0 (recouvrement avec les axes des impacts nuls), comme par exemple pour le Gonfolo gris (*Ruizterania albiflora*). Ce résultats est en partie lié à l'amplitude de l'intervalle de confiance pour ces deux espèces, dû à la faible représentation de ces deux espèces dans notre jeu de données.

Pour la mortalité, les seules différences entre espèces portent également sur la non significativité des résultats qui concerne davantage d'espèces dont le Carapa (*Carapa procera*). Le tableau, ci-dessous (Figure 3.4, page 28) détaille ces résultats.

3.1.5.3 Classement des espèces selon leur vulnérabilité démographique au stress hydrique

Les tableaux ci-dessous (Figure 3.4, page 28) classent les espèces selon leur sensibilité au stress hydrique. Pour les espèces en rouge la vulnérabilité est significative. Les espèces en vert seraient avantagé par les périodes plus sèches, qui, par exemple, réduiraient l'engorgement des sols. Si on combine les deux processus démographiques, les espèces les plus tolérantes sont le Gonfolo gris et le Wapa (*Eperua falcata*). La Bagasse (*Bagassa guianensis*), le Goupi (*Goupia glabra*) et le Carapa sont les espèces qui paraissent les plus sensibles notamment pour la croissance.

3.1.5.4 Autres résultats

De la même manière que pour l'effet du stress hydrique, nous avons pu étudier la vulnérabilité des espèces à l'exploitation, en terme de la croissance et de mortalité.

Si on exclue les années qui suivent l'exploitation forestière, pendant lesquelles s'exprime la mortalité liée aux dégâts d'exploitation, il apparait qu'une exploitation, au delà de 4-5 ans, n'a globalement pas d'effet significatif sur la probabilité de mortalité. La tendance globale va même vers une baisse de la mortalité avec l'exploitation. Par espèce, il n'y a pas non plus de résultats significatifs, même si on peut noter que pour trois espèces, dont le Grignon (*Sextonia rubra*) et le Carapa, on a une tendance à l'augmentation de la mortalité avec l'exploitation. Pour la croissance on observe un effet positif de l'exploitation : les trois quart des espèces améliorent significativement leur

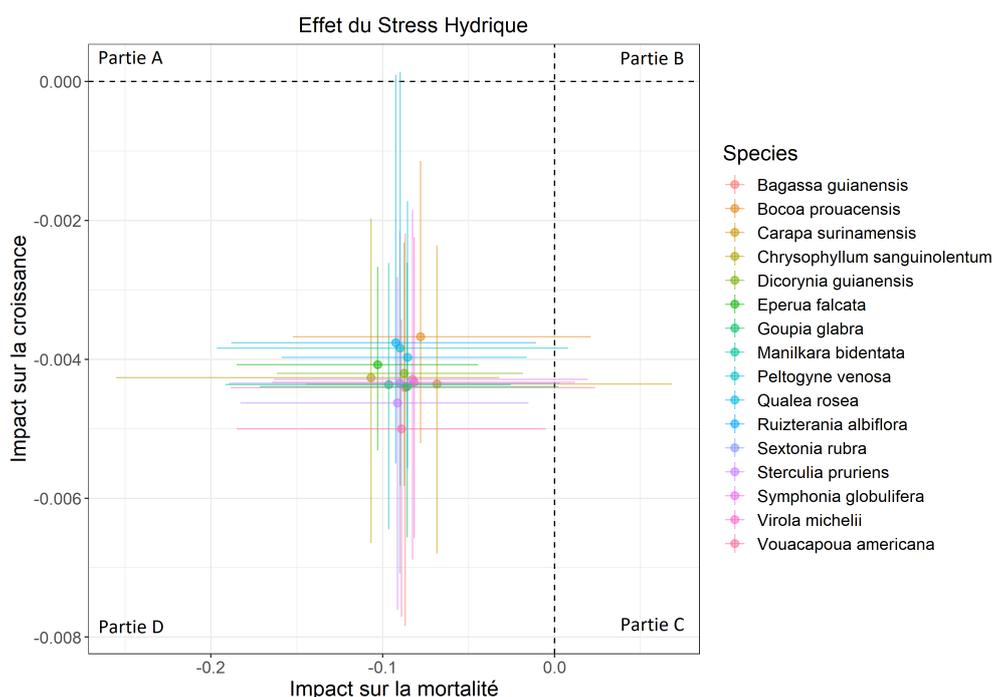


FIGURE 3.3 : Vulnérabilité démographique des 16 espèces étudiées. Traits pointillés : axes d'impact nul ; Points : médiane du paramètre pour chaque espèce ; Traits : amplitude des paramètres entre les percentiles à 2.5 et 97.5 % ; Partie A, B, C, et D, zones du graphe délimitées par les deux axes d'impact nul, Partie A : espèces insensibles au stress hydrique pour les deux processus, Partie B : espèces sensibles pour la mortalité, Partie C : espèces sensibles pour les deux processus, Partie D : espèces sensibles uniquement pour la croissance. © S. TRAISSAC

croissance après exploitation, notamment le Gonfolo rose (*Qualea rosea*), le Grignon ou le Gonfolo gris.

L'interaction entre le facteur de stress hydrique et l'exploitation, n'est pas significatif pour le processus de mortalité, c'est à dire qu'il n'y a pas d'effet conjugué des deux facteurs. Cependant le signe du paramètre d'interaction varie entre espèces ainsi que le signe et la valeur relative des paramètres de chaque facteurs, ce qui donne différents "patron" d'effets combinés du stress hydrique et de l'exploitation sur la mortalité (Figure 3.5, page 28) :

- pour la plupart des espèces comme l'Angélique, la probabilité de mort diminue avec l'augmentation des deux facteurs et inversement.
- pour le Carapa et le Grignon la probabilité est minimale pour un stress hydrique fort et une exploitation faible et maximale pour une forte exploitation et un stress hydrique faible.
- le Kobe (*Sterculia pruriens*) est un cas particulier du patron 2 : l'augmentation de la mortalité avec l'exploitation disparaît pour de fort stress hydrique.
- le Gonfolo rose est un cas unique : la probabilité de mort est maximale si exploitation et stress hydrique sont conjointement maximum ou minimum. Inversement la probabilité de mort est plus faible si l'un des facteurs est maximum et l'autre minimum.

Pour le processus de croissance le paramètre d'interaction, tout individu confondu, est significativement négatif : l'accroissement sera plus important si un des deux facteurs est élevé et l'autre faible ou inexistant. Le calcul des patron des effets combinés des deux facteurs montre que cet effet de l'interaction est relativement faible. Comme on pouvait le prévoir aux vues des résultats précé-

Mortalité		Croissance	
Espèces	Valeur du paramètre	Espèces	Valeur du paramètre
Carapa surinamensis	-0.068	Vouacapoua americana	-0.0050
Bocoa prouacensis	-0.078	Sterculia pruriens	-0.0046
Virola michelii	-0.082	Bagassa guianensis	-0.0044
Symphonia globulifera	-0.083	Goupia glabra	-0.0044
Qualea rosea	-0.086	Manilkara bidentata	-0.0044
Goupia glabra	-0.086	Carapa surinamensis	-0.0044
Bagassa guianensis	-0.087	Sextonia rubra	-0.0043
Dicorynia guianensis	-0.088	Virola michelii	-0.0043
Vouacapoua americana	-0.089	Symphonia globulifera	-0.0043
Peltogyne venosa	-0.090	Chrysophyllum sanguinolentum	-0.0043
Sextonia rubra	-0.090	Dicorynia guianensis	-0.0042
Sterculia pruriens	-0.091	Eperua falcata	-0.0041
Ruizterania albiflora	-0.092	Qualea rosea	-0.0040
Manilkara bidentata	-0.096	Peltogyne venosa	-0.0038
Eperua falcata	-0.103	Ruizterania albiflora	-0.0038
Chrysophyllum sanguinolentum	-0.107	Bocoa prouacensis	-0.0037
Toute espèce confondue	-0.0886	Toute espèce confondue	-0.00425

FIGURE 3.4 : Vulnérabilité sur la mortalité et la croissance © S. TRAISSAC

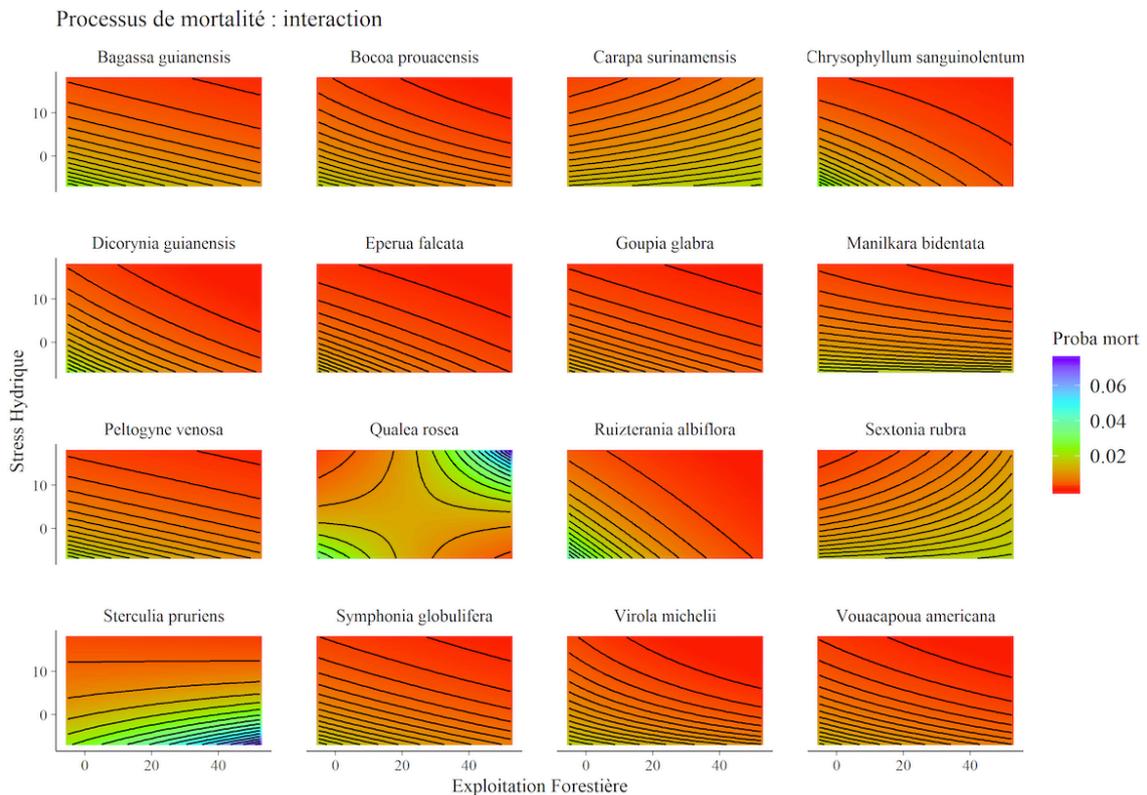


FIGURE 3.5 : Effet conjoint de l'exploitation forestière et du stress hydrique sur le risque de mortalité © S. TRAISSAC

dents ; l'accroissement sera maximum pour peu de stress hydrique et une exploitation importante, et minimal dans le cas inverse. L'ensemble des espèces suit ce même patron.

3.1.6 Conclusions

- La croissance des individus étudiés est ralentie lorsque le stress hydrique augmente, par contre, de manière contre-intuitive, la mortalité générale baisse en cas de stress. De manière plus détaillée, l'absence de pluviométrie fait diminuer la mortalité par chablis et augmente la mortalité sur pied des espèces étudiées.
- Les résultats par espèce ne nuancent pas ces conclusions générales. L'exploitation forestière augmente la croissance des arbres et ce qui induit des interactions avec les effets du stress hydrique sur le processus de croissance. Si on exclue de l'analyse les morts liée directement aux opérations d'exploitation, on ne trouve pas d'effet à long terme de l'exploitation sur la mortalité.
- Il ne se dégage pas clairement un groupe d'espèces qui serait à la fois adapté au stress hydrique et à l'impact de l'exploitation forestière, aux vues des données à notre disposition.

3.2 Tester la vulnérabilité écophysiological des essences commerciales WP5

3.2.1 Responsables

- Sabrina Coste, *Université de la Guyane*
- Maguy Dulormne, *Université des Antilles*

3.2.2 Contexte

La compréhension des mécanismes impliqués dans la résistance à la sécheresse (c.à.d. la capacité de survivre à la dessiccation tout en minimisant la réduction de la croissance) des espèces d'arbre de FTH guyanaise constitue une étape importante pour améliorer les prévisions par les modèles des impacts du changement global sur la diversité forestière. Cette compréhension est d'autant plus nécessaire qu'elle permettrait d'identifier des "proxys" simples pour évaluer la résistance à la sécheresse d'un grand nombre d'espèces d'arbres. Plusieurs mécanismes ont été suggérés pour expliquer la résistance à la sécheresse. Ainsi, certaines espèces sont capables d'éviter les effets des sécheresses, d'autres sont capables de tolérer les conséquences physiologiques d'une forte diminution de disponibilité en eau dans le sol [15]. La perte de conductivité hydraulique induite par la sécheresse conduit à une défaillance hydraulique qui joue un rôle important dans la mortalité des arbres [1]. Cette vulnérabilité hydraulique peut être estimée à travers la mesure du P50, potentiel hydrique pour le lequel on observe une perte de 50% de conductivité hydraulique. Ce trait mécaniste possède un fort pouvoir prédictif de la survie et la distribution des espèces végétales [42, 2, 10]. Néanmoins si certaines espèces sont résistantes à l'embolie, d'autres peuvent avoir une stratégie d'évitement en évitant d'atteindre des potentiels hydriques trop négatifs, par exemple en s'enracinant profondément ou fermant leurs stomates précocement. Le potentiel hydrique au point de perte de turgescence cellulaire (π_{TLP} , MPa) est un trait facilement mesurable et souvent considéré comme un bon proxy du point de fermeture stomatique.

3.2.3 Objectifs spécifiques

- Identifier les traits écophysiological clés dans la résistance des espèces à la sécheresse, en attachant une importance particulière à :
 - la résistance des tiges à la cavitation (approches anatomiques et hydrauliques)
 - la résistance des feuilles à la dessiccation
- Classer les essences selon leur vulnérabilité à la sécheresse.

3.2.4 Liste des travaux réalisés

La vulnérabilité au stress hydrique des espèces d'arbres de FTH guyanaises a été appréhendée à l'aide des mesures de traits physiologiques, morphologiques et anatomiques des feuilles et des tiges. Ces mesures ont été réalisées au cours de différentes campagnes en saison sèche et saison des pluies des années 2017 et 2018 sur 2 sites pilotes en Guyane (Bafog, Paracou) qui présentent (i) des parcelles forestières naturelles (réseau Guyafor), (ii) un fort gradient de précipitations (2527 mm à Bafog, 3102 mm à Paracou) et (iii) des stations micro-météorologiques in situ dont des sondes enregistrant en continu l'humidité du sol de 0 à 220 cm de profondeur (réseau Climfor). Sur le site de Paracou, 30 espèces d'arbres de canopée dont 9 essences commerciales ont été mesurées. Sur le site du Bafog, seuls les traits foliaires ont été mesurés, sur 16 espèces d'arbres dont 9 essences commerciales. Certaines espèces cibles n'étaient pas présentes (ou trop rares) sur les parcelles échantillonnées des dispositifs, d'autres n'ont pas pu être mesurées pour la vulnérabilité à la l'embolie des tiges (les mesures n'ont pas fonctionné ou la morphologie des branches étaient incompatibles avec la technique de mesure utilisée). Les principaux traits mesurés sont présentés en Figure 3.6 page 30.

Vulnérabilité hydraulique

Ψ_{pd} (MPa)	Potentiel hydrique de base (proxy du potentiel du sol dans la zone racinaire)
Ψ_{min} (MPa)	Potentiel hydrique minimum (c.à.d. potentiel le plus négatif atteint en saison sèche)
P_{50} (MPa)	Potentiel hydrique à 50% de perte de conductance du xylème (c.à.d. vulnérabilité à l'embolie du xylème)
HSM (MPa)	Marge de sécurité hydraulique ($HSM = \Psi_{min} - P_{50}$)

Vulnérabilité des feuilles à la dessiccation

π_{TLP} (MPa)	Potentiel au point de perte de turgescence cellulaire
$\delta^{13}C$ (‰)	Composition isotopique en ^{13}C foliaire (proxy de l'efficacité de l'utilisation de l'eau)
g_{min} (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Conductance foliaire minimum (c.à.d. conductance de la feuille pour la vapeur d'eau une fois les stomates fermés)
RWC (%)	Teneur en eau relative des feuilles

Anatomie du bois

MVL (cm)	Longueur maximale des vaisseaux du xylème
WSG (g cm⁻³)	Infradensité du bois
Structure des vaisseaux	5 traits (voir Levionnois et al. soumis)
Ultrastructure des ponctuations	6 traits (voir Levionnois et al. soumis)

FIGURE 3.6 : Liste des principaux traits mesurés dans le cadre du projet GFCLim. Les traits présentés dans la partie résultats sont indiqués en gras. © S. COSTE

3.2.5 Principaux résultats

3.2.5.1 Vulnérabilité des espèces à la défaillance hydraulique des tiges

Notre étude menée sur 25 espèces d'arbre de canopée a montré une grande variabilité de la vulnérabilité des tiges à l'embolie du xylème, avec des valeurs de P50 (c.à.d. potentiel hydrique à 50% de perte de conductance du xylème) allant de -1.86 to -7.63 MPa. La valeur moyenne à l'échelle de la communauté est beaucoup plus négative (-3.93 ± 0.31 MPa, c.-à-d. ces arbres sont plus résistants) que celles déjà observées chez les arbres tropicaux [45]. Les 9 essences commerciales étudiées couvrent une large gamme de P50 : trois sont plus vulnérables à l'embolie que la moyenne (P50 > -2.5 MPa) et trois sont peu vulnérables (P50 < -4.5MPa ; Figure 3.7, page 31).

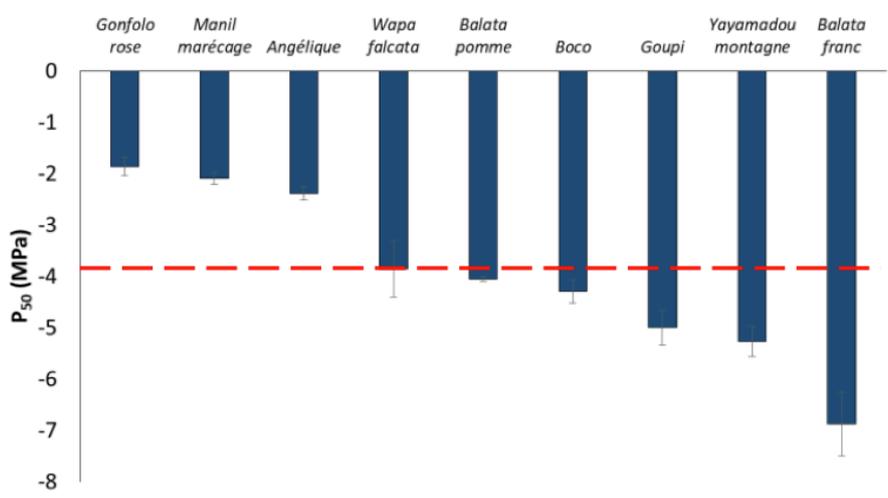


FIGURE 3.7 : Vulnérabilité des branches à l'embolie du xylème des essences d'intérêt commercial. Moyenne des potentiels hydriques à 50% de perte de conductance des branches (P50, MPa). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. En rouge est représentée la valeur moyenne de P50 sur l'ensemble des 25 espèces étudiées sur le site de Paracou (Moy P50 = -3.93 ± 0.31 MPa) © C. ZIEGLER

Les marges de sécurité hydrauliques (HSM, MPa), calculées par la différence entre le potentiel hydrique minimum mesuré en saison sèche (ϕ_{min}) et le P50, sont systématiquement positives (de 6.73 MPa pour la plus résistante à 0.33 MPa pour la plus vulnérable). En moyenne les 9 essences commerciales ont une HSM de 2.65 ± 0.6 MPa (Figure 3.8, page 32). Pendant une saison sèche d'intensité *normale*, aucune espèce ne présente d'embolie et donc aucune perte de conductance hydraulique dans les branches. Néanmoins, les 3 espèces avec les HSM les plus faibles (Manil marécage, Angélique et Gonfolo rose) présentent potentiellement un risque d'embolie lors d'une saison sèche d'intensité plus marquée (Figure 3.8, page 32).

3.2.5.2 Déterminants anatomiques de la vulnérabilité à l'embolie du xylème

Les travaux menés dans le cadre de l'approche anatomique, ont montré que la densité du bois (WSG) n'était pas un bon prédicteur de la vulnérabilité des tiges à l'embolie (P50). Le diamètre des vaisseaux du xylème ainsi que leur indice de regroupement et l'ultrastructure des ponctuations du xylème sont tous significativement corrélés au P50, mais leur pouvoir prédicteur est faible. L'ultrastructure des membranes des ponctuations et plus particulièrement le rapport épaisseur/surface des membranes est le meilleur prédicteur du P50 (Figure 3.9, page 32).

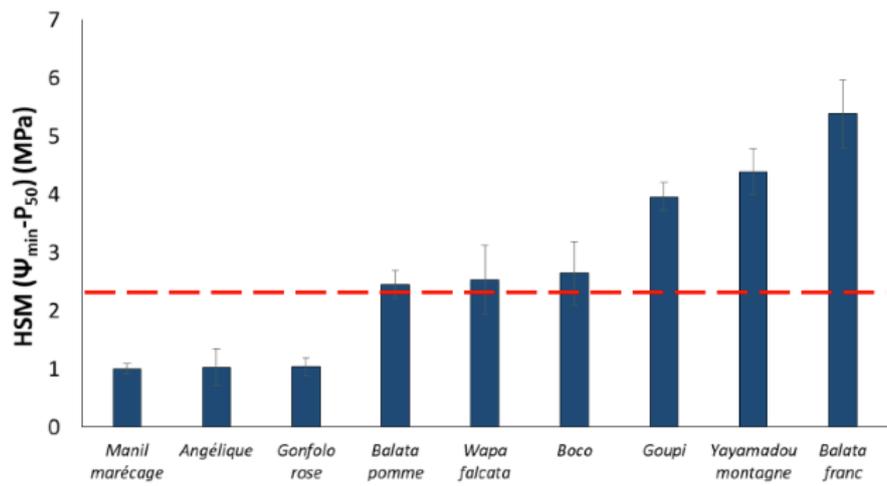


FIGURE 3.8 : Marges de sécurité hydraulique des essences d'intérêt commercial. Moyenne des marges de sécurité hydraulique (HSM, MPa) calculée comme la différence entre le Potentiel minimum mesuré en saison sèche (ϕ_{min}) et le P_{50} . Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. En rouge la moyenne sur l'ensemble des espèces étudiées (moy HSM= 2.37 \pm 0.35 MPa) © C. ZIEGLER

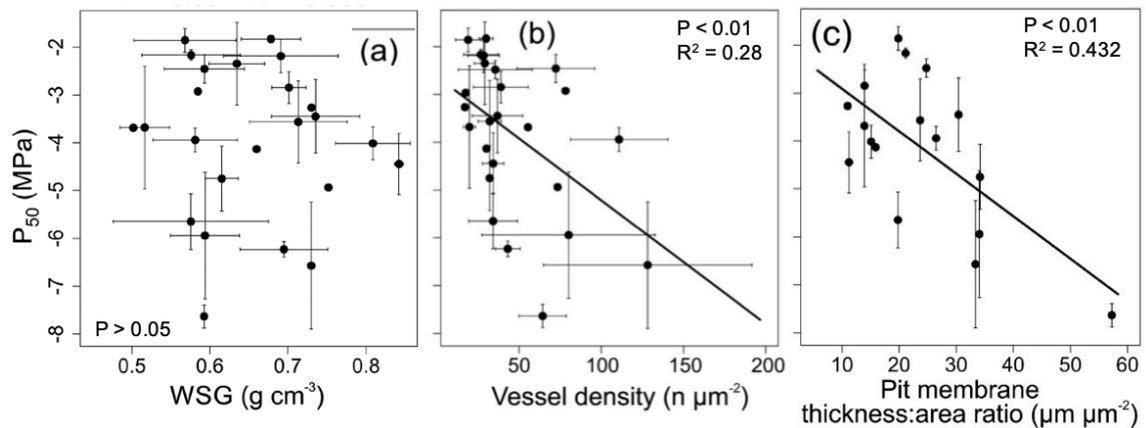


FIGURE 3.9 : Déterminants anatomiques de la vulnérabilité à l'embolie du xylème des branches. Relation entre la vulnérabilité des branches à l'embolie (P_{50} , MPa) et (a) la densité du bois, WSG, (b) la densité des vaisseaux du xylème et (c) l'ultrastructure des ponctuations du xylème (rapport entre l'épaisseur et la surface de la membrane des ponctuations). Moyennes par espèces \pm erreur standard. Les relations significatives ($P < 0.05$) sont représentées © S. LEVIONNOIS

3.2.5.3 Vulnérabilité des feuilles à la dessiccation

Nous navons observé aucune relation entre la vulnérabilité des tiges (c.-à-d. le P_{50}) et le potentiel au point de perte de turgescence cellulaire (π_{TLP} , MPa) souvent considéré comme un proxy du potentiel hydrique de fermeture des stomates. Les valeurs de π_{TLP} étaient toujours moins négatives

que les P50, suggérant que les feuilles ferment leurs stomates bien avant d'atteindre les potentiels critiques (Figure 3.10, page 33) protégeant ainsi les branches d'une diminution rapide du potentiel hydrique et de la propagation de l'embolie [45].

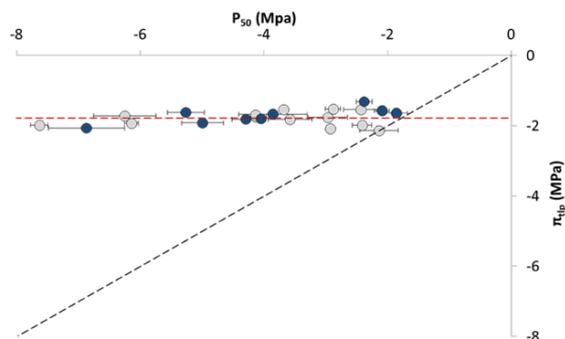


FIGURE 3.10 : Vulnérabilité des feuilles à la dessiccation. Relation entre le potentiel hydrique à 50% de perte de conductance des branches (P_{50}) et le potentiel hydrique de perte de turgescence foliaire (π_{TLP}). Les points représentent les valeurs moyennes par espèces. Les espèces étudiées dans le projet GFCLim sont en bleu foncé. Les lignes pointillées représentent (i) la moyenne de π_{TLP} toutes espèces confondues (rouge horizontale) et (ii) la ligne 1 :1 (noir). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. © C. ZIEGLER

Chez un tiers des espèces étudiées, le xylème des feuilles était plus vulnérable à l'embolie que celui des tiges (segmentation de vulnérabilité ; Figure 3.11, page 34). Un fort degré de segmentation (c.-à-d. une grande différence de P_{50} entre tige et feuille) accroît fortement le temps de dessiccation théorique de la pousse, suggérant que la segmentation de vulnérabilité est bien un mécanisme de résistance à la sécheresse. Parmi les essences commerciales, les résultats montrent une grande variabilité de vulnérabilité des feuilles à l'embolie (de -2.28 à -4.61 MPa, Figure 3.12, page 34). Comme pour les branches, certaines espèces sont plus vulnérables (Balata pomme, Gonfolo rose et Manil) et d'autres plus résistantes (Balata franc et Boco).

3.2.5.4 Variabilités inter-sites des traits foliaires impliqués dans la résistance à la sécheresse

Des mesures de traits foliaires ont été réalisées sur le site du Bafog dans l'Ouest Guyanais où la pluviométrie annuelle est plus faible que sur le site de Paracou. 16 espèces abondantes localement ont été mesurées dont 9 sont des essences commerciales ciblées par GFCLim. Les résultats préliminaires suggèrent qu'il existe un effet site sur certains traits tandis que les π_{TLP} sont comparables à ceux obtenus à Paracou. Les résultats de cette étude sont encore en cours d'analyses.

3.2.6 Conclusions

Les travaux menés dans le cadre du projet GFCLim ont permis de mesurer un nombre important de traits mécanistes sur des espèces sur lesquelles il n'existait à ce jour que peu d'informations. Les travaux sur les P_{50} des feuilles et la vulnérabilité à la segmentation font parties des tous premiers réalisées sur des espèces tropicales. De la même façon, le papier de Ziegler et al. [45] est le tout premier à appliquer une méthode adaptée aux espèces à vaisseaux longs sous les tropiques. L'étude des principaux syndromes de traits impliqués dans la résistance à la sécheresse est en cours de valorisation.

Les travaux réalisés dans le cadre de l'approche anatomique du bois n'ont pas permis de mettre en évidence un bon *proxy* de la vulnérabilité des tiges à l'embolie du xylème, principalement parce que les traits liés à l'infrastructure des membranes des ponctuations restent longs et difficiles

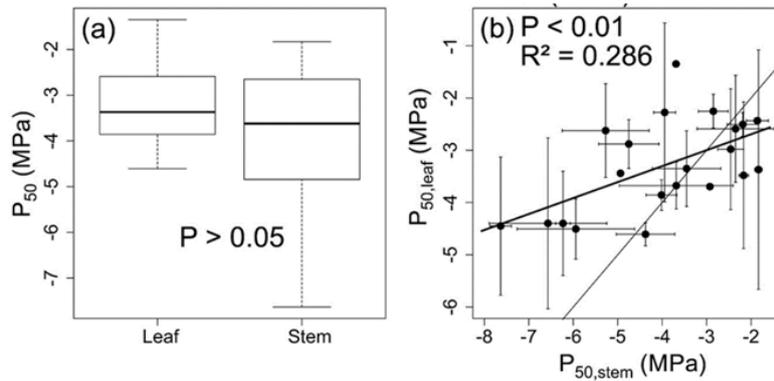


FIGURE 3.11 : Segmentation de vulnérabilité hydraulique. (a) Comparaison des potentiels hydriques moyens à 50% de perte de conductance des tiges et des feuilles (P50). (b) Relation entre les P50 des feuilles et des tiges. Moyennes par espèces \pm erreur standard. Les relations significatives ($P < 0.05$) sont représentées © S. LEVIONNOIS

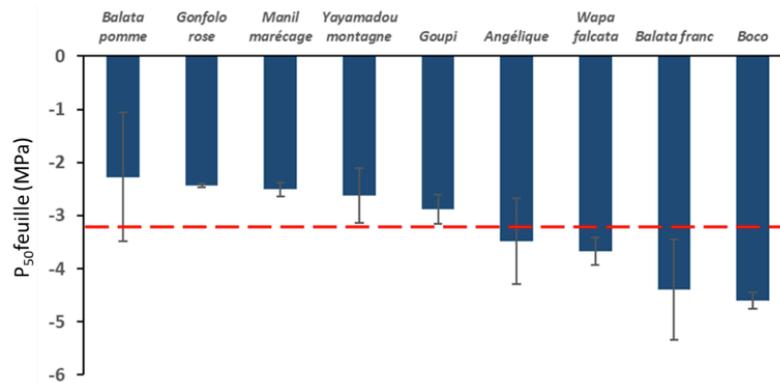


FIGURE 3.12 : Vulnérabilité des feuilles à embolie du xylème des essences d'intérêt commercial. Moyenne des potentiels hydriques à 50% de perte de conductance des feuilles (P50 feuilles, MPa). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. En rouge est représentée la valeur moyenne de P50 sur l'ensemble des 21 espèces étudiées sur le site de Paracou (Moy P50 feuilles = -3.29 \pm 0.20 MPa) © S. LEVIONNOIS

à mesurer au regard de leur faible pouvoir explicatif. Néanmoins ces résultats sont extrêmement importants pour la communauté scientifique et améliorent grandement notre compréhension des mécanismes à l'origine de la formation et de la propagation de l'embolie dans les vaisseaux du xylème.

Les travaux réalisés dans le cadre de l'approche hydraulique ont montré que les espèces d'arbres de canopée de FTH guyanaise, bien que soumises à un cumul annuel de précipitations important, (1) peuvent, pour certaines, être résistantes à l'embolie du xylème (avec donc des P₅₀ très négatifs) et (2) présentent pour la plupart un faible risque de défaillance hydraulique grâce à une perte précoce de turgescence cellulaire des feuilles et une faible vulnérabilité à l'embolie. Néanmoins, nos travaux confirment l'existence d'une grande variabilité de réponses à la sécheresse entre les espèces et même

si les arbres ne sont pas soumis actuellement à de très importantes saisons sèches (en intensité, fréquence et/ou durée) et que nous avons focalisé notre étude sur le même environnement (haut de colline avec bon drainage), il apparait que certaines espèces ne seront pas contraintes même si les saisons sèches s'accroissent, alors que d'autres ont déjà une très faible marge de manoeuvre.

Les 9 espèces commerciales que nous avons pu étudiées représentent bien le fonctionnement des arbres à l'échelle de la communauté et on retrouve également de grandes différences de fonctionnement entre les espèces. Les résultats préliminaires obtenus sur la vulnérabilité des tiges et des feuilles à l'embolie et la vulnérabilité des feuilles à la dessiccation permettent un premier classement des espèces commerciales (Figure 3.13, page 35). Le Balata franc et le Boco semblent particulièrement peu vulnérables à l'embolie des tiges et des feuilles. A l'opposé l'Angélique, le Manil marécage et le Gonfolo semblent plus vulnérables et possèdent de faibles marges de sécurité. Ce classement reste cependant à confirmer à partir (1) des données sur les autres traits et les autres sites toujours en cours d'analyses et (2) des données démographiques des espèces. Il semble notamment important de confirmer la vulnérabilité de l'Angélique, ce qui pourrait engendrer de fortes modifications de pratiques de la filière bois.

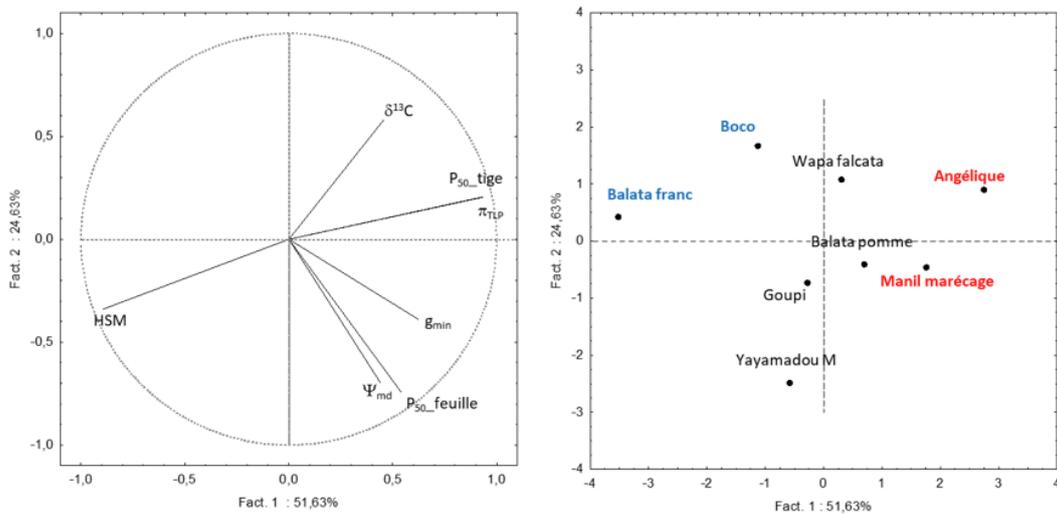


FIGURE 3.13 : Vulnérabilité à la défaillance hydraulique des espèces commerciales. Analyse en composantes principales pour 7 traits mécanistes et 8 espèces. Le π_{TLP} n'a pas pu être mesuré sur le Gonfolo rose, qui par conséquent n'est pas intégré à l'analyse. Le cercle des corrélations est représenté à gauche (voir Tableau I pour la liste des traits) et la projection des espèces à droite. L'axe 1 (51.6%) représente la vulnérabilité des tiges à l'embolie du xylème ; l'axe 2 (24.6%) représente la vulnérabilité des feuilles à l'embolie du xylème. Les espèces les plus résistantes à l'embolie sont représentées en bleu, les plus vulnérables en rouge. © S. COSTE

Une piste de progression sur la connaissance des effets du stress hydrique sur la démographie des arbres, est sans aucun doute l'amélioration de la qualité des données climatiques, notamment par l'acquisition de données plus complètes sur la dynamique du taux d'humidité dans le sol. Un calcul d'indice de stress hydrique efficace demande des relevés journaliers en sous-sol sur plusieurs années, qui sont aujourd'hui encore rares en Guyane.

3.3 Manipuler la compétition pour simuler l'évolution des peuplements WP6

3.3.1 Responsables

- Laurent Descroix, *Office National des Forêts*
- Bruno Hérault, *Cirad*

3.3.2 Contexte

A l'échelle du peuplement forestier, nous savons que l'exploitation modifie la composition floristique de la forêt, en favorisant les espèces pionnières qui s'installent dans les trouées d'abattage et le long des pistes de débardage [26]. Les conséquences des changements climatiques en cours sur la résilience des forêts exploitées sont encore peu claires. Deux hypothèses sont débattues dans la littérature. D'un côté, la résilience des forêts exploitées diminuerait parce que les espèces pionnières apparues en masse possèdent des traits biologiques qui les rendent vulnérables à la sécheresse. De l'autre, la résilience des forêts exploitées augmenterait parce que le prélèvement d'arbres diminue le niveau général de compétition entre les espèces, qu'il s'agisse des ressources hydriques, lumineuses et nutritives ; ce faisant, les forêts deviendraient moins sensibles au stress climatique. Il existe donc potentiellement une forte interaction entre augmentation du stress hydrique et exploitation forestière ce qui, selon que l'une ou l'autre hypothèse est valide, devrait être intégré dans les modes de gestion des forêts tropicales.

3.3.3 Objectifs spécifiques

- Formalisation d'un simulateur de dynamique intégrant explicitement des déterminants climatiques
- Formalisation d'un simulateur de dynamique intégrant explicitement l'exploitation forestière
- Formalisation d'un simulateur de dynamique intégrant conjointement des déterminants climatiques et l'exploitation forestière et simulations de scénarios d'exploitation sous différents scénarios climatiques et test d'hypothèses alternatives sur la résilience des forêts exploitées.

3.3.4 Liste des travaux réalisés

Pour répondre aux trois objectifs spécifiques listés ci-dessus, trois simulateurs forestiers ont été successivement utilisés :

- Le simulateur SELVA nous a permis d'appréhender la résilience du fonctionnement des forêts à différents scénarios climatiques. Ce simulateur a été choisi car il nous permettait de plugger directement les modèles de dynamique forestière [4, 5, 3] climat-explicites qui avaient été auparavant développés lors du projet Climfor.
- Le simulateur TROLL a été utilisé pour simuler la réponse de l'écosystème forestier à l'exploitation forestière. Ce simulateur a été choisi car il simule finement le comportement écologique de chacune des espèces, lesquelles répondent de manière individualiste en fonction de leurs positions dans la succession forestière.
- Le simulateur FORMIND a été utilisé pour simuler les réponses conjointes aux changements climatiques et à l'exploitation forestière. FORMIND est un GAP-modèle qui permet de faire de nombreuses simulations avec une robustesse élevée, car reposant sur des hypothèses simples de fonctionnement de la forêt. Nous l'avons donc choisi pour être confiant dans les résultats obtenus dans un espace (changement climatique + exploitation forestière) qui sort complètement de l'espace de calibration des modèles de base.

3.3.4.1 Simulateur SELVA

Nous avons étudié les impacts potentiels du changement climatique sur la dynamique forestière à long terme en utilisant un modèle individuel calibré avec les données de l'expérience de perturbation à long terme de Paracou. Nous avons simulé une communauté de forêt tropicale dans le cadre de scénarios climatiques futurs. Ces simulations nous permettent d'identifier (1) les variables climatiques qui seront probablement responsables de la plupart des changements de la dynamique forestière, (2) les processus écosystémiques sensibles et les variables qui seront affectées, et (3) les conséquences sur la structure et la dynamique de la forêt.

Pour initialiser la population d'arbres, nous avons utilisé les inventaires d'arbres du site expérimental de Paracou, en Guyane française, recueillis en 2001. Les traits fonctionnels utilisés dans cette étude sont extraits d'une grande base de données collectée dans le bouclier guyanais et décrits ici [6, 8]. Trois variables climatiques sont nécessaires pour faire fonctionner le modèle : un estimateur du stress hydrique, les précipitations totales sur deux ans et la température moyenne. L'estimation du stress hydrique a été basée sur un modèle de bilan hydrique développé sur notre site d'étude [44] et prenant les précipitations quotidiennes du CRU comme données d'entrée. Quatre scénarios climatiques ont été étudiés sur la base des scénarios du rapport du GIEC. Le premier scénario (A) est équivalent au RCP2.6, le deuxième (B) est un scénario intermédiaire et le troisième (C) est équivalent au RCP8.5. Le dernier scénario (BASE) est un scénario de contrôle qui utilise les valeurs actuelles des variables climatiques et suppose qu'elles resteront stables dans le temps.

3.3.4.2 Simulateur TROLL

Premièrement, un module de perturbation a été implémenté au sein du simulateur forestier TROLL [13]. Ce module simule une perte de biomasse non localisée et non spécifique à un temps déterminé, permettant ensuite d'étudier la récupération des forêts simulées à cette perturbation. Le module a été utilisé pour étudier le rôle de la biodiversité dans la résilience des forêts après perturbation. 60 communautés matures aux diversités taxonomiques et fonctionnelles croissantes ont été simulées en utilisant 163 espèces pour lesquelles nous possédions des traits fonctionnels disponibles. Chacune des communautés a été soumise à 3 intensités de perturbation, puis la résilience des différentes fonctions de l'écosystème forestiers a été mesurée. Enfin on a calculé l'effet net de la diversité, qui mesure la différence entre la productivité d'un assemblage et la productivité attendue si les espèces étaient en monoculture. On a finalement partitionné cet effet net en effets de complémentarité et de sélection [30].

Deuxièmement, un module d'exploitation forestière réaliste a été développé. Il est basé sur des entretiens réalisés avec l'office nationale des forêts pour simuler de manière réaliste toutes les étapes de l'exploitation forestière telle qu'elles sont réalisées en Guyane française. Il inclut plus particulièrement les phases de désignation des arbres à abattre, de sélection de ces arbres par l'exploitant forestier, de détection des arbres aux pieds pourris, d'abattage, de création des pistes, et de calcul des dommages long termes liés aux trouées. Les sous modules de simulation des arbres aux pieds pourris et de dommages long termes liées aux trouées ont été réalisés à partir de modèles bayésiens préliminaires basé sur des inventaires de l'ONF et les données de Paracou. Le sous module de simulation des pistes a été automatisé pour tenter de mimer les créations de pistes par les agents de l'ONF (Figure 3.14, page 38).

3.3.4.3 Simulateur FORMIND

Nous avons utilisé le modèle forestier FORMIND v3.2 en combinaison avec d'autres sous-modules, notamment les modules sur l'eau du sol, la température et la gestion [20] pour analyser la dynamique forestière à Paracou sous l'impact de multiples facteurs de stress, tels que le changement climatique et l'exploitation forestière sélective. FORMIND est un simulateur de type *gap-model* basé sur les processus et les individus qui décrit la structure et la dynamique verticale et horizontale de la forêt en pixels de 20 m x 20 m [20]. La zone de simulation, qui peut varier d'un hectare à plusieurs km² (ici : 16 ha), est constituée de ces pixels en interaction. FORMIND comprend quatre processus fondamentaux calculés du point de vue du bilan carbone : la production, la mortalité,

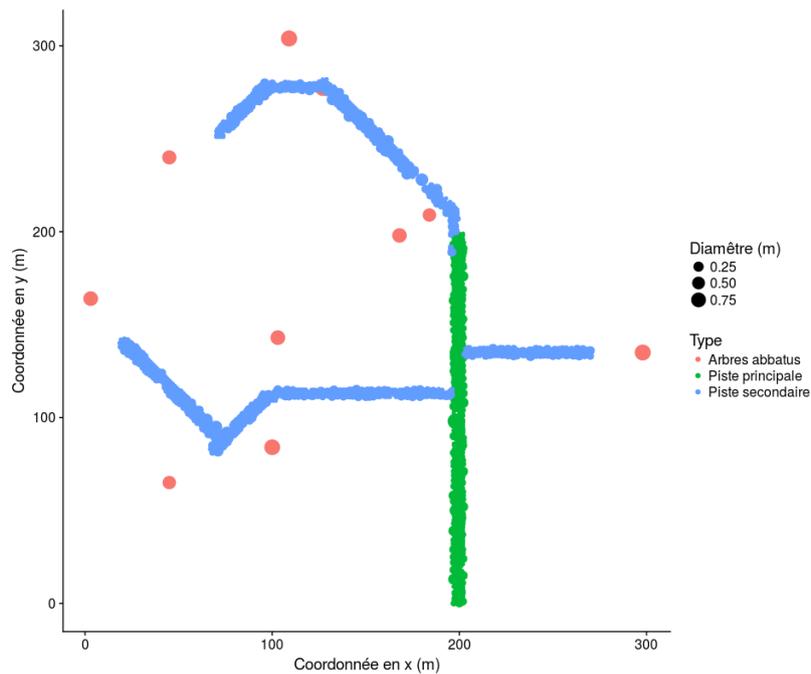


FIGURE 3.14 : Résultat du sous module de simulation des pistes © S. SCHMITT

le recrutement et la compétition. Chaque arbre individuel est modélisé dans FORMIND sur la base des données de l'inventaire forestier. Pour chaque arbre, l'irradiation, la température et les précipitations influencent l'augmentation de la biomasse de l'arbre. La compétition se produit pour la lumière en raison des effets d'ombrage et pour l'espace en raison de l'expansion de la couronne. Les pas de temps simulés sont d'un an pour le développement de la forêt et d'un jour pour les modules climat et eau du sol.

Les espèces d'arbres sont regroupées en types fonctionnels de plantes (PFT) en fonction des propriétés spécifiques de l'espèce, telles que les taux de croissance maximum et les hauteurs maximales des arbres [27]. Dans cette étude, nous avons simulé le comportement de 8 PFT regroupés en trois classes de types de succession : les espèces pionnières exigeantes en lumière, les espèces intermédiaires et les espèces climax tolérantes à l'ombre. La géométrie d'un arbre est simplifiée en supposant des tiges et des couronnes cylindriques. Les relations allométriques sont spécifiques au PFT et dépendent du diamètre actuel à hauteur de poitrine (dbh).

Nous avons mis en oeuvre des scénarios de changement climatique sur la base de quatre scénarios RCP (RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5) décrits dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC [32] et d'un scénario de référence appelé RCP 0.0. Pour le RCP 0.0, nous avons projeté 10 ans (2004-2014) de données climatiques mesurées sur une période de 1 400 ans. Afin d'obtenir les scénarios de changement climatique basés sur le RCP (contenant 1 400 années simulées) pour notre étude, les données climatiques mesurées ont été reproduites sur la durée du 21e siècle (100 années simulées). Elles ont ensuite été combinées aux valeurs quotidiennes de la température et des précipitations du PCR et étendues selon les procédures suivantes : (I) Pour les années simulées de 0 à 500 (phase de pré-changement climatique : jusqu'à l'année 2000), les données de dix ans exactement (2005-2015) de la série de mesures météorologiques du site de Paracou ont été reproduites 50 fois, (II) Pour la phase de changement climatique couvrant les années 2001-2100, les données des RCP (2.6, 4.5, 6.0, et 8.5) pour les années de simulation 501-600 ont été utilisées, (III) Pour modéliser une phase post-changement climatique, les valeurs des variables des deux dernières années des données du RCP ont été reproduites 400 fois (années de simulation 601-1400). Nous avons supposé pour les deux dernières années que les changements climatiques à la fin du 21ème siècle étaient au maximum

et que nous pourrions ainsi étudier l'influence de ces conditions climatiques sur le fonctionnement des forêts.

3.3.5 Principaux résultats

3.3.5.1 Rôle du climat dans la dynamique de la forêt à long terme

Nous avons utilisé le modèle forestier SELVA individu-centré, où la diversité des espèces est approximée par des traits fonctionnels et les processus démographiques sont explicites, pour simuler la dynamique future de la forêt de Paracou pour le siècle prochain en utilisant les prévisions du GIEC 5AR pour trois scénarios climatiques différents (optimiste RCP2.6, intermédiaire, pessimiste RCP8.5) et un contrôle (climat actuel). Quel que soit le scénario (Figure 3.15, page 40), tous les processus et les variables de structure des écosystèmes présentaient des valeurs décroissantes par rapport au contrôle, ce qui suggère un **ralentissement général du fonctionnement de la forêt sous l'effet du changement climatique** [6]. Une analyse de sensibilité a identifié la température comme le facteur climatique le plus important de ce comportement, mettant en évidence une baisse de 40% de la croissance moyenne des forêts due à la température pour le scénario le plus pessimiste (de 0,25 à 0,16 mm par an). Si la réduction de la croissance due à la température entraîne des taux de mortalité plus élevés, la structure de la communauté forestière changera de manière significative avec peu de grands arbres de la canopée et plus de petits arbres à croissance lente, avec des conséquences possibles pour, par exemple, l'absorption d'eau par l'écosystème à partir des couches profondes du sol pendant la saison sèche. Ce changement de communauté forestière aura également un impact sur la structure de la forêt avec une diminution de la surface terrière et de la biomasse fraîche.

Pour être concret, la température devrait augmenter de 4,5 degrés au cours du prochain siècle dans le bouclier guyanais. Une telle température peut affecter de manière drastique la photosynthèse en causant des dommages irréversibles au fonctionnement des feuilles et nous devons admettre que nous sommes en terrain inconnu car, actuellement, aucune forêt dans le monde n'existe dans des zones où la température moyenne est de 31 degrés. Néanmoins, nous savons, du point de vue de la physiologie des feuilles, que lorsque la température augmente, la vitesse des molécules qui réagissent augmente, ce qui entraîne des taux de réaction plus rapides mais aussi des dommages aux structures tertiaires des enzymes. Ces deux processus conduisent à la courbe en forme de cloche bien connue de la réponse de l'efficacité de la croissance à la température. La température affecte également la photosynthèse de manière plus indirecte, par le biais des températures des feuilles définissant l'ampleur de la différence de pression de vapeur feuille-air, un facteur clé influençant les conductances stomatiques. Dans l'environnement tropical du plateau des Guyanes, les températures étant déjà très élevées, l'augmentation des températures impliquera, avec peu de doutes, une croissance plus faible.

3.3.5.2 Effet de la perturbation par l'exploitation forestière sur les trajectoires de reconstitution de la biodiversité

Nos résultats ont tout d'abord validé l'hypothèse d'une relation positive entre résilience des fonctions de l'écosystème forestier et diversité fonctionnelle (figure 3.16, page 41). On a ainsi montré que la diversité améliore la résilience des forêts tropicales. De plus on a pu montrer que l'effet de complémentarité assurait la résilience du carbone en début de succession (figure 3.17, page 41), que l'on a interprété comme l'effet des processus de facilitation. Mais l'effet de la complémentarité diminue dans le temps pour laisser place à l'effet de sélection, à travers une dominance accrue d'espèces plus productives.

Nous avons en effet constaté que la complémentarité entre les espèces était l'effet dominant de la biodiversité sur le fonctionnement des forêts pendant plusieurs décennies après une perturbation. C'est une conséquence directe de l'apparition de trouées et d'une disponibilité de la lumière de plus en plus hétérogène, principale ressource limitante dans les forêts tropicales denses. On sait que la réponse démographique des espèces à la disponibilité de la lumière varie considérablement en fonction de leur stratégie fonctionnelle [26]. Les espèces pionnières ayant des tissus foliaires productifs et du bois léger ont tendance à occuper rapidement les espaces vides après leur ouverture, créant ainsi un environnement ombragé où les espèces à succession tardive ayant des tissus foliaires

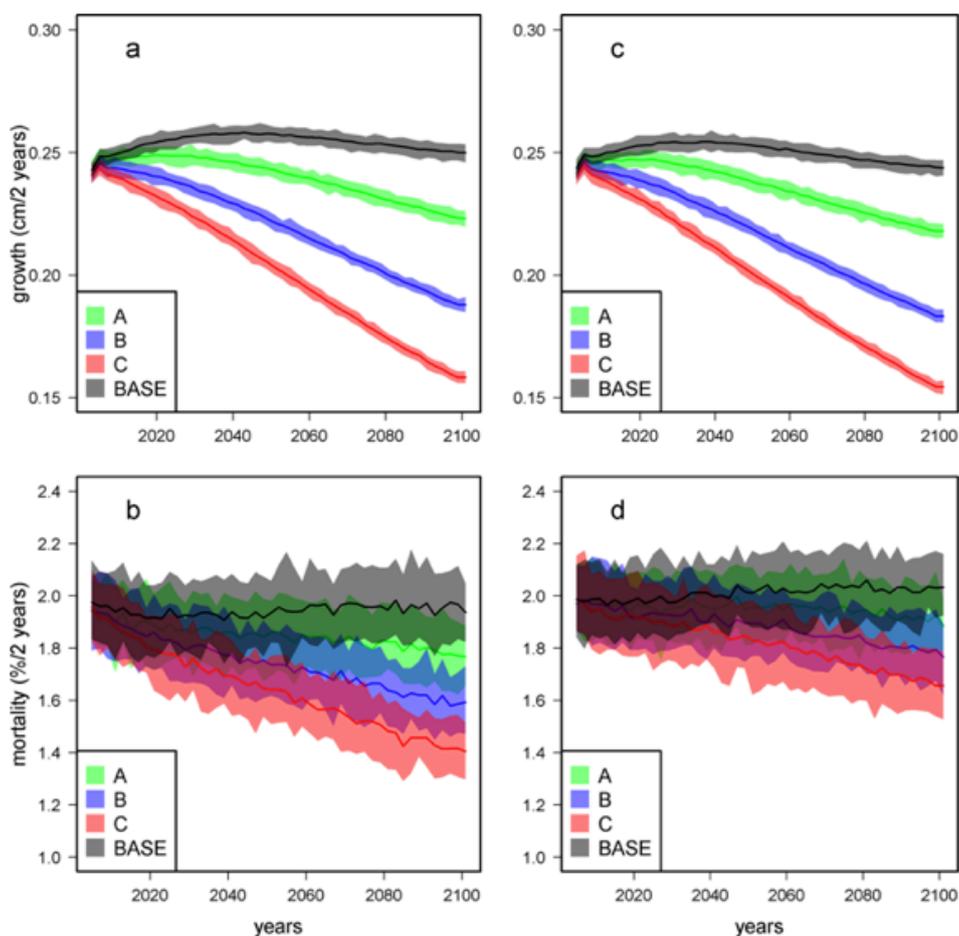


FIGURE 3.15 : Évolution des taux de croissance et de mortalité moyens des communautés d'arbres forestiers pour quatre scénarios climatiques et deux modèles de dynamique forestière. Les zones colorées représentent l'intervalle de confiance à 95%. Dans le modèle 1, nous avons supposé que la vigueur des arbres (leur probabilité de mourir) n'est pas affecté par les variables climatiques qui ont un impact sur la croissance, alors que dans le modèle 2, nous avons supposé que les variables climatiques qui ont un impact sur la croissance de la communauté ont également un impact sur la vigueur et, par conséquent, sur la mortalité. Le scénario A est équivalent au RCP2.6, B est un scénario intermédiaire et C est équivalent au RCP8.5. BASE est un scénario de contrôle qui utilise les valeurs actuelles des variables climatiques et suppose qu'elles resteront stables dans le temps. © M. AUBRY-KIENTZ

plus conservateurs peuvent s'établir plus tard [14]. En induisant une plus grande diversité de tolérance à l'ombre et de réponse de croissance à la lumière dans le pool d'espèces, la richesse des espèces favorise la réponse des forêts aux perturbations [31]. Cet effet de complémentarité diminue avec le temps tandis que l'effet de sélection prend progressivement le dessus. L'effet de complémentarité réduit peut être attribué à l'abondance accrue des espèces les plus compétitives en fin de succession dans une canopée stable avec une disponibilité de la lumière plus homogène [28].

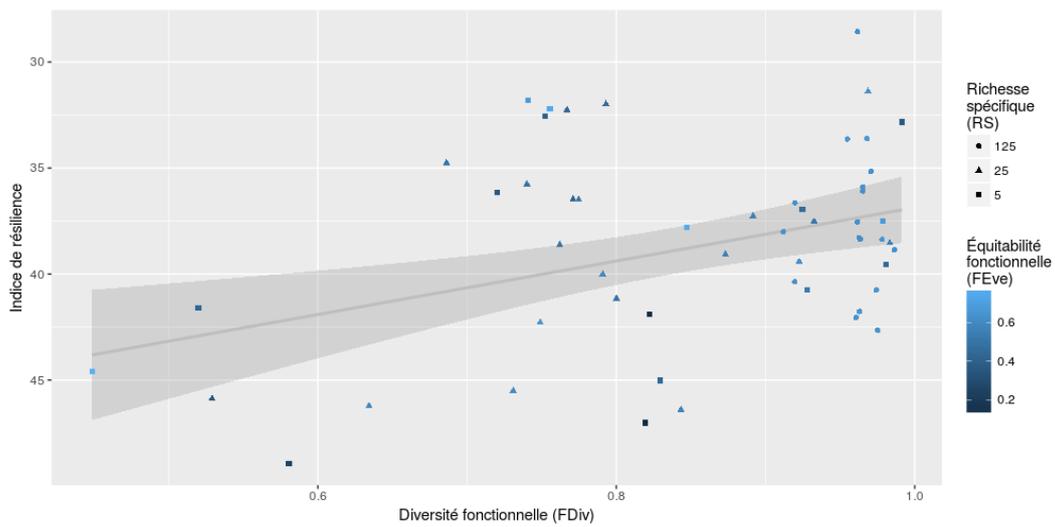


FIGURE 3.16 : Résilience de l'écosystème 600 ans après perturbation selon la diversité taxonomique et fonctionnelle. L'indice de résilience (aire au dessus de la courbe de récupération des différentes fonctions de l'écosystème) est représenté contre la diversité fonctionnelle (FDiv [43]); la forme des points représente la richesse spécifique (RS) alors que la couleur des points représente l'équitabilité fonctionnelle (FEve [43]). © S. SCHMITT

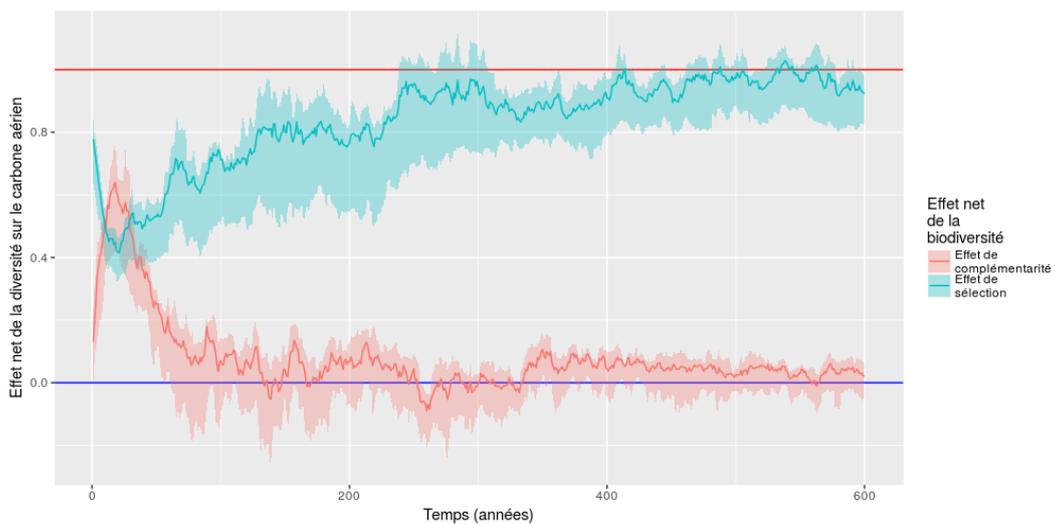


FIGURE 3.17 : Résilience de l'effet de complémentarité et de sélection. Les effets de complémentarité (CE) et de sélection (SE) ont été normalisés par l'effet net de la biodiversité du contrôle (NEc), mesurant ainsi leur résilience au cours du temps. © S. SCHMITT

3.3.5.3 Effet conjoint de l'exploitation forestière et du changement climatique

Les effets combinés de l'exploitation forestière sélective et du changement climatique ont eu des répercussions négatives plus sévères sur la dynamique et la structure des forêts de Paracou simu-

lées que le changement climatique seul. Toutes les caractéristiques de structure et de dynamique analysées dans nos simulations se sont dégradées avec le temps, tandis que les cycles de rotation les plus courts ont fortement affecté la biomasse aérienne et le volume de récolte. Selon nos hypothèses d'exploitation sélective (c'est-à-dire sans limitation du nombre d'arbres récoltés à l'hectare), aucun grand arbre commercial ne s'est établi dans le peuplement après la première intervention d'exploitation. En fonction de la durée des cycles de rotation, la récupération de la biomasse aérienne, du volume de bois et de la distribution de la taille des arbres a varié dans le peuplement forestier ; cependant, même des cycles de rotation très longs de 100 ans n'étaient pas suffisants pour un rétablissement de la structure au niveau de référence établi avant l'exploitation. En cas de changement climatique grave (RCP 8.5) et d'exploitation forestière très fréquente, par exemple des cycles de rotation inférieurs à 20 ans, les récoltes ont en fait été mauvaises au bout de quelques rotations et les arbres récoltés étaient très petits. En général, une intensification du changement climatique a entraîné des conséquences négatives dans la réponse des forêts. Par exemple, le volume de bois récolté était en moyenne inférieur de 40 % dans les scénarios d'exploitation forestière basés sur le RCP 8.5.

Il a été possible de quantifier l'évolution de la biomasse des peuplements et du volume de bois récolté ; c'est une étape importante pour comprendre dans quelle mesure les forêts tropicales de production peuvent être utilisées de manière durable dans le contexte du changement climatique. Les meilleurs résultats concernant le volume de bois récolté ont été obtenus pour le scénario de changement climatique basé sur le RCP 2.6, ainsi que pour les cycles de rotation entre 50 et 70 ans pour Paracou. Toutefois, en supposant que tous les arbres potentiellement exploitables dans chaque événement d'exploitation forestière ont effectivement été enlevés dans les premiers cycles, la capacité de régénération de la biomasse et la récolte est fortement réduite. Une limitation drastique du taux de coupe peut contribuer à une amélioration de la régénération forestière dans le cas d'un changement climatique de faible intensité. Ce n'est pas le cas dans les scénarios de changement climatique intensif.

3.3.6 Conclusions

En Guyane française, l'exploitation forestière s'est concentrée sur quelques espèces commerciales seulement [34, 38] provenant d'un nombre pourtant bien plus important d'espèces économiquement viables, de sorte que leur abondance relative pour le prochain événement d'exploitation est inévitablement plus faible que celle des autres espèces [35]. Les trois espèces de bois les plus utilisées en Guyane française en 2018 étaient l'Angélique (*Dicorynia guianensis* : 67%), deux espèces de Gonfolos (*Qualea rosea* et *Ruitzenaria albiflora* : 12%), et le Grignon Franc (*Sextonia rubra* : 9%), classées en fonction de leur volume total moyen récolté. Après quelques cycles de récolte, la proportion d'espèces commerciales pourrait être si faible que leur utilisation ne serait pas économiquement viable. Plus le bassin initial d'espèces commerciales est petit, plus l'épuisement est important [36]. Nous montrons à l'aide du simulateur FORMIND que la capacité de régénération de la forêt sera encore plus faible en cas de changement climatique grave. Cela illustre les avantages de la diversification du pool d'espèces récoltées non seulement lors d'un cycle de rotation, mais aussi en modifiant ce pool au fil du temps, de sorte que différentes espèces sont récoltées au cours de différents cycles de rotation, ce qui réduit la pression sur le pool actuellement limité d'espèces cibles. Ces modes de gestion alternatifs, encore peu ou pas explorés sous les Tropiques, devraient être une thématique de recherche prioritaire dans les années à venir pour anticiper au mieux les conséquences du réchauffement climatique.

4. Transfert et Valorisation

4.1 Responsables

- Géraldine Derroire, *Cirad*
- Stéphane Traissac, *AgroParisTech*

4.2 Contexte

En raison d'une augmentation croissante des besoins locaux en bois de construction d'une part et de l'émergence de débouchés pour le bois énergie d'autre part, la filière bois en Guyane doit initier des changements significatifs qui s'insèrent dans une stratégie à moyen terme. Cette stratégie est en cours d'élaboration avec l'écriture en cours ou à venir de différents documents de prospective : PRFB (Programme Régional de la Forêt et du Bois), le SRB (Schéma Régional Biomasse), prochaine révision du SAR (Schéma d'aménagement régional). Dans le cadre de la mise en place de cette stratégie, l'objectif général de ce WPt était d'apporter un éclairage à la filière :

- sur les impacts de la gestion forestière sur les effets du changement climatique, notamment en de bilan carbone des différents scénarios de développement
- sur l'adaptation des forêts au changement climatique en terme d'adaptations des essences aux changements du climat attendus

Cet éclairage devait intégrer les éléments de contexte techniques et socio-économiques dans lequel s'inscrit le développement de la filière.

4.3 Objectifs spécifiques

En partenariat avec les acteurs de la filière, les WP1 et 2 de ce projet ont permis d'identifier et de simuler différents scénarios d'évolution de la filière et ainsi de chiffrer les conséquences de ces scénarios en terme production de bois et de bilan carbone. Ce WP transfert devait apporter une traduction socio-économique de ces résultats afin de permettre une analyse croisée du bilan carbone et du bilan socio-économique de chaque scénario. Cette démarche visait à estimer les surcoûts ou avantages de chacun des scénarios pour la filière :

- Augmentation / diminution du chiffre d'affaire
- Besoins en investissement, caractérisations des besoins en équipements connexes structurants du territoire
- Résultats en termes de services écosystémiques (approvisionnement de la Guyane en bois d'œuvre et en bois énergie, services environnementaux)
- Impacts sociaux : création d'emplois (Equivalent Temps Plein ETP), organisation du travail, besoin en formation

L'analyse d'impacts, chiffrés, devait permettre l'identification des éléments levier clés pour l'adaptation de la gestion forestière et de l'exploitation.

4.4 Liste des travaux réalisés

Initialement le WPt devait être porté par l'association Guyane Energie Climat partenaire du projet. La disparition de l'association en 2018 et le départ des PI de la Guyane a conduit à l'externalisation de la majeure partie de travail vers un bureau d'étude. Mr Antoine Madoui et Mme Julie Raynaud, de Neriis Invest ont été sélectionnés. Le travail de Neriis Invest s'est effectué en trois temps : état des lieux de la filière, construction de l'empreinte socio-économique des scénarios avec analyse croisée de l'empreinte carbone, et enfin rédaction d'un livrable à l'attention de la filière proposant des leviers d'action.

La méthode appliquée pour évaluer l'empreinte socio-économique comportait quatre étapes :

- cartographie de la chaîne de valeur et variables techniques et économiques de chaque scénario avec pour périmètre la gestion forestière, la construction des pistes, l'exploitation forestière, le transport, la première transformation et centrale biomasse, la seconde transformation étant exclue du périmètre
- sélectionner une liste des variables techniques utilisées pour le calcul de l'empreinte carbone, pour le calcul des empreintes économiques et sociales
- construction de ratio, avec les acteurs de la filière, pour traduire les variables techniques de chaque scénario en empreinte économique et sociale (e.g. nombre d'ETP/m³ bois produit)
- agrégation et calcul de l'empreinte socio-économique pour chaque scénario (multiplications des ratios socio-économiques par les variables techniques issues de la construction des scénarios)

Les trois premières étapes ont été construites progressivement avec des aller-retour entre les acteurs de la filière et l'analyse de scénarios carbonés. Une fiche synthétique des recommandations issue de chaque WP de ce projet a été réalisée et sera mise en ligne en accès libre, sur le site de l'UMR EcoFoG, et sur la base de donnée Guy@gri du Réseau Innovation et Transfert Agricole de Guyane.

4.5 Principaux résultats

Le document livrable produit par Neriis Invest est en annexe. En termes de résultats, il propose une analyse comparée des empreintes carbone (cf partie WP2 de ce rapport), une analyse comparée des empreintes socio-économiques et une analyse croisée carbone et socio-économie. Le tableau 4.1 (page 45) présente les empreintes carbonées et socio-économiques de chaque scénario.

4.5.1 Analyse comparée des empreintes socio-économiques

L'augmentation des volumes de bois produits augmente la productivité de la filière (CA, chiffre d'affaire, par ETP), comme le montre la comparaison entre les deux scénarios augmentation (200 000m³ de production) par rapport aux trois scénarios dits Historique (80 000m³). Ceci est dû essentiellement aux gains de productivité réalisés dans la production de bois d'œuvre qui a une meilleure valeur ajoutée que le bois énergie. Ces deux scénarios augmentation sont aussi ceux qui créent le plus d'emploi.

L'utilisation d'une partie des connexes de l'exploitation en bois énergie permet également d'augmenter productivité, comme le montre la comparaison entre les scénarios Historique, historique EFI+ et Historique BE. Cependant une analyse détaillée des marges montre, avec les hypothèses utilisées, que le prix de vente du BE ne couvre pas la totalité des coûts liée à sa mobilisation et creuse le déficit de la filière (Figure 4.2, page 46). Le transport, fixé dans le modèle à 150 km, représente une proportion significative de ce coût. Ainsi l'intégralité du bois énergie mobilisable techniquement ne l'est pas économiquement.

	Historique	Historique EFI-2	Historique avec valorisation des connexes	Augmentation de la récolte	Plantation en augmentation de la récolte	Plantation en substitution de la récolte en forêt naturelle	Plantation isolée
	80 000 m ³ /an*; seulement connexes de scierie en BE*; 20 m ³ /ha*; 65m ³ /ha dégâts et houppiers**	80 000 m ³ par an*; seulement connexes de scierie en BE*; 20m ³ /ha*; 25m ³ /ha dégâts et houppiers**	80 000 m ³ /an*; connexes exploitation et scierie en BE*; 20m ³ /ha*; 65m ³ /ha dégâts et houppiers**	200 000 m ³ /an*; connexes exploitation et scierie en BE*; 30m ³ /ha*; 25m ³ /ha dégâts et houppiers**	200 000 m ³ /an*; forêt naturelle 2019-2049 puis plantation (110 000 m ³ /an) à partir de 2049*	80 000 m ³ /an*; forêt naturelle 2019-2049 puis totalité de la production à partir de 2049*	250 ha plantés/an, récoltés à partir de 2049, pour une production de 80 000 m ³ /an*.
EFI-2	non	oui	non	oui	non	non	non
Carbone							
Année où la filière devient stockeuse nette de carbone	>2088 [2073 ; >2088]	2 063 [2044 ; >2088]	2 081 [2062 ; >2088]	2 051 [2039 ; 2079]	2 063 [2056 ; 2082]	2 059 [2055 ; 2067]	2 060 [2056 ; 2064]
Empreinte carbone cumulées correspondant à la production de 2019-2088 (en Gg)	318 [-188 ; 818]	-200 [-782 ; 356]	-67 [-552 ; 320]	-1 501 [-2763 ; -203]	-1 746 [-2854 ; -209]	-1 105 [-1529 ; -591]	-638 [-897 ; -391]
Empreinte carbone cumulées correspondant à la production de 2019-2088, sans émissions évitées (en Gg)	1 325 [1213 ; 1513]	805 [710 ; 993]	1 928 [1813 ; 2100]	3 060 [2822 ; 3510]	3 327 [3028 ; 3754]	931 [847 ; 1086]	516 [437 ; 609]
Empreinte carbone par m ³ de bois d'œuvre sorti de scierie (2019-2088) (t/m ³)	0.18 [-0.11 ; 0.48]	-0.12 [-0.45 ; 0.21]	-0.04 [-0.32 ; 0.19]	-0.35 [-0.65 ; -0.05]	-0.41 [-0.67 ; -0.05]	-0.66 [-0.91 ; -0.35]	-0.64 [-0.9 ; -0.38]
Socio-économique							
Volume global de production annuel (m ³ bois sortie de scierie et bois-énergie H45%, moyenne)	80,000	80,000	180,000	400,000	440,000	180,000	110,000
ETP totaux	385	385	449	845	868	410	227
ETP par 10 000 m ³ de volume global de production	47	47	25	20	19	23	21
Chiffre d'affaire par année, millions d'€ hors subvention	51	51	87	211	214	78	47
Chiffre d'affaire par ETP (phase d'exploitation seulement), millions d'€ hors subvention	79,000	79,000	124,000	143,000	152,000	191,000	191,000

* donnée d'entrée du scénario; ** donnée calculée par le scénario

FIGURE 4.1 : Impacts carbone et impacts socio-économiques par scénario © NERIUS INVEST

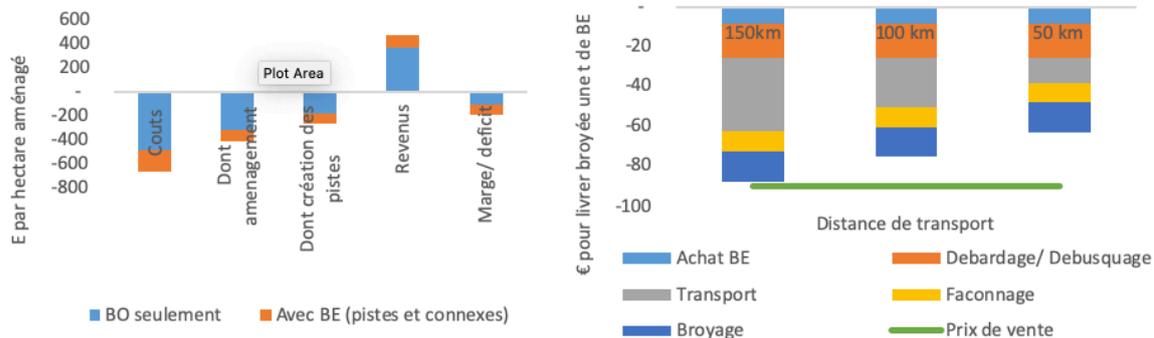


FIGURE 4.2 : Analyse des marges liées à la mobilisation de bois énergie © NERIUS INVEST

Les scénarios incluant des plantations ont des productivités plus élevées que les scénarios uniquement avec de la forêt naturelle. Cependant ce bilan positif des plantations est à nuancer car leur mise en place nécessite de faire des investissements importants et des avances de trésorerie sur le moyen terme, 30 ans pour cette étude, ce qui correspond à la durée avant la première récolte de bois d'oeuvre (Figure 4.3, page 46). Plusieurs pistes peuvent être proposées pour pallier le manque de revenu sur cette première période : une meilleure valorisation du bois d'oeuvre issu de la défriche, par diversification des essences BO et/ou de leur usage (exemple fabrication de poteaux). Si les plantations se font hors du DFP on peut également inclure des pratiques agroforestières.

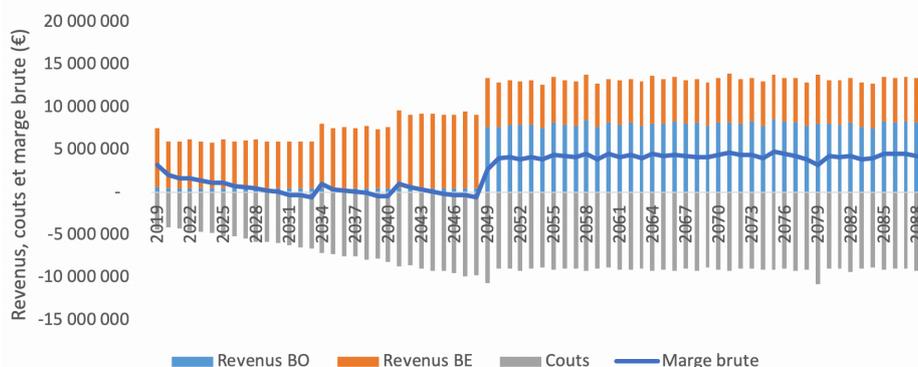


FIGURE 4.3 : Flux économiques dans le scénario "Plantation isolée" © NERIUS INVEST

4.5.2 Analyse croisée empreinte carbone/socio-économie

4.5.2.1 Pratiques d'exploitation à faible impact (EFI)

Ces pratiques sont à favoriser car elles améliorent significativement l'empreinte carbone sans impacter significativement l'économie : d'un point de vue socio-économique, il n'y a pas de différences entre le scénario Historique EFI-2 et le scénario historique sur le nombre d'ETP et le CA de la filière. La différence socio-économique principale apportée pour les pratiques EFI est de changer la qualité et l'intérêt du personnel pour le travail.

4.5.2.2 Bois Energie

D'après le scénario Historique avec valorisation des connexes, il peut exister un point de tension entre l'impact carbone et l'impact socio-économique. En effet il est préférable d'un point de vue carbone de d'abord réduire les dégâts d'exploitation, puis d'utiliser une proportion des dégâts restants en biomasse, alors que c'est l'inverse d'un point de vue économique. Cependant, plusieurs arguments permettent de trancher en faveur des pratiques EFI-2 comme un préalable à la mobilisation des connexes en BE :

- Le scénario Augmentation de la récolte montre que réduire en priorité les dégâts d'exploitation, pour ensuite exploiter les connexes en bois d'énergie, peut produire plus de valeur économique. En effet, le volume de production et le CA par ETP est plus élevé dans le scénario Augmentation de la récolte que dans le scénario Historique avec valorisation des connexes
- Les pratiques EFI-2 sont indispensables dans le cadre d'une augmentation du volume de récolte, pour limiter les dégâts d'exploitations et garantir un renouvellement de la ressource

4.5.2.3 Effet de la mise en place de plantations

Le scénario *Plantation en substitution de la récolte en forêt naturelle* (FN) affiche de meilleurs résultats sur l'impact économique (CA par ETP) et sur l'impact carbone (empreinte par m³ de BO). La comparaison avec les trois scénarios *Historique* montre le changement de répartition de valeur dans la filière au profit des activités d'exploitation et au détriment des postes comme les pistes ou le transport. En effet le CA global par année est du même ordre de grandeur entre les différents scénarios, mais pour *Plantation en substitution de la récolte FN* le CA exploitation est bien plus élevé. Par ailleurs le scénario *Plantation en augmentation de la récolte* montre qu'il est possible d'augmenter la production à 200 000 m³ par an en effectuant une transition vers un modèle de plantation tout en contribuant positivement à l'empreinte carbone de la filière, si et seulement si certaines conditions sont respectées (cf WP1 et WP2).

4.5.2.4 Besoin en investissement important de la filière

Que ce soit pour la poursuite de la mise en place de pratiques EFI, qui sont obligatoires dans le cadre de la certification forestière, ou pour la mise en place du bois énergie, les besoins en investissement seront relativement lourds pour une filière avec peu de trésorerie : 2 million d'uro pour 10 000 m³ de bois à dire d'expert. Par ailleurs les investissements pour la mise en place de plantations s'élèvent à 4.5 million d'uro pour 100ha à dire d'expert.

4.6 Conclusions et Recommandations

4.6.1 Un nouveau modèle efficient : les plantations pour le bois d'oeuvre

La confrontation des empreintes carbones et socio-économiques des différents scénarios démontre que la substitution de l'exploitation de la forêt naturelle par des plantations sur des parcelles forestées, pourrait être efficient à la fois pour le climat et pour l'emploi, si les six conditions suivantes sont remplies :

- Les plantations se font uniquement sur des parcelles ayant déjà été exploitées dans le passé et avec un réseau de pistes existant même en mauvais état
- Le bois de la défriche, après la valorisation éventuelle en bois d'uvre, est utilisé en bois-énergie
- La production de l'électricité à partir de bois-énergie vient se substituer à la production d'électricité à partir d'énergies fossiles
- Les parcelles défrichées sont utilisées à des fins de plantations sylvicoles sur plusieurs cycles
- L'exploitation de la plantation sylvicole est gérée dans le respect de l'environnement, notamment en ce qui concerne la maîtrise des impacts pendant la défriche et l'exploitation

- Les plantations de bois d’oeuvre arrivent à maturité à 30 ans. Les risques sur ce dernier point est peu maîtrisé aujourd’hui, en l’absence de recul sur les plantations en cours et dans un contexte de changement climatique

4.6.2 Concilier Augmentation de la production de bois d’oeuvre et Récolte de bois énergie

Pour atteindre cet objectif avec un bilan carbone vertueux, plusieurs recommandations peuvent être tirées de cette étude :

- En premier lieu poursuivre l’amélioration des techniques d’Exploitation à Faible Impact (EFI) sur chacune des étapes de l’exploitation en forêt naturelle (l’abattage, le débusquage et de débardage) afin de limiter les dégâts connexes
- Réaliser l’exploitation du bois d’uvre en adoptant des techniques qui permettent une valorisation simple et efficace des dégâts d’exploitation en bois énergie (propreté, humidité)
- Favoriser un ratio bois d’uvre / bois énergie (exprimé en chiffre d’affaire euros) en faveur du bois d’oeuvre. Pour cela, il est nécessaire d’augmenter l’intensité de prélèvement (m3/ha). L’hypothèse utilisé dans cette étude est 30m3 de bois d’oeuvre par ha exploité
- Limiter l’impact du transport sur le coût total, en transformant le bois en plaquettes avant transport, ou en rapprochant le plus possible les usines biomasse de la ressource

4.6.3 Une stratégie à moyen terme ?

Sous réserve de la validité des hypothèses de calcul choisies, plusieurs scenarii modélisés dans cette étude peuvent constituer une marche à suivre pour l’évolution de la filière à moyen terme, notamment les scenarii Plantation en augmentation de la récolte et Plantation en substitution de la récolte FN. Il serait donc envisageable, de doubler la production actuelle, avec à terme une substitution plus ou moins partielle d’un modèle de production *forêt naturelle* par un modèle *forêt de plantation*. Il faut cependant souligner que ces résultats ne concernent que le point de vue des impacts carbonés et socio-économiques. Les conclusions pourraient être tout autre d’un point de vue de la biodiversité par exemple.

Par ailleurs plusieurs éléments invitent à nuancer cette conclusion du point de vue du bilan carbone :

- Les scénarii avec plantations sont positifs à 40 ans mais entraînent des émissions fortes dans les premières années, ce qui va à l’encontre des besoins immédiats de réduction des émissions de carbone. 40 ans est un terme tardif pour influencer sur le changement climatique
- Comme vu dans le WP1, le caractère vertueux des bilans carbone repose sur des émissions de carbone évités dont l’estimation est assez difficile et qui dépendent des choix faits par d’autres secteurs (énergie, construction)
- L’implantation du réseau de parcelle de plantations doit se faire dans le cadre d’une réflexion globale sur l’utilisation du foncier sous forêt en Guyane, notamment vis-à-vis de l’agriculture. Cet aspect n’a pas été traité dans cette étude et constitue une perspective importante

Sur le plan socio-économique, l’accroissement souhaitable de la filière bois est conditionné par des investissements importants qui seront vraisemblablement externes.

- des mesures incitatives seraient donc à envisager (création d’un fond d’investissement, attirer sur le territoire des sociétés d’investissement spécialisées)
- ainsi qu’une stabilisation de l’environnement réglementaire et législatif (création de baux emphytéotiques pour plantation forestière, faciliter la mise en uvre de mesures de compensation au profit des plantation ou de l’EFI)

4.7 Perspectives

Les modèles carbonés développés dans cette étude sont fondés sur divers travaux de recherche et le travail du bureau d’étude Nérius Invest a permis d’en réaliser une traduction économique

relativement poussée. Cependant une analyse socio-économique complète ou encore la confrontation des enjeux carbonés avec ceux d'autres services écosystémiques de la forêt guyanaise n'est pas possible aujourd'hui. En effet de multiples aspects ne sont pas pris en compte dans les modèles et constituent autant de perspectives à cette étude :

— **sur le volet socio-économique**

- Prise en compte des interactions et enjeux fonciers d'autres filières guyanaises, notamment de la filière agricole et agroforestière
- Inclusion du maillon de la seconde transformation dans le modèle socio-économique
- Analyse de risque des implications socio-économique des scénarii

— **sur le volet dynamique forestière**

- Prise en compte des enjeux de biodiversité sur parcelles exploitées
- Prise en compte mécanistes et spatialisé des impacts des changements climatiques sur la dynamique de la forêt naturelle d'une part et des plantations d'autres part

D'un point de vue méthodologique une spatialisation du modèle à l'échelle de la Guyane semble nécessaire pour d'aborder certaines de ces perspectives.

Bibliographie

- [1] Henry D Adams, Melanie JB Zeppel, William RL Anderegg, Henrik Hartmann, Simon M Landhäusser, David T Tissue, Travis E Huxman, Patrick J Hudson, Trenton E Franz, Craig D Allen, et al. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature ecology & evolution*, 1(9) :1285–1291, 2017.
- [2] William RL Anderegg, Christopher Schwalm, Franco Biondi, Jesus Julio Camarero, George Koch, Marcy Litvak, Kiona Ogle, John D Shaw, E Shevliakova, AP Williams, et al. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science*, 349(6247) :528–532, 2015.
- [3] M Aubry-Kientz, V Rossi, and F Wagner. Identifying climatic drivers of tropical forest dynamics. *Biogeosciences*, 12(19) :5583–5583, 2015.
- [4] Mélaïne Aubry-Kientz, Bruno Hérault, Charles Ayotte-Trépanier, Christopher Baraloto, and Vivien Rossi. Toward trait-based mortality models for tropical forests. *PloS one*, 8(5) :e63678, jan 2013.
- [5] Mélaïne Aubry-Kientz, Vivien Rossi, Jean-Jacques Boreux, and Bruno Hérault. A joint individual-based model coupling growth and mortality reveals that tree vigor is a key component of tropical forest dynamics. *Ecology and Evolution*, 5(12) :2457–2465, jun 2015.
- [6] Melaine Aubry-Kientz, Vivien Rossi, Guillaume Cornu, Fabien Wagner, and Bruno Hérault. Temperature rising would slow down tropical forest dynamic in the guiana shield. *Scientific reports*, 9(1) :1–8, 2019.
- [7] Ian R Ball, Hugh P Possingham, and Matthew Watts. Marxan and relatives : software for spatial conservation prioritisation. *Spatial conservation prioritisation : Quantitative methods and computational tools*, pages 185–195, 2009.
- [8] Christopher Baraloto, CE Timothy Paine, Sandra Patino, Damien Bonal, Bruno Hérault, and Jerome Chave. Functional trait variation and sampling strategies in species-rich plant communities. *Functional Ecology*, 24(1) :208–216, 2010.
- [9] Juergen Blaser, Alastair Sarre, Duncan Poore, and Steven Johnson. *Status of Tropical Forest Management 2011*, volume 38. 2011.
- [10] Timothy J Brodribb. Progressing from functional to mechanistic traits. *New Phytologist*, 215(1) :9–11, 2017.
- [11] Zuzana Burivalova, Çağan Hakkı Şekercioglu, and Lian Pin Koh. Thresholds of logging intensity to maintain tropical forest biodiversity. *Current Biology*, 24(16) :1893–1898, 2014.
- [12] A Cabon, C Piponiot-Laroche, A Dourdain, and B Hérault. *Bilan Carbone de l'Exploitation Forestière en Guyane française*. Guyane Energie Climat, Cayenne, 2014.
- [13] J Chave. Study of structural, successional and spatial patterns in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model. *Ecological modelling*, 124 :233–254, 1999.
- [14] Dylan Craven, Jefferson S Hall, Graeme P Berlyn, Mark S Ashton, and Michiel van Breugel. Changing gears during succession : shifting functional strategies in young tropical secondary forests. *Oecologia*, 179(1) :293–305, 2015.
- [15] Sylvain Delzon. New insight into leaf drought tolerance. *Functional Ecology*, 29(10) :1247–1249, 2015.

- [16] Camille Dezécache, Emmanuel Faure, Valéry Gond, Jean-Michel Salles, Ghislain Vieilledent, and Bruno Hérault. Gold-Rush in a forested El Dorado : Deforestation leakages and the need for regional cooperation. *Environmental Research Letters*, 034013 :19, 2017.
- [17] Camille Dezécache, Jean Michel Salles, Ghislain Vieilledent, and Bruno Hérault. Moving forward socio-economically focused models of deforestation. *Global Change Biology*, 23(9) :3484–3500, 2017.
- [18] Hélène Fargeon, Mélaïne Aubry-Kientz, Olivier Brunaux, Laurent Descroix, Romain Gaspard, Stéphane Guitet, Vivien Rossi, and Bruno Hérault. Vulnerability of commercial tree species to water stress in logged forests of the guiana shield. *Forests*, 7(5) :105, 2016.
- [19] Hélène Fargeon, Mélaïne Aubry-kientz, Olivier Brunaux, Laurent Descroix, Stéphane Guitet, Vivien Rossi, and Bruno Hérault. Vulnerability of commercial tree species to water stress in logged forests of the Guiana shield. *Forests*, 7(105) :1–21, 2016.
- [20] Rico Fischer, Friedrich Bohn, Mateus Dantas de Paula, Claudia Dislich, Jürgen Groeneveld, Alvaro G Gutiérrez, Martin Kazmierczak, Nikolai Knapp, Sebastian Lehmann, Sebastian Paulick, et al. Lessons learned from applying a forest gap model to understand ecosystem and carbon dynamics of complex tropical forests. *Ecological Modelling*, 326 :124–133, 2016.
- [21] Youven Goulamoussène, Caroline Bedeau, Laurent Descroix, Vincent Deblauwe, Laurent Linguet, and Bruno Hérault. Weak Environmental Controls of Tropical Forest Canopy Height in the Guiana Shield. *Remote Sensing*, 8 :747, 2016.
- [22] Youven Goulamoussène, Caroline Bedeau, Laurent Descroix, Laurent Linguet, and Bruno Hérault. Environmental control of natural gap size distribution in tropical forests. *Biogeosciences*, 14(2) :353–364, jan 2017.
- [23] Oriol Grau, Josep Peñuelas, Bruno Ferry, Vincent Freycon, Lilian Blanc, Mathilde Desprez, Christopher Baraloto, Jérôme Chave, Laurent Descroix, Aurélie Dourdain, Stéphane Guitet, Ivan A. Janssens, Jordi Sardans, and Bruno Hérault. Nutrient-cycling mechanisms other than the direct absorption from soil may control forest structure and dynamics in poor Amazonian soils. *Scientific Reports*, 7(February) :45017, mar 2017.
- [24] Stéphane Guitet. Production de bois-énergie sur un massif forestier dédié à cette vocation en guyane - étude de cas en forêt de balata saut-léodate (guyane française). 2011.
- [25] Bruno Hérault, Bénédicte Bachelot, Lourens Poorter, Vivien Rossi, Frans Bongers, Jérôme Chave, C E Timothy Paine, Fabien Wagner, and Christopher Baraloto. Functional traits shape ontogenetic growth trajectories of rain forest tree species. *Journal of Ecology*, 99(6) :1431–1440, 2011.
- [26] Bruno Herault, Julia Ouallet, Lilian Blanc, Fabien Wagner, and Chris Baraloto. Growth responses of neotropical trees to logging gaps. *Journal of Applied Ecology*, 47(4) :821–831, 2010.
- [27] Ulrike Hiltner, Andreas Huth, Achim Bräuning, Bruno Hérault, and Rico Fischer. Simulation of succession in a neotropical forest : High selective logging intensities prolong the recovery times of ecosystem functions. *Forest Ecology and Management*, 430 :517–525, 2018.
- [28] Frédéric Holzwarth, Nadja Rüger, and Christian Wirth. Taking a closer look : disentangling effects of functional diversity on ecosystem functions with a trait-based model across hierarchy and time. *Royal Society open science*, 2(3) :140541, 2015.
- [29] Clinton N Jenkins, Stuart L Pimm, and Lucas N Joppa. Global patterns of terrestrial vertebrate diversity and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28) :E2602–E2610, 2013.
- [30] M Loreau and a Hector. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412(6842) :72–6, 2001.
- [31] Xavier Morin, Lorenz Fahse, Michael Scherer-Lorenzen, and Harald Bugmann. Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecology letters*, 14(12) :1211–1219, 2011.
- [32] Rajendra K Pachauri, Myles R Allen, Vicente R Barros, John Broome, Wolfgang Cramer, Renate Christ, John A Church, Leon Clarke, Qin Dahe, Purnamita Dasgupta, et al. *Climate*

change 2014 : synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ipcc, 2014.

- [33] Michiel Pillet, Emilie Joetzjer, Camille Belmin, Jérôme Chave, Philippe Ciais, Aurélie Dourdain, Margaret Evans, Bruno Hérault, Sebastiaan Luyssaert, and Benjamin Poulter. Disentangling competitive versus climatic drivers of tropical forest mortality. *Journal of Ecology*, 38(1) :42–49, oct 2017.
- [34] Camille Piponiot, Antoine Cabon, Laurent Descroix, Aurélie Dourdain, Lucas Mazzei, Benjamin Ouliac, Ervan Rutishauser, Plinio Sist, and Bruno Hérault. A methodological framework to assess the carbon balance of tropical managed forests. *Carbon Balance and Management*, 11(1) :15, 2016.
- [35] Camille Piponiot, Géraldine Derroire, Laurent Descroix, Lucas Mazzei, Ervan Rutishauser, Plinio Sist, and Bruno Hérault. Assessing timber volume recovery after disturbance in tropical forests—a new modelling framework. *Ecological Modelling*, 384 :353–369, 2018.
- [36] Camille Piponiot, Edna Rödiger, Francis E Putz, Ervan Rutishauser, Plinio Sist, Nataly Ascarrunz, Lilian Blanc, Géraldine Derroire, Laurent Descroix, Marcelino Carneiro Guedes, et al. Can timber provision from amazonian production forests be sustainable? *Environmental Research Letters*, 14(6) :064014, 2019.
- [37] Camille Piponiot, Ervan Rutishauser, Géraldine Derroire, Francis E Putz, Plinio Sist, Thales AP West, Laurent Descroix, Marcelino Carneiro Guedes, Eurídice N Honorio Coronado, Milton Kanashiro, et al. Optimal strategies for ecosystem services provision in amazonian production forests. *Environmental Research Letters*, 14(12) :124090, 2019.
- [38] Camille Piponiot, Plinio Sist, Lucas Mazzei, Marielos Peña-Claros, Francis E Putz, Ervan Rutishauser, Alexander Shenkin, Nataly Ascarrunz, Celso P de Azevedo, Christopher Baraloto, Mabiane França, Marcelino Guedes, Eurídice N Honorio Coronado, Marcus VN D’Oliveira, Ademir R Ruschel, Kátia E da Silva, Eleneide Doff Sotta, Cintia R de Souza, Edson Vidal, Thales AP West, and Bruno Hérault. Carbon recovery dynamics following disturbance by selective logging in Amazonian forests. *eLife*, 5 :e21394, dec 2016.
- [39] Didier Sabbadin. La production de bois en guyane française à l’horizon 2045 - quelles places pour la forêt naturelle dans l’approvisionnement de la filière forêt-bois? 2015.
- [40] Roger Sathre and Jennifer OConnor. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental science & policy*, 13(2) :104–114, 2010.
- [41] Plinio Sist, Ervan Rutishauser, Marielos Peña-Claros, Alexander Shenkin, Bruno Hérault, Lilian Blanc, Christopher Baraloto, Fidèle Baya, Fabrice Benedet, Katia Emidio da Silva, Laurent Descroix, Joice Nunes Ferreira, Sylvie Gourlet-Fleury, Marcelino Carneiro Guedes, Ismail Bin Harun, Riina Jalonen, Milton Kanashiro, Haruni Krisnawati, Mrigesh Kshatriya, Philippa Lincoln, Lucas Mazzei, Vincent Medjibé, Robert Nasi, Marcus Vinicius N. D’Oliveira, Luis C. de Oliveira, Nicolas Picard, Stephan Pietsch, Michelle Pinard, Hari Priyadi, Francis. E. Putz, Ken Rodney, Vivien Rossi, Anand Roopsind, Ademir Roberto Ruschel, Nur Hajar Zamah Shari, Cintia Rodrigues de Souza, Farida Herry Susanty, Eleneide Doff Sotta, Marisol Toledo, Edson Vidal, Thales a.P. West, Verginia Wortel, and Toshihiro Yamada. The Tropical managed Forests Observatory : a research network addressing the future of tropical logged forests. *Applied Vegetation Science*, 18 :171–174, jul 2015.
- [42] Morgane Urli, Annabel J Porté, Herve Cochard, Yann Guengant, Regis Burlett, and Sylvain Delzon. Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree physiology*, 33(7) :672–683, 2013.
- [43] Sébastien Villéger, Norman W. H. Mason, and David Mouillot. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 89(8) :2290–2301, aug 2008.
- [44] Fabien Wagner, Bruno Hérault, Clement Stahl, Damien Bonal, and Vivien Rossi. Modeling water availability for trees in tropical forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(9) :1202–1213, 2011.
- [45] Camille Ziegler, Sabrina Coste, Clément Stahl, Sylvain Delzon, Sebastien Levionnois, Jocelyn Cazal, Hervé Cochard, Adriane Esquivel-Muelbert, Jean-Yves Goret, Patrick Heuret, et al.

Large hydraulic safety margins protect neotropical canopy rainforest tree species against hydraulic failure during drought. *Annals of Forest Science*, 76(4) :115, 2019.