



**INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE
DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA
DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE**

**Programme Biodiversité et gestion forestière
Rapport de fin de contrat**

Responsable :
Christopher Baraloto
INRA, UMR EcoFoG
BP 319; 97379 Kourou Cedex
0594 32 92 91
chris.baraloto@ecofog.gf

Date : 31/08/2009

N° de contrat : **XXXXXXX**
Date du contrat : **.././20..**

**INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE
DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA
DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE**

TABLE DES MATIÈRES

Synthèse destinée à publication.....	3
Résumés	9
Rapport scientifique	11
Annexe : copie des publications.....	32

**INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE
DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA
DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE**

SYNTHÈSE DESTINÉE À PUBLICATION

**INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE
DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA
DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE**

PROGRAMME BIODIVERSITÉ ET GESTION FORESTIÈRE

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement : 1 janvier 2006

Montant du budget : 65 020 €

Cofinancements obtenus : (organisme, montant, durée)

2003–2007 Project NSF–USA. “Defining functional groups of French Guianan trees using phylogenetically-independent contrasts” (PI: C. Baraloto; co-PI: D. Bonal, INRA-Kourou). US\$104,700.

Participants au projet :

Responsable scientifique du projet : nom et coordonnées

Dr. Christopher BARALOTO, Chargé de Recherche INRA

Unité Mixte de Recherche Ecofog « Ecologie des forêts de Guyane » (CNRS, Cirad, Engref, INRA)

Noms et organismes des autres partenaires scientifiques bénéficiaires

INRA, Unité Mixte de Recherche « Ecologie des forêts de Guyane » (Ecofog) Cnrs, Cirad, Engref, Inra Kourou, BP 709, 97387 Kourou Cedex; Tél : 0594 329300, fax : 0594 324302

CIRAD, Département Forêt, Unité Mixte de Recherche « Ecologie des forêts de Guyane » (Ecofog) Cnrs, Cirad, Engref, Inra, BP 701, 97387 Kourou Cedex; Tél : 0594 327350, fax : 0594 327351

CIRAD, Département Amis, Unité Mixte de Recherche, UMR Cirad-Cnrs (5120)-Ephe-Inra(931)-Ird(123)-Univ. Montpellier 2, "botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes (AMAP)", TA40/PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 5, tél : 04 67 61 75 47 ; fax 04 67 61 56 68

IRD, Unité Mixte de Recherche, UMR Cirad-Cnrs (5120)-Ephe-Inra(931)-Ird(123)-Univ. Montpellier 2, "botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes (AMAP)", TA40/PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 5; tél : 04 67 61 75 47 ; fax 04 67 61 56 68

ONF, Délégation régionale de Guyane, Pôle technique, BP 7002, 97 307 Cayenne cedex; tél : 05 94 25 53 95, fax : 05 94 30 18 63

MOTS CLÉS

exploitation forestière, REDD, gestion durable, richesse spécifique, diversité génétique, traits fonctionnels, forêt tropicale humide, Paracou, Guyane Française

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

OBJECTIFS DES RECHERCHES

L'ONF (Office National des Forêts), gestionnaire de l'essentiel du patrimoine forestier guyanais a pour mission de veiller à sa conservation et à son « bon usage » dans un cadre multifonctionnel.. En termes d'exploitation, l'ONF a retenu l'option de recourir prioritairement à « une sylviculture extensive en forêt naturelle permettant le maintien d'une structure forestière très proche de celle des forêts primaires, une faible perturbation du couvert forestier (trouées d'exploitation de faible importance) et également la conservation d'un haut niveau de biodiversité ». L'application de ces principes nécessite une connaissance des modifications de l'écosystème forestier en fonction de l'intensité de l'exploitation.

Pour contribuer à répondre à cette problématique, l'UMR ECOFOG (Ecologie des Forêts de Guyane), en partenariat avec l'ONF, a mis en place ce projet dont l'objectif est de déterminer quelles intensités d'exploitation et quelles répartitions de prélèvement permettent d'optimiser la productivité sylvicole sans compromettre la biodiversité du peuplement forestier.

Ce programme s'appuie principalement sur le dispositif expérimental de Paracou en Guyane française. Paracou est un site important pour la recherche sur la forêt tropicale du fait de sa taille et du recul de 20 ans dont on dispose après l'exploitation. L'originalité de ce projet repose sur l'analyse de la réponse de l'écosystème à un indice de perturbation (taille des trouées d'abattage et la distance au bord de la trouée) plutôt qu'à un indice de prélèvement (intensité d'exploitation). Le projet consiste à déterminer les effets de cet indice sur quatre niveaux de la biodiversité : sur la diversité spécifique ; sur la composition fonctionnelle (les caractéristiques écophysologiques qui permettent d'expliquer les différences de tempérament et de stratégies en réponse à cette perturbation) ; sur la diversité génétique ; et sur des paramètres de la dynamique forestière (croissance, mortalité et recrutement). Le but ultime est de comprendre et prédire les effets de l'intensité d'exploitation et du degré d'ouverture de la canopée sur le maintien de la biodiversité (ici, la diversité spécifique, génétique intra-spécifique et fonctionnelle, à l'échelle locale).

Cette étude a permis d'apporter des réponses aussi bien à des questionnements fondamentaux qu'à la question de la gestion forestière (prévision des effets de différentes modalités d'ouverture de la canopée, prévention de la dérive de la composition, modélisation...).

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX

INTRODUCTION

Au moment où la prise en compte de la biodiversité dans la gestion forestière devient une priorité dans toutes les forêts du monde, les forêts tropicales humides reconnues comme des modèles de biodiversité sont donc des objets privilégiés pour l'étude des forêts hétérogènes et diversifiées. La présence d'une équipe multidisciplinaire (UMR ECOFOG avec ses partenaires hexagonaux) installée autour de dispositifs anciens et de long terme (comme le dispositif de Paracou en Guyane française qui est au cœur du présent projet), en relations étroites avec le gestionnaire (en Guyane l'ONF se trouve au cœur du dispositif de recherche grâce au GIS Irista), doit permettre des avancées significatives et génériques sur la façon d'aborder l'impact de la gestion sur la biodiversité et le fonctionnement d'écosystèmes complexes, particulièrement riches en espèces.

Par ailleurs, la définition de règles de gestion durable est une question très sensible pour les forêts tropicales humides, particulièrement menacées et situées dans des pays où le développement économique est une nécessité, avec des compromis difficiles entre exploitation et préservation. En Guyane où se trouve la seule grande forêt tropicale gérée par un pays européen, il est indispensable de mettre en avant une gestion exemplaire et appuyée sur des connaissances scientifiques éprouvées et innovantes. Cette gestion qui s'appuie sur une démarche d'aménagement maintenant bien établie devrait être labellisée très prochainement par une écocertification PEFC.

Les règles de sylviculture sont un élément de cette gestion. Les interventions sont limitées à l'exploitation forestière, soumise à un cahier des charges techniques qui doit garantir la régénération des peuplements, le maintien de la biodiversité et les fonctions principales de l'écosystème. Depuis une dizaine d'année, on s'attache à définir des règles d'exploitation à faible impact (EFI) visant à maîtriser et limiter les dégâts, en supposant qu'en mimant au mieux les dynamiques naturelles, on garantira la gestion durable. L'EFI est aujourd'hui considérée comme un outil majeur et indispensable contribuant à la gestion durable des forêts tropicales et constitue à ce titre un critère indispensable

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

pour la certification de tout aménagement forestier. L'évaluation rigoureuse de l'effet de ces règles sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes reste néanmoins à poursuivre – d'autant que les polémiques sont nombreuses sur les possibilités de concilier prélèvement et conservation -, avec la nécessité de disposer de dispositifs anciens de suivi de la dynamique forestière après exploitation.

En Guyane, nous disposons de plusieurs dispositifs, tout particulièrement celui de Paracou où l'on a maintenant un recul de 20 ans et des résultats synthétisés. Il est apparu que la reconstitution du stock des arbres exploitables nécessite d'attendre 50 ans au minimum et, selon le pool d'espèces considéré. Le rallongement des durées de rotation ne semble pas constituer une solution à cette reconstitution, et la réduction des dégâts d'abattage notamment vis-à-vis des arbres d'avenir est apparue une priorité. Des modifications de la composition floristique suite à l'exploitation paraissent inévitables et les effectifs d'arbres exploitables pour certaines espèces seront beaucoup plus faibles à la prochaine rotation (ex. *Sextonia rubra*). Enfin, malgré la fermeture du milieu près de 20 ans après exploitation, la structure forestière et de la dynamique forestière restent très différentes de celles enregistrées en forêts non perturbées.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce programme de recherche a été mené sur le dispositif permanent de Paracou où de nombreuses études ont déjà été conduites (Gourlet-Fleury *et al.* 2004). Le dispositif de Paracou comprenait dans sa phase initiale 12 parcelles de 6,25 ha (9 ha avec la zone tampon) réparties en parcelles témoins et trois types de traitement sylvicoles, avec trois répétitions de chaque cas. Les interventions sylvicoles ont été effectuées en 1986 et 1987. Depuis, le dispositif a été complété par l'adjonction de trois parcelles de 6.25 ha et une de 25 ha installée en forêts non-perturbées. Dans chaque parcelle, les arbres de plus de 10 cm de diamètre ont été cartographiés. Les 3 composantes de la dynamique forestière (accroissement, mortalité et recrutement) sont suivies depuis 1984 pour les 12 premières parcelles et depuis 1991 pour les autres. L'amélioration des identifications botaniques des arbres est en cours, rendue nécessaire par le fait que les premières identifications étaient focalisées sur les espèces commerciales uniquement.

Pour les arbres d'un diamètre inférieur à 10 cm, nous disposons également :

- de données de croissance et de mortalité issues d'un échantillonnage systématique des jeunes arbres de plus de 150 cm de hauteur (64 placettes réparties sur une grille de 20 m x 20 m) pour 25 espèces.
- de données de répartition des tiges de 2 à 10 cm de diamètre, issues d'inventaires en bandes (20 m x 200 m) sur toutes les espèces sur 10 des 12 parcelles initiales. Deux campagnes de mesure ont été réalisées depuis 1995.

Outre les données sur les arbres, plusieurs types de données caractérisant l'environnement des parcelles sont disponibles :

- la topographie
- une cartographie des criques et des zones de bas-fonds
- une cartographie des dégâts (trouées, pistes de débardage) consécutifs aux traitements sylvicoles (cf. Figure 1.1).
- une cartographie fine des conditions édaphiques (en cours d'obtention)

Ces informations sont regroupées dans une base de données, couplée à un SIG. Les traitements les plus intenses, dont l'un comprenait la dévitalisation de nombreuses tiges, a placé le peuplement dans des situations extrêmes d'ouverture de la canopée, particulièrement intéressantes pour l'analyse des potentialités des espèces.

RÉSULTATS

Grace au SIG, une ouverture donnée peut être décrite par sa surface (m²), son périmètre (m), sa fréquence par parcelle et par carré, son type, etc. autant d'éléments permettant de caractériser l'environnement local perturbé autour d'un arbre sujet. Les dégâts représentent 27.79 % de la surface des neuf parcelles traitées (56,25 ha) alors que les pistes (hors dégâts) représentent 13.15 %

Le nombre d'espèces différentes échantillonnées dans une zone délimitée sur le terrain augmente en fonction du nombre d'individus échantillonnés dans cette zone. Les différents habitats ne se

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

distinguent pas. Malgré une composition floristique différente et un type de drainage différent, la présence d'une perturbation conduit la communauté à un type particulier de végétation qui s'exprime principalement par un cortège spécifique particulier plutôt que par une variation des abondances des espèces antérieurement présentes. La limitation par le recrutement, qui se traduit par l'effet des blocs de composition, n'empêcherait donc pas l'installation d'une flore spécifique (composition globale et espèces indicatrices). La présence des trouées d'abattage est donc à l'origine d'une mosaïque de zones de compositions floristiques différentes. Par conséquent, la diversité à une plus grande échelle spatiale que celle étudiée, c'est-à-dire la diversité bêta, est probablement augmentée par l'exploitation de ce fait.

Nous avons évalué l'effet du degré d'exploitation sur la diversité génétique de *Jacaranda copaia* et *Virola michelii*, des espèces à bois tendre. On a croisé un classement par cohorte et par degré d'exploitation. Les résultats montrent qu'au sein des trois cohortes et pour chaque locus, il n'y a pas d'influence de la parcelle (donc du niveau d'exploitation) sur la diversité génétique. Par contre, une analyse spatiale plus fine révèle que le degré de consanguinité des juvéniles en zones exploitées apparaît plus fort que dans la génération de leurs parents potentiels.

La plupart des espèces démontrent des modèles de croissance liés positivement avec l'indice de perturbation, bien que pour certaines, la réponse de la croissance aux trouées change avec le stade de développement de l'arbre. Ce dernier serait important à prendre en compte lors des inventaires forestiers, comme suggéré lors du workshop avec les ouvriers de l'ONF.

II. ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Dans le contexte tropical et notamment en Guyane où l'expérience de la foresterie est courte, le développement d'une sylviculture est un objectif ambitieux. La forte diversité de la composition des peuplements guyanais et leur fonctionnement complexe n'est pas encore bien décrypté. L'objectif poursuivi par le gestionnaire pour les forêts de production est de faire évoluer les peuplements naturels afin de donner une place plus importante aux espèces commercialement intéressantes et d'augmenter la productivité de ces peuplements tout en veillant à ce que les principaux services de l'écosystème soient maintenues (carbone, maintien de la biodiversité) par une préservation de la diversité.

L'ouverture du peuplement reste la principale intervention sur le peuplement forestier tropical. Des résultats récents (Guitet et al. sous presse) ont montré que les éclaircies sous forme de dévitalisation avaient un effet sylvicole très limité. Les connaissances acquises dans ce projet vont donc permettre d'orienter l'exploitation forestière en Guyane afin d'en faire un véritable outil sylvicole permettant de donner une direction à la dynamique du peuplement forestier.

Plusieurs résultats marquants peuvent être retenus :

- **Modalités de prélèvement de la ressource / Privilégier des petites trouées pour dynamiser le peuplement**

Le gain de croissance des arbres après ouverture du peuplement par l'exploitation forestière va dépendre essentiellement de la proximité d'une trouée d'abattage (pour une distance inférieure à 25 m), la surface de celle-ci n'ayant peu d'influence. A taux de prélèvement égal, il faut clairement **privilégier plusieurs petites trouées à quelques grandes**, ce qui souligne l'importance et la maîtrise des techniques d'abattage directionnel. Appliquée à l'ensemble du peuplement, l'augmentation du nombre de trouées permettra une reconstitution optimale de la biomasse forestière. Cependant les modalités spatiales de l'exploitation peuvent aussi être mises en œuvre pour dynamiser la croissance de quelques espèces cibles (cf ci-dessous).

En outre, ce projet a également démontré que la qualité commerciale du peuplement de remplacement reste bonne même avec des taux de prélèvement élevés.

- **La réaction de croissance des espèces d'intérêt commercial**

L'ouverture du peuplement suite à l'exploitation forestière va augmenter la croissance d'une grande majorité d'espèces d'intérêt commercial (tableau ci-dessous). Cependant le gain de croissance diffère selon la taille de l'arbre (exemple : le gain de croissance est élevé pour les jeunes arbres d'angélique (*Dicorynia guianensis*) alors que les plus gros ne réagissent pas).

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Cela souligne l'importance de marquer spatialement les arbres d'avenir et d'organiser le prélèvement en tenant compte de cette information.

La croissance des arbres appartenant aux deux autres principales espèces exploitées (*Sextonia rubra* et *Qualea rosea*) n'augmentent pas après exploitation forestière. Pour le Grignon (*Sextonia rubra*), cette absence de réactions, associée à de faibles effectifs de tiges d'avenir (courbe diamétrique en U), auront pour conséquence une très lente reconstitution du stock d'arbres exploitables pendant la durée de la rotation (65 années en Guyane). Cette espèce ne présentera pas le même potentiel commercial pour le prochain cycle d'exploitation à moins qu'un taux de prélèvement plus faible soit imposé par un relèvement de son Diamètre Minimum d'Exploitabilité.

Réactions de croissance de quelques espèces commerciales après exploitation		
0	++	
<i>Sextonia rubra</i> ((Mez) van der Werff) <i>Qualea rosea</i> (Aubl.) <i>Recordoxylon speciosum</i> (Benoist)	Arbres < 35cm	<i>Carapa procera</i> (A. D.C.) <i>Dicorynia guianensis</i> (Amsh.) Gazel ex Barneby
	Arbres >35 cm	<i>Vouacapoua americana</i> (Aubl.)
	Toutes tailles	<i>Andira coriacea</i> (Pulle) <i>Couratari multiflora</i> ((J.E. Smith) Eyma), <i>Jacranda copaia</i> <i>Manilkara bidentata</i> ((A. DC.) Chevalier)

- La production n'est pas incompatible avec la préservation de la biodiversité

L'exploitation forestière maintient le même nombre d'espèces et la même diversité fonctionnelle pour la communauté d'espèces qui s'est régénérée après exploitation. En revanche la composition de ces espèces est modifiée avec pour conséquences des changements dans la composition fonctionnelle du peuplement. A titre d'exemple, la densité du bois, est en moyenne plus faible pour les espèces se régénérant dans les trouées d'exploitation, réduisant ainsi les capacités de stockage de carbone, en comparaison à la valeur des espèces de forêts non perturbées. D'autres traits fonctionnels, liés à la défense contre l'herbivorie et la tolérance à la sécheresse, ont également des valeurs plus faibles pour les espèces se régénérant dans les trouées.

Ces acquis peuvent être intégrés par le gestionnaire forestier dans des documents de référence qui s'intègrent dans le cadre général du code forestier (mis en place par décret en Guyane depuis 2007) donnant une légitimité à la gestion forestière. Ces documents en cours de préparation devraient être finalisés fin 2009 - début 2010 :

Directive régionale d'aménagement: document qui constitue une base réglementaire et la référence pour la mise en place d'une politique forestière

Charte d'exploitation dans le cadre de la certification : Guide d'exploitation à faible impact pour eco-certification en cours en 2009. La charte est issue d'une démarche de concertation achevée entre les exploitants et l'ONF.

Guide de sylviculture : C'est un document technique qui peut intégrer directement les connaissances acquises dans ce projet sur les modalités de prélèvement et les recommandations pour les espèces commerciales.

Cette étude contribuait aussi aux efforts de l'UMR EcoFoG de communiquer ses résultats de recherche en forêt tropicale humide avec des gestionnaires de l'ONF. La communication s'effectue par plusieurs voies, incluant la participation aux réunions Irista et de l'UMR ; la participation à d'autres projets tels que les (Feder Dygepop et Guyafor) ; et la mise en commun des moyens.

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

Blanc, L., Echard, M., Bonal, D., Marcon, E., Chave, J., Baraloto, C. 2009. Dynamics of aboveground carbon stocks in a selectively logged neotropical rainforest. **Ecological Applications** 19: 1397-1404.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES À PARAÎTRE

Hérault, B., Ouallet, J., Blanc, L., Wagner, F., Baraloto, C. *in review*. Differential species growth response to canopy openings in a neotropical forest: a spatially-explicit approach. Submitted to **Journal of Applied Ecology**.

Baraloto, C., Hérault, B., Paine, C.E.T.P., Massot, H., Blanc, L., Bonal, D., Chave, J., Molino, D.-F., Nicolini, E., Sabatier, D. Logging degrades tropical forest functional composition. Submitted to **Science**.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PRÉVUES

Une publication sur les résultats obtenus sur la distribution des dégâts d'abattage sur le dispositif Paracou (Revue ciblée : **Forest Ecology and Management**)

Une publication sur l'application des résultats du projet pour la gestion des forêts tropicales humides. (Revue ciblée : **Forest Ecology and Management**)

Une publication sur les résultats obtenus sur la distribution de la diversité génétique de *Jacaranda copaia* (Revue ciblée : **Molecular ecology**)

Une publication sur les résultats obtenus sur la distribution de la diversité génétique de *Virola michelii* (Revue ciblée : **Molecular ecology**).

Une publication sur les résultats obtenus sur l'interaction entre stade de développement et taux de croissance et survie des arbres (Revue ciblée : **Ecology**)

PARTICIPATION À DES COLLOQUES NATIONAUX OU INTERNATIONAUX (COMMUNICATION ORALE ET POSTER)

Une présentation invitée de C. Baraloto par le *School of Forest Resources and Conservation* (Université de la Floride) ; novembre 2006

Une présentation invitée de C. Baraloto par Ecofor (Paris) ; octobre 2007

RAPPORTS DE FIN D'ÉTUDE (MÉMOIRES DE MAÎTRISE, DE DEA, THÈSES...)

Hélène Massot AgroParisTech, 2ème année

« Conséquences de l'ouverture de la canopée sur la diversité spécifique et la composition floristique des forêts tropicales humides »

Julia OUALLET AgroParisTech, 2ème année

« Conséquences de l'ouverture de la canopée sur la croissance des arbres »

Ruppert VIMAL Master 2 UAG Guadeloupe

« Diversité génétique et dynamique de la régénération de *Jacaranda copaia* »

William MONTAIGNE Master 2 UAG Guadeloupe

« Effets de l'exploitation sur la structure démographique et génétique de populations de l'arbre forestier *Virola michelii*. »

ACTIONS DE TRANSFERT, DE COMMUNICATION.

Un workshop par l'ONF pour les ouvriers et techniciens du dispositif Paracou en avril 2007.

Contributions à trois documents de l'ONF-Guyane : Directive régionale d'aménagement, Charte d'exploitation dans le cadre de la certification (ONF-exploitant, Guide de sylviculture

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

RÉSUMÉS

En français

RÉSUMÉ

L'ONF (Office National des Forêts), gestionnaire de l'essentiel du patrimoine forestier guyanais a pour mission de veiller à sa conservation et à son « bon usage ». dans un cadre multifonctionnel. En termes d'exploitation, l'ONF a retenu l'option de recourir prioritairement à « une sylviculture extensive en forêt naturelle permettant le maintien d'une structure forestière très proche de celle des forêts primaires, une faible perturbation du couvert forestier (trouées d'exploitation de faible importance) et également la conservation d'un haut niveau de biodiversité ». L'application de ces principes nécessite une connaissance des modifications de l'écosystème forestier en fonction de l'intensité de l'exploitation.

Pour répondre à cette problématique, l'UMR ECOFOG (Ecologie des Forêts de Guyane), en partenariat avec l'ONF, a mis en place ce projet dont l'objectif est de déterminer quelles intensités d'exploitation et quelles répartitions de prélèvement permettent d'optimiser la productivité sylvicole sans compromettre la biodiversité du peuplement forestier.

Ce programme s'appuie principalement sur le dispositif expérimental de Paracou en Guyane française. Paracou est un site important pour la recherche sur la forêt tropicale du fait de sa taille et du recul de 20 ans dont on dispose après l'exploitation. L'originalité de ce projet repose sur l'analyse de la réponse de l'écosystème à un indice de perturbation (taille des trouées d'abattage et la distance au bord de la trouée) plutôt qu'à un indice de prélèvement (intensité d'exploitation). Le projet consiste à déterminer les effets de cet indice sur quatre niveaux de la biodiversité : sur la diversité spécifique ; sur la composition fonctionnelle (les caractéristiques écophysiologiques qui permettent d'expliquer les différences de tempérament et de stratégies en réponse à cette perturbation) ; sur la diversité génétique ; et sur des paramètres de la dynamique forestière (croissance, mortalité et recrutement).

Les trouées d'abattage à Paracou couvrent approximativement 27.8% de la superficie des parcelles exploitées; et la surface des trouées est positivement corrélée avec l'intensité de l'exploitation, avec approximativement 3.5% de superficie convertie en trouées pour chaque 10m³ extrait.

La diversité d'espèces d'arbres recrutés 20 ans après l'exploitation ne diffère pas entre les trouées d'abattage et des zones non-perturbées. Cependant, nous avons trouvé un effet marqué sur la composition floristique. Les analyses préliminaires intégrant des données complémentaires sur des traits fonctionnels suggèrent que les changements de la composition floristique dans les trouées pourraient avoir des implications considérables pour des services d'écosystème : les espèces recrutées ont en effet des densités inférieures en tissu de bois et de feuille.

Nous n'avons trouvé aucune évidence pour un effet des trouées sur la diversité génétique. Cependant, les analyses spatiales indiquent que le degré de consanguinité des juvéniles en zones exploitées apparaît plus fort que dans la génération de leurs parents potentiels et chez les juvéniles issus de la régénération en zone non exploitée.

La plupart des espèces(31 de 43) montrent une augmentation de croissance en trouées. Mais les taux de croissance varient avec la taille d'arbre.

L'ensemble de ces résultats illustrent la modification significative de la structure et de la diversité des forêts suite aux changements de régime de perturbations accompagnants l'exploitation forestière. Pour maintenir l'intégrité des forêts aménagées, des techniques d'exploitation à faible impact qui limitent la fréquence et la taille des trouées, devraient être utilisées. En outre, le projet a fourni un transfert de l'information qui doit permettre l'amélioration des inventaires forestiers en Guyane française.

MOTS CLÉS

exploitation forestière, REDD, gestion durable, richesse spécifique, diversité génétique, traits fonctionnels, forêt tropicale humide, Paracou, Guyane Française

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

In English

ABSTRACT

ONF (Office National des Forêts) manages the majority of the public territory in French Guiana, most of which is covered in lowland tropical rain forest. Its objectives include stewardship for responsible resource use and forest conservation. To this end, ONF must adapt management restrictions, especially concerning timber harvest, that are sustainable in that they maintain forest structure and biodiversity. The definition of these criteria requires integration of ecological data reporting the effects of different timber extraction practices and intensities.

To contribute to the development of these criteria, the UMR ECOFOG (Ecologie des Forêts de Guyane) carried out this project in collaboration with ONF, to examine which timber harvest methods represent the best compromise between timber production and stand integrity in French Guianan tropical forests.

The project is based on the unique large datasets compiled by CIRAD and collaborators at the Paracou experimental station in French Guiana, where more than 70,000 trees have been censused for a twenty-year period following selective logging at various intensities with and without timber stand improvement treatments of poison thinning. The project is original because it is based on a spatially explicit approach made possible by maps of all logging damage created during timber felling and skidding operations that have been integrated into a GIS database with plot censuses. We examined the extent to which logging gaps affect four factors describing forest biodiversity: woody plant diversity, woody plant functional composition, timber tree genetic diversity, and timber tree dynamics (growth, mortality and recruitment).

At Paracou, logging gaps covered approximately 27.8% of the surface area of logged plots; and gap surface area is significantly positively correlated with timber harvest intensity, with approximately 3.5% of surface area converted to gap for each 10m³ extracted.

Logging gap habitats did not affect species diversity of recruited trees after 20 years. However, we found a marked effect on species composition with very high species turnover between former logging gaps and areas undisturbed by logging. Analyses integrating complementary data on tree functional traits suggest that changes in floristic composition in logging gaps may have considerable implications for ecosystem services because recruited species have lower wood and leaf tissue densities.

We found no evidence for changes in the genetic diversity timber tree species in logged vs. unlogged plots. However, spatial analyses reveal strong aggregation of half-sib juveniles in logging gaps relative to undisturbed areas, suggesting the potential for some genotypes to become dominant in subsequent rotation cycles.

Most (31 of 43) timber tree species grew faster when nearer to logging gaps. However, growth rates varied substantially with tree size, suggesting that species-specific harvest prescriptions may be necessary to ensure that future crop trees take advantage of light availability provided by logging gaps and timber stand improvement treatments.

Taken together, these results illustrate substantial modification of forest structure and diversity with logging due to changes in canopy gap regimes. To maintain the integrity of managed tracts, reduced-impact logging techniques that limit canopy openings should be employed, and harvest intensities should be maintained at moderate levels.

In addition, the project provided a transfer of information that has permitted the development of revised forest inventories in French Guiana with improved botanical and tree architectural considerations.

KEY WORDS

selective logging, REDD, sustainable forest management, species richness, genetic diversity, functional traits, tropical forest, Paracou, French Guiana

**INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE
DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA
DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE**

RAPPORT SCIENTIFIQUE

**INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET
DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN
FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET
LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE**

PROGRAMME BIODIVERSITÉ ET GESTION FORESTIÈRE

Nom du responsable scientifique du projet

Dr. Christopher BARALOTO, Chargé de Recherche INRA
Unité Mixte de Recherche Ecofog « Ecologie des forêts de Guyane » (CNRS, Cirad, Engref, INRA)

NOMS DES AUTRES PARTENAIRES SCIENTIFIQUES BÉNÉFICIAIRES

INRA, Unité Mixte de Recherche « Ecologie des forêts de Guyane » (Ecofog) Cnrs, Cirad, Engref, Inra Kourou, BP 709, 97387 Kourou Cedex; Tél : 0594 329300, fax : 0594 324302

CIRAD, Département Forêt, Unité Mixte de Recherche « Ecologie des forêts de Guyane » (Ecofog) Cnrs, Cirad, Engref, Inra, BP 701, 97387 Kourou Cedex; Tél : 0594 327350, fax : 0594 327351

CIRAD, Département Amis, Unité Mixte de Recherche, UMR Cirad-Cnrs (5120)-Ephe-Inra(931)-Ird(123)-Univ. Montpellier 2, "botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes (AMAP)", TA40/PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 5, tél : 04 67 61 75 47 ; fax 04 67 61 56 68

IRD, Unité Mixte de Recherche, UMR Cirad-Cnrs (5120)-Ephe-Inra(931)-Ird(123)-Univ. Montpellier 2, "botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes (AMAP)", TA40/PS2, Boulevard de la Lironde, 34398 Montpellier cedex 5; tél : 04 67 61 75 47 ; fax 04 67 61 56 68

ONF, Délégation régionale de Guyane, Pôle technique, BP 7002, 97 307 Cayenne cedex; tél : 05 94 25 53 95, fax : 05 94 30 18 63

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Matériels et Méthodes Générales

Ce programme de recherche a été mené sur le dispositif permanent de Paracou où de nombreuses études ont déjà été conduites (Gourlet-Fleury *et al.* 2004). Le dispositif de Paracou comprenait dans sa phase initiale 12 parcelles de 6,25 ha (9 ha avec la zone tampon) réparties en parcelles témoins et trois types de traitement d'intensité croissante¹, avec trois répétitions de chaque cas. Les interventions sylvicoles ont été effectuées en 1986 et 1987. Depuis, le dispositif a été complété par l'adjonction de trois parcelles de 6.25 ha et une de 25 ha installées en forêt non-perturbées. Dans chaque parcelle, les arbres de plus de 10 cm de diamètre ont été cartographiés. Les 3 composantes de la dynamique forestière (accroissement, mortalité et recrutement) sont suivies depuis 1984 pour les 12 premières parcelles et depuis 1991 pour les autres. L'amélioration des identifications botaniques des arbres est en cours, rendue nécessaire par le fait que les premières identifications étaient focalisées sur les espèces commerciales uniquement.

Pour chacune des cinq actions du projet, on présente ici un résumé des méthodes et des principaux résultats.

Action 1. Les zones d'impacts de l'exploitation et l'intensité de prélèvement

• Aspects méthodologiques

Outre les données sur les arbres, plusieurs types de données caractérisant l'environnement des parcelles étaient disponibles au début du projet:

- la topographie
- une cartographie des criques et des zones de bas-fonds
- une cartographie des dégâts (trouées, pistes de débardage) consécutifs aux traitements sylvicoles faite par le technicien Cirad L. Schmitt pendant l'exploitation en 1986-1987.

Nous avons combiné deux ensembles de données de SIG pour analyser les types de perturbation après l'exploitation à Paracou. Dans les neuf parcelles exploitées, tous les dégâts associés à l'exploitation ont été tracés sur le papier en 1986-1987. Les lignes étaient tirées, basées sur des positions d'arbre avec une précision d'environ 1 m.

Lors du projet on a trouvé des informations relevés sur le volume de chaque morceau de grume qui a été débardé lors des activités de l'exploitation en 1986-1987. Cette base de données nous a permis de calculer les taux de prélèvements pour toutes les parcelles exploitées. Vu l'hétérogénéité spatiale de ces taux de prélèvements même au sein d'une parcelle recevant un traitement sylvicole, on a choisi de travailler sur les surfaces réduites des carrés des parcelles (1.56 ha) pour nos analyses.

• Résultats et discussion

La construction du SIG a intégré deux couches pour ce projet (Figure 1.1) :

- Couche des dégâts : ce sont les trouées entourées de leurs couronnes de perturbations. Il existe 405 polygones de dégâts. La couronne de perturbation autour d'une trouée se définit par la zone entre le périmètre de la trouée et la limite des arbres abimés ou présentant une anomalie due à l'exploitation.
- Couche des pistes hors dégâts: Il y a 242 tronçons de pistes reliant les zones de dégâts entre elles. Leur géométrie (polygone long et étroit) est très différente de celle des dégâts.

Grace au SIG, une ouverture donnée peut être décrite par sa surface (m²), son périmètre (m), sa fréquence par parcelle et par carré, son type, etc. autant d'éléments permettant de caractériser l'environnement local perturbé autour d'un arbre sujet. Les trouées représentent 27.79 % de la surface des neuf parcelles traitées (56,25 ha) alors que les pistes (hors dégâts) représentent 13.15 %.

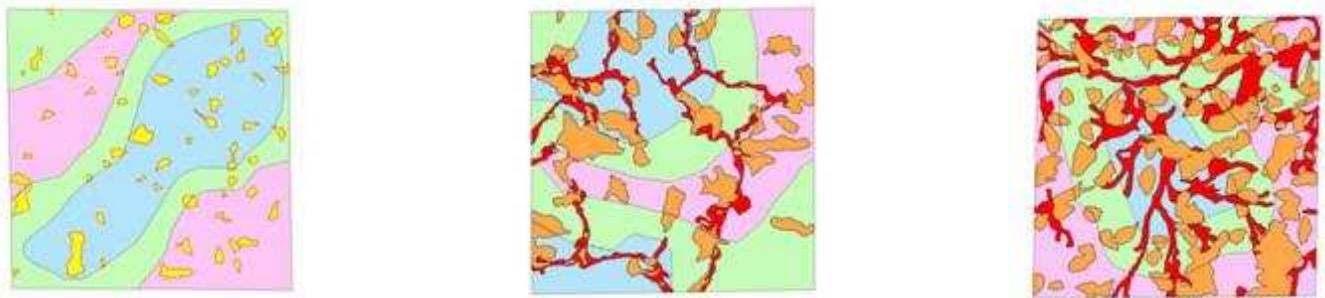


Figure 1.1. Exemples de perturbation de l'exploitation forestière dans trois parcelles de 6.25 ha à Paracou représentant un gradient de l'intensité de l'exploitation (de gauche à droite, P15, 0 m³ ha⁻¹ ; P5, 20 m³ ha⁻¹ ; P8, 69 m³ ha⁻¹). Des chablis naturels (jaunes) et trouées d'abattage (orange) ainsi que les pistes de débardage (rouge) ont été identifiées en 2001 (P15) et 1987. Des strates topographiques ont été définies comme plateau (bleu), pente (vert) et bas versant (rose).

On estime l'intensité de prélèvement à partir des volumes de grumes débardés dans chaque carré de parcelle de 1.56 ha. La surface convertie en trouées et bords de trouées est positivement corrélée avec l'intensité de l'exploitation (Fig. 1.2). Pour un de taux de prélèvement moyen de 23 m³ ha⁻¹ (valeur enregistrée en Amazonie), le pourcentage de surface de trouées est de 20%. Une augmentation du taux de prélèvement génère des trouées de plus en plus grandes, avec de moins en moins de bord de trouée.

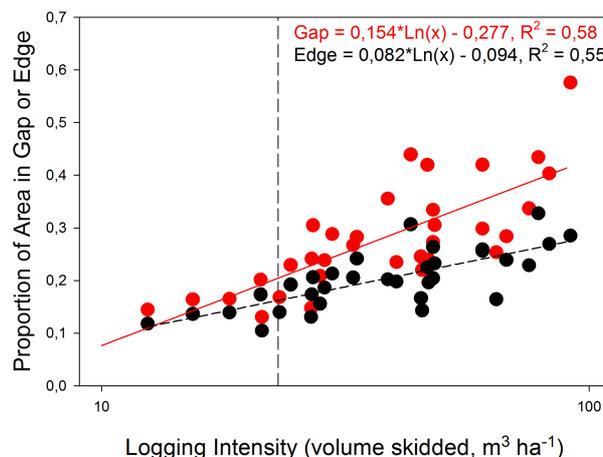


Figure 1.2. Relations entre intensité de prélèvement (échelle log) et surface convertie en trouées (points rouges) et bords de trouées (points noirs). La ligne verticale représente la moyenne de taux de prélèvement pour Amazonie (23 m³ ha⁻¹)

Action 2. Conséquences des trouées d'abattage sur la diversité spécifique et la composition floristique

• Aspects méthodologiques

Pour étudier comment la communauté d'arbres a été modifiée après l'exploitation, on a ciblé un échantillonnage sur les trouées et les bords de trouées pour les arbres de DBH compris entre 2 et 10 cm de diamètre. Cette population, dans sa majorité, s'est établie après la perturbation et a donc subi son influence. Même s'il n'y a pas de lien direct entre le diamètre des individus et leur âge, les individus de cette classe diamétrique sont en effet principalement des juvéniles. Le diamètre maximum doit cependant être suffisamment grand pour inclure les arbres qui ont été influencés dans les premiers stades de la perturbation, c'est-à-dire au moment où elle était la plus importante. Au moment de nos inventaires, en 2006-2008, il y avait deux observations indiquant que cette

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

communauté de jeunes arbres était bien représentative de celle qui prendra la suite des grands arbres pendant la fin de ce cycle de rotation : (i) les taux de recrutement des grands arbres >10 cm DBH ont atteint un équilibre en 2003 pour la première fois depuis l'exploitation ; et (ii) la dynamique des jeunes arbres, suivis depuis 1987, indiquait des taux de recrutement et de mortalité stables depuis 2001.

Afin de pouvoir capter l'effet des trouées sur tout le gradient de types de forêts, on a stratifié notre échantillonnage pour prendre en compte les effets possibles de la composition floristique locale et de la topographie. La composition floristique des arbres matures a une influence sur le recrutement par le biais de la dissémination des graines et donc la communauté étudiée. La topographie a également un effet sur la composition floristique à une échelle plus locale en modifiant le drainage. Trois blocs de composition floristique similaire, correspondant aux 3 ensembles de parcelles mises en place à l'origine à Paracou, et deux niveaux topographiques correspondant à un drainage différent sont utilisés :

- les pentes sur lesquelles la densité de tiges parait plus importante, leur taille plus faible et la présence des lianes plus importantes,
- les plateaux.

Les zones de bas-fond n'ont pas été étudiées car elles sont peu exploitées et parce qu'elles présentent une composition floristique éloignée de celle des pentes et plateaux.

Comme les surfaces des trouées étaient de taille et de forme très variées, on a choisi d'échantillonner tous les individus qui se trouvaient dans ces zones dans les blocs concernés, et de prendre un échantillonnage de distribution spatiale similaire pour les zones hors perturbations. On a échantillonné environ 250 tiges dans chacun des six répétitions par habitat (forêt, bordure de trouée, centre de trouée).

• Résultats et discussion

2.1 Effets sur la diversité spécifique

Les courbes de raréfaction obtenues sont dispersées de façon homogène sans tendance particulière permettant de conclure à un effet nul des perturbations d'exploitation sur la diversité (Fig. 2.1). Le nombre d'espèces différentes échantillonnées dans une zone délimitée sur le terrain augmente en fonction du nombre d'individus échantillonnés dans cette zone. Les différents habitats ne se distinguent pas.

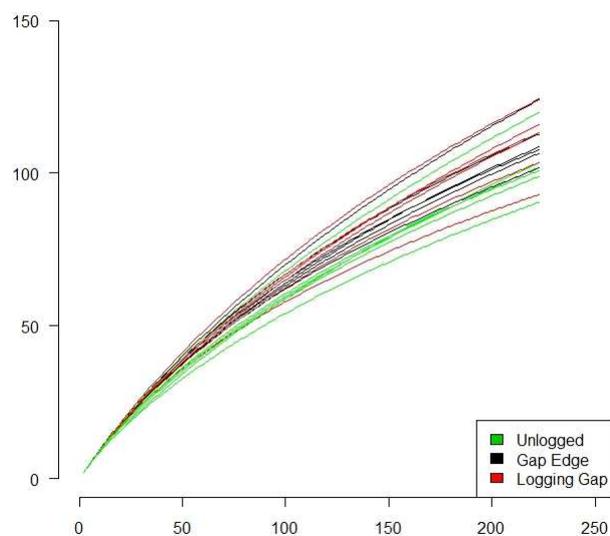


Figure 2.1. Courbes espèces-individus raréfiées pour les 6 échantillons dans les trois habitats. Les richesses ne diffèrent pas entre les trois habitats (test de Kruskal-Wallis, $p > 0.10$)

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Les indices de diversité spécifique confirment cette observation (Fig. 2.2). Les trouées ont tendance à avoir une richesse plus élevée que les autres zones, mais cette tendance n'est pas statistiquement significative.

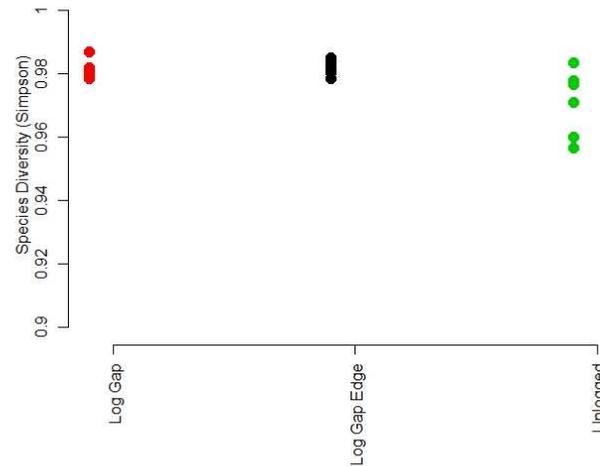


Figure 2.2. Indices de diversité de Gini-Simpson pour les 6 échantillons dans les trois habitats. Les valeurs ne diffèrent pas entre les trois habitats (test de Kruskal-Wallis, $p > 0.10$).

2.2 Effets sur la composition floristique

L'exploitation forestière maintient le même nombre d'espèces pour la communauté d'espèces qui s'est régénérée après exploitation. En revanche la composition de ces espèces est bien modifiée, ce qui est très clair lorsqu'on regarde l'ordination des échantillons par habitat dans une analyse factoriel de correspondance (Fig. 2.3).

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

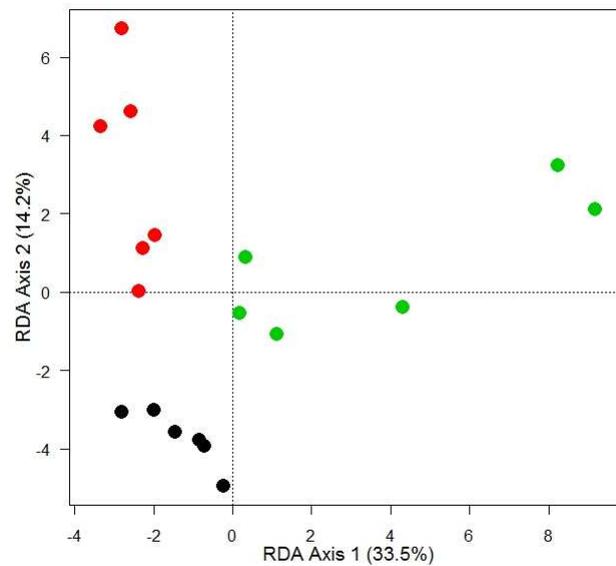


Figure 2.3. Analyse factorielle des correspondances sur la composition floristique qui permet de distinguer les habitats de trouées (rouge) bord de trouée (noir) et forêt (vert).

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

2.3 Espèces indicatrice des différents milieux

Les espèces indicatrices des différents habitats sont à la fois des espèces communes (4 espèces) et des espèces peu fréquentes. 15% des individus échantillonnés font partie de ces espèces. Les espèces localisées correspondent (i) dans les trouées, aux espèces traditionnellement considérées comme héliophiles (*Schefflera decaphylla* *Jacaranda copaia*) et (ii) en forêt, aux espèces considérées comme tolérantes à l'ombre (*Oxandra asbeckii*, *Astrocaryum sciophilum*, *Swartzia panacoco*, *Anaxagorea dolichocarpa*).

Malgré une composition floristique différente et un type de drainage différent, la présence d'une perturbation conduit la communauté à un type particulier de végétation qui s'exprime principalement par un cortège spécifique particulier plutôt que par une variation des abondances des espèces antérieurement présentes. La limitation par le recrutement, qui se traduit par l'effet des blocs de composition, n'empêcherait donc pas l'installation d'une flore spécifique (composition globale et espèces indicatrices). La présence des trouées d'abattage est donc à l'origine d'une mosaïque de zones de compositions floristiques différentes. Par conséquent, la diversité à une plus grande échelle spatiale que celle étudiée, c'est-à-dire la diversité bêta, est probablement augmentée par l'exploitation de ce fait.

Tableau 2.1 Liste des espèces associées préférentiellement à un habitat.

espèce	localisation préférentielle	nombre d'individus échantillonnés			Significativité du test
		forêt	bordure	centre	
<i>Oxandra asbeckii</i>		152	44	21	0.0029
<i>Astrocaryum sciophilum</i>		10	1	0	0.0270
<i>Swartzia panacoco</i>	forêt	8	1	2	0.0297
<i>Anaxagorea dolichocarpa</i>		69	49	15	0.0333
<i>Mouriri crassifolia</i>		3	5	1	0.0142
<i>Couepia cf. harbrantha</i>		0	3	0	0.0147
<i>Hirtella sp. BGF 3</i>		0	6	0	0.0148
<i>Inga capitata</i>		0	7	0	0.0148
<i>Schefflera decaphylla</i>		1	15	11	0.0221
<i>Jacaranda copaia</i>	bordure	1	14	9	0.0227
<i>Abarema jupunba</i>		0	5	1	0.0270
<i>Pouteria grandis</i>		2	6	2	0.0332
<i>Sterculia pruriens</i>		4	26	18	0.0350
<i>Cordia sagotii</i>		1	19	15	0.0433
<i>Cupania scrobiculata</i>		3	3	21	0.0002
<i>Miconia sp. BGF 2</i>		0	0	7	0.0151
<i>Talisia megaphylla</i>		3	0	4	0.0153
<i>Cupania scrobiculata</i>		0	6	8	0.0209
<i>Cecropia obtusa</i>	centre	0	2	6	0.0314
<i>Inga sarmentosa</i>		3	3	12	0.0325
<i>Rhodostemonodaphne grandis</i>		2	3	8	0.0331
<i>Xylopia nitida</i>		0	26	33	0.0465

Cependant, le nombre d'espèces indicatrices est relativement limité par rapport au nombre total d'espèces, ce qui relativise les effets observés précédemment. Les résultats obtenus sur les espèces indicatrices sont cohérents avec les résultats sur les compositions floristiques.

Action 3. Conséquences des trouées d'abattage sur la composition fonctionnelle

• Aspects méthodologiques

La biodiversité ne se résume pas simplement à un indice de diversité ou à une richesse spécifique. Son importance pour les services rendus par les écosystèmes dépend plutôt de sa composition et/ou de la diversité fonctionnelle. Dans cette action on a intégré aux données de l'Action 2 des informations de traits fonctionnels obtenues dans d'autres projets complémentaires de notre équipe et disponible dans une base de données des traits fonctionnels des arbres tropicaux, Mariwenn, accessible sur le site de l'UMR EcoFoG.

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

L'hypothèse testée dans cette action est que l'ouverture des trouées change non seulement la composition floristique, mais aussi la diversité fonctionnelle et/ou la composition fonctionnelle basée sur des caractéristiques écophysiologiques des espèces.

• Résultats et discussion

L'exploitation forestière maintient non seulement la même diversité spécifique mais aussi la même diversité fonctionnelle pour la communauté d'espèces qui s'est régénérée après exploitation (Fig. 3.1).

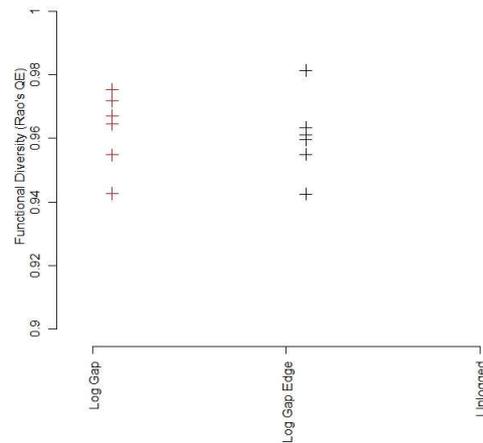


Figure 3.1. Indices de diversité Rao basées sur la dissimilarité fonctionnelle des espèces pour les 6 échantillons dans les trois habitats. Les valeurs ne diffèrent pas entre les trois habitats (teste de Kruskal-Wallis, $p > 0.10$).

En revanche la composition de ces espèces modifiée a pour conséquences des changements dans la composition fonctionnelle du peuplement (Tab. 3.1 ; Fig. 3.2-3.3). A titre d'exemple, la densité du bois, est en moyenne plus faible pour les espèces se régénérant dans les trouées d'exploitation, réduisant ainsi les capacités de stockage de carbone, en comparaison à la valeur des espèces de forêts non perturbées. D'autres traits fonctionnels, liés à la défense contre l'herbivorie et la tolérance à la sécheresse, ont également des valeurs plus faibles pour les espèces se régénérant dans les trouées.

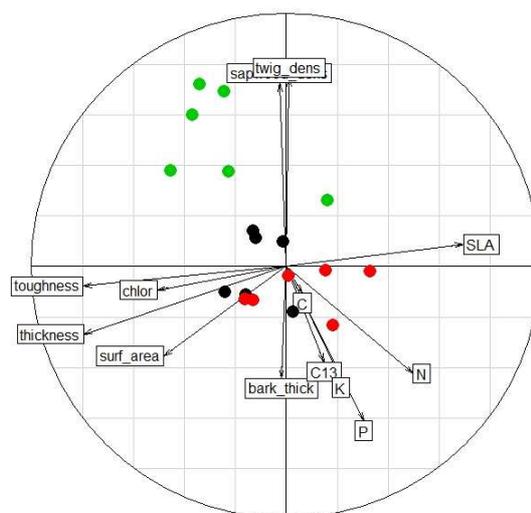


Figure 3.2. Analyse en composantes principales qui montrent les corrélations entre les traits fonctionnels mesurés et l'ordination des échantillons de jeunes tiges de l'Action 2 : trouées (rouge) bord de trouée (noir) et forêt (vert).

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Tableau 3.2 Liste des des traits fonctionnels et leurs valeurs moyennes dans chacun des trois habitats Des valeurs de testes de Kruskal-Wallis sur l'effet de l'habitat sont indiqués dans la dernière colonne.

Trait Fonctionnel	unit	Log Gap	Gap Edge	Unlogged	z
Leaf Thickness (Lf Thick)	µm	239	243	245	4.67
Leaf Toughness (Lf Tough)	N	1.66	1.75	1.89	12.12**
Laminar Surface (Lf Area)	cm ²	185	183	169	4.26
Total Chlorophyll (Tot Chl)	µg mm ⁻²	74.7	75.7	74.3	1.56
Specific Leaf Area (SLA)	cm ² g ⁻¹	29.5	29.1	28.8	0.78
Foliar N (Lf N)	%	2.12	2.11	2.03	6.12*
Foliar C (Lf C)	%	47.8	48.0	47.7	0.74
Foliar P (Lf P)	‰	0.62	0.60	0.57	13.93**
Foliar K (Lf K)	‰	4.64	4.50	4.49	2.89
Foliar ¹³ C composition (Lf ¹³ C)	‰	-32.15	-32.14	-32.24	2.85
Trunk Xylem Density (Trunk Dx)	g cm ⁻³	0.64	0.64	0.68	11.66**
Branch Xylem Density (Branch Dx)	g cm ⁻³	0.60	0.61	0.64	11.56*
Bark Thickness (Bark)	mm	4.28	4.35	4.07	6.50*
PCA Axis 1 - Leaf Economics					6.77*
PCA Axis 2 – Stem Economics					11.94**

* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001

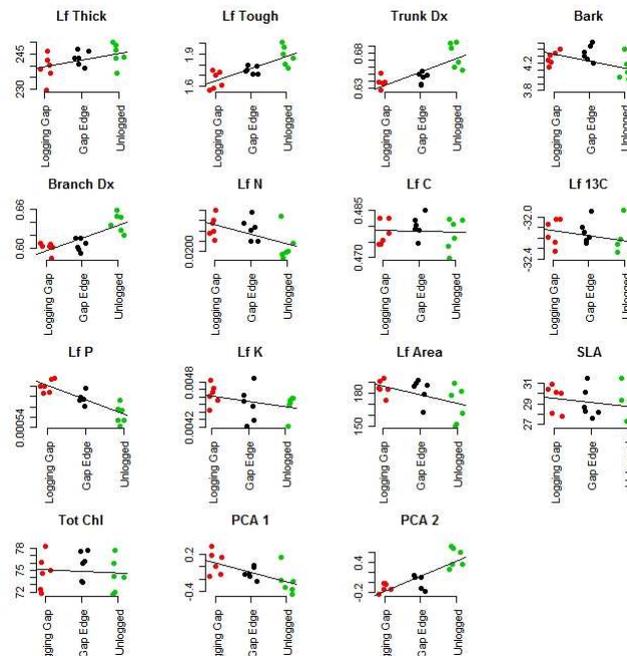


Figure 3.3 Valeurs des traits fonctionnels des espèces en fonction des habitats après l'exploitation. Les valeurs de traits des espèces ont été appliquées aux échantillons de jeunes tiges de l'Action 2.

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Action 4. Conséquences des trouées d'abattage sur la diversité génétique

• Aspects méthodologiques

L'action 4 de ce programme porte sur l'analyse de l'effet des changements environnementaux, causés par l'exploitation, sur la diversité génétique d'espèces héliophiles sans dormance des graines. Nous rappelons que ce choix d'espèces dépend de deux contraintes expérimentales, que nous nous sommes imposés afin de pouvoir plus clairement interpréter les données : d'un côté, l'absence de dormance permet d'attribuer l'implantation des semis dans les trouées d'exploitation à des graines issues d'une fructification contemporaine ou successive à l'exploitation ; de l'autre côté, le choix d'espèces héliophiles nous a permis de travailler sur des grands effectifs et donc nous a garanti que la puissance des tests statistiques serait suffisante.

La logique générale de la démarche est de comparer la structure de la diversité génétique entre la régénération dans les trouées et hors trouée, et entre parcelles à l'intensité croissante d'exploitation. Le programme comportait donc une phase de génotypage des juvéniles et des adultes de chaque espèce, suivie d'une phase d'analyse des données en trois parties : (a) analyse de la structuration spatiale des génotypes ; (b) analyse des relations de parenté entre adultes et juvéniles ; (c) analyse de la diversité génétique et de l'impact de l'exploitation sur cette dernière.

Le programme original prévoyait une analyse comparée sur trois espèces : *Jacaranda copaia*, *Virola michelii* et *Dicorynia guianensis*. Les résultats obtenus sont détaillés ci-dessous, mais un bilan général de la correspondance du travail accompli et des résultats obtenus avec le programme prévu, et une justification des éventuels écarts entre les premiers et les derniers, sont nécessaires ici.

L'analyse génétique des effets de l'exploitation, dans le cas de ce projet, devait être nécessairement *exhaustive* : tous les individus des parcelles devaient être échantillonnés et analysés car le but est d'obtenir un suivi de la diversité génétique *réalisée*, et d'en modéliser l'évolution jusqu'au stade adulte. Or nous avons constaté que la réalité du terrain s'écartait à la hausse de nos estimations de densités moyennes de tiges par unité de surface : globalement, nous avons récolté du matériel biologique pour 700 tiges de *J. copaia* sur l'ensemble des parcelles, et de 600 tiges de *V. michelii* sur une parcelle exploitée et une parcelle témoin (nous avons en plus estimé que le nombre de tiges de cette espèce, présentes sur les deux autres parcelles, s'élève à plus de 1200 tiges). Nous avons également rendu disponibles à ce projet 400 échantillons de *D. guianensis* des quatre parcelles, ce qui représente un échantillonnage non exhaustif. Le financement obtenu ne nous permettant pas de récolter, stocker et géotyper la totalité des tiges présentes sur le dispositif (pour un total d'au moins 2500 individus), nous avons fait le choix de nous concentrer sur deux espèces (*J. copaia* et *V. michelii*) et de n'analyser que deux parcelles pour la seconde. Concernant les activités d'analyse moléculaire, nous avons constaté des limitations liées vraisemblablement à la structure du génome des espèces étudiées. Pour *J. copaia*, le génotypage basé sur neuf marqueurs microsatellites a été complété (produisant globalement $9 \times 700 \times 2 \cong 12000$ points-donnée). Toutefois, l'analyse de ces données a révélé un taux très élevé d'homoplasie entre allèles, qui nous a obligés à étudier en détail la structure des données (Barthes 2009) et nous interroge sur la possibilité de les utiliser de façon efficace pour les analyses de parenté. Concernant *V. michelii*, l'analyse de la diversité génétique de dix marqueurs microsatellites a fait état d'un niveau de polymorphisme pratiquement nul (Montaigne 2008), qui a été par ailleurs confirmé par une prospection de la diversité de marqueurs microsatellites chloroplastiques. Si cela représente en soi un résultat du programme, il a empêché l'utilisation de ces marqueurs pour les fins affichées. Nous nous sommes donc tournés vers un système de marquage génétique multi-locus (AFLP) qui, tout en confirmant le faible niveau de polymorphisme de *V. michelii* à l'échelle du génome, a enfin permis d'accéder à un niveau de polymorphisme suffisant pour mener les analyses espérées (permettant d'obtenir $600 \times 150 \cong 90000$ points-donnée), tout en entraînant un retard considérable sur l'avancement du programme. De plus, le passage d'un système de marquage multi-allélique et codominant à un système bi-allélique dominant nécessite une réflexion méthodologique ultérieure.

Il faut enfin prendre en compte un évènement extrascientifique, mais qui a eu un impact considérable sur la possibilité de mener à bien la mise au point des outils analytiques nécessaires dans les temps prévus par ce programme. La mort tragique à cause d'un accident de la route de Thomas Leclerc, étudiant d'école d'ingénieur qui travaillait à la programmation des analyses statistiques, survenue à Cayenne en mai 2007, a marqué un coup d'arrêt durable de cette partie du projet.

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

• Résultats et discussion

Résultats pour *J. copaia*

La diversité génétique, exprimée par le paramètre de Nei (1972) mesuré sur quatre marqueurs microsatellites, ne diffère pas entre parcelles selon le niveau d'exploitation (Vimal 2007 ; figure 4.1). Aucune valeur ne diffère significativement des autres pour un marqueur donné). Une analyse plus approfondie, à l'échelle de la trouée individuelle, et en fonction des effectifs observés, permettra d'évaluer plus précisément le rôle de la dynamique démographique locale dans l'évolution des niveaux de diversité. En revanche, la structuration spatiale de la diversité génétique est affectée par l'exploitation : les patrons d'autocorrélation spatiale (figure 4.2) montrent clairement que la distribution de la similarité des génotypes pour une classe de diamètres inférieure à 10 cm n'est pas la même pour les individus dans et à l'extérieur des dégâts d'exploitation.

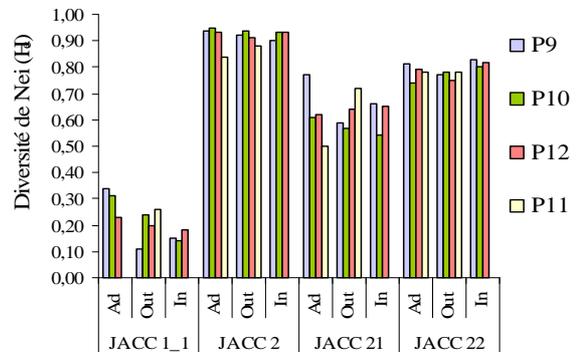


Figure 4.1

Ces résultats montrent que, pour les semis hors perturbation, la structure spatiale est absente, bien que dans la classe des adultes elle puisse émerger. En revanche, les semis après perturbation montrent déjà une structure très marquée, qui pourrait donc évoluer, à l'âge adulte, vers des « patch » de tiges très uniformes génétiquement. Une simulation de l'évolution de l'autocorrélation, par élimination aléatoire de tiges juvéniles jusqu'à atteindre la densité des adultes, permettra de donner des indications sur cette question.

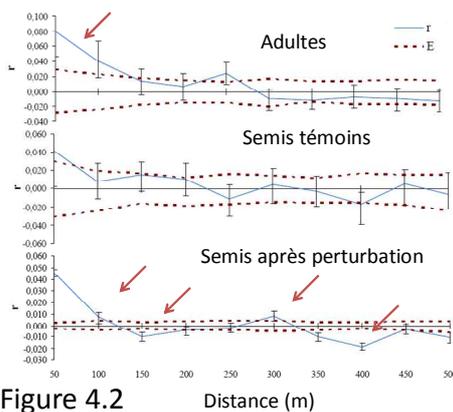


Figure 4.2

L'altération de la distribution observée de la diversité génétique est également montrée par la comparaison des taux de consanguinité (tableau 4.1) et du nombre de déséquilibres de liaison entre marqueurs (figure 4.3) des individus juvéniles dans les parcelles selon le niveau d'intensité de l'exploitation (Scotti et al. 2008). Dans les deux cas, une augmentation est observée avec l'intensité de l'exploitation. L'augmentation du coefficient de consanguinité peut dériver du croisement préférentiel entre individus génétiquement proches (qui seraient, selon le résultat de l'autocorrélation, des proches voisins), et l'augmentation du déséquilibre de liaison est compatible avec la présence de « paquets » de semis apparentés (à vérifier avec l'analyse de parenté). La tendance générale qui émerge de ces résultats est donc que, si la diversité génétique globale n'est pas affectée par l'exploitation, sa distribution spatiale et sa répartition entre individus en résulte fortement altérée. La nouvelle génération de semis, issus de la régénération après perturbation, apparaît plus consanguine, plus apparentée, plus structurée dans l'espace, avec des conséquences pour l'instant non connues sur la structure et la viabilité génétique de la future génération adulte. Des analyses de simulation, qui prennent en compte la diversité existante et la fassent évoluer sur plusieurs générations, pourront indiquer la direction potentielle d'évolution de la structure génétique.

L'altération de la distribution observée de la diversité génétique est également montrée par la comparaison des taux de consanguinité (tableau 4.1) et du nombre de déséquilibres de liaison entre marqueurs (figure 4.3) des individus juvéniles dans les parcelles selon le niveau

	AD				OUT				IN			
	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄
JACC1-1	-	0,105	0,102	-0,009	-0,009	-0,006	-0,078	-0,084	-	0,022	0,072	-0,016
JACC2	0,250	0,098	0,108	0,087	0,300**	0,002	0,080*	0,191	-	0,009***	0,071**	0,063***
JACC21	-0,186	-0,028	0,343***	0,178**	0,550***	0,465***	0,211	0,080	-	0,104**	0,197**	0,087
JACC22	0,182	-0,213	0,085	0,123	-0,075	0,047	-0,066	0,084*	-	0,011	-0,005	0,008***

Tableau 4.1

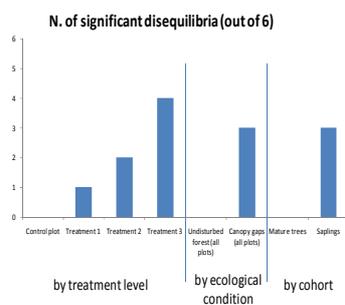
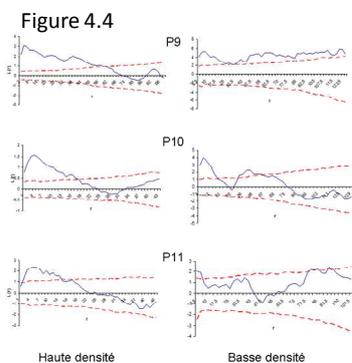


Figure 4.3

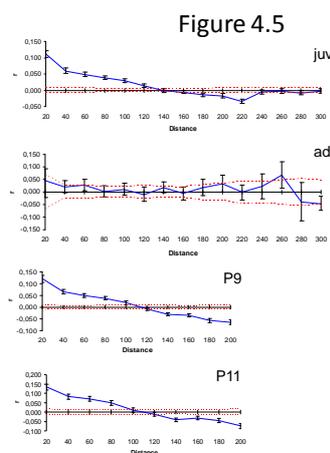
INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Résultats pour *V. michelii*

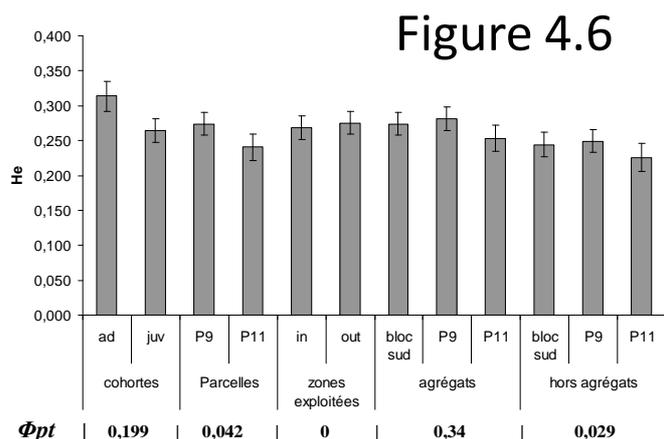
La distribution observée sur le terrain pour les semis de *V. michelii* est beaucoup plus diffuse que celle de *J. copaia*. De plus les regroupements de tiges correspondent de façon beaucoup moins nette aux dégâts que dans le premier cas. Une analyse de type « Ripley » s'est donc rendue nécessaire pour



établir si les tiges formaient des agrégations reconnaissables (figure 4.4 ; Montaigne 2008). Cette analyse a permis de prouver que le semi de points est nettement plus structuré après exploitation qu'avant. En revanche, *V. michelii* semble nécessiter moins de lumière que *J. copaia*, et peut donc s'établir plus facilement dans des trouées naturelles ou de taille réduite. Cela semble avoir par ailleurs des conséquences sur les comparaisons de l'autocorrélation spatiale entre zones en trouée et hors trouée : ici les différences entre les deux cohortes juvéniles sont absentes, bien que la cohorte adulte diffère fortement de celles des semis. (Figure 4.5). On peut donc tirer la conclusion, pour le moment provisoire et à valider avec la



modélisation du processus, que dans le cas des espèces héliophiles l'altération de la structure génétique spatiale provoquée par l'exploitation est fonction de l'affinité à la lumière : une espèce, comme *V. michelii*, capable de profiter des petites trouées naturelles, a déjà en l'absence de l'exploitation une structure génétique spatiale proche de celle après exploitation, ce qui n'est pas le cas chez des espèces, comme *J. copaia*, dont la dynamique démographique est fortement accélérée par les grandes ouvertures. En revanche, un effet visible de l'exploitation sur la diversité génétique de *V. michelii*, analogue à ce qui a été observé pour *J. copaia*, concerne la distribution de la diversité génétique. Les niveaux de diversité génétique sont inchangés (Figure 4.6, haut) mais la divergence génétique entre groupes d'individus installés dans les différentes parties du dispositif (exprimée par Φ_{PT} , figure 4.6, bas) est clairement fonction de la présence des effets de l'exploitation. On peut en particulier remarquer que la valeur de la différenciation entre groupes est dix fois plus grande entre parcelles quand on compare les agrégats (associés aux trouées) que si on compare les zones non perturbées ; en d'autres termes, les zones non perturbées semblent représenter une population homogène, alors que les *V. michelii* qui s'installent dans les trouées forment des groupes d'individus très divergents entre eux. Cette situation pourrait engendrer une structuration spatiale des futurs adultes qui ne se retrouve pas aujourd'hui. Les analyses de consanguinité et de déséquilibre de liaison n'ont pas pu être menées sur *V. michelii* car les marqueurs utilisés (AFLP) sont dominants et ne permettent donc pas de distinguer les deux allèles d'un locus donné.



En conclusion, les analyses menées jusqu'ici semblent indiquer une tendance générale : les niveaux de diversité sont inchangés avec l'exploitation, mais la distribution de la diversité à l'intérieur des individus, entre les groupes d'individus et à l'échelle du massif sont profondément altérées, et cela d'autant plus pour les espèces plus héliophiles. Nous ne connaissons pas les conséquences possibles de ces phénomènes sur les générations futures, mais ils sont clairement observables pour les deux espèces que nous avons étudiées.

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Plan des analyses à compléter

Une partie des analyses statistiques sur les données obtenues reste à compléter. En particulier : (a) une analyse formelle de parenté devra confirmer ou réfuter l'observation préliminaire que des groupes d'individus apparentés (par exemple, des groupes de graines issues du même arbre mère) se sont installés dans les trouées ; (b) une analyse par permutation des niveaux de diversité dans et en dehors des trouées, qui prenne en compte des méthodes de raréfaction, devra valider l'observation que la diversité génétique n'est pas affectée par l'exploitation ; (c) un travail de simulation « forward » devra permettre d'étudier l'évolution de la diversité génétique (et de sa distribution spatiale) avec le passage des semis observés aujourd'hui à la phase adulte.

Action 5. Conséquences des trouées d'abattage sur la dynamique de la communauté d'arbres.

Cette action est assemblée de trois travaux : une étude sur la croissance des arbres et les taux démographiques en fonction des dégâts d'exploitation ; une intégration dans le protocole des inventaires des placettes permanentes d'une évaluation de la qualité commerciale des arbres ; et une intégration des résultats des études de Paracou dans la modélisation du peuplement forestier soumis à l'exploitation.

• Aspects méthodologiques

5.1 Conséquences de l'ouverture de la canopée sur la croissance des arbres et les taux démographiques

Un indice de perturbation intégrant la distance aux trouées les plus proches et la surface de ces dernières a été développée. 55 348 arbres ont été recensés sur les neuf parcelles traitées depuis 1984 jusqu'à la dernière campagne de 2005. Pour l'analyse sur la croissance et le taux de recrutement, la majorité d'entre eux est éliminée au travers des filtres de sélection de qualité de données et d'effectifs spécifiques suffisants : le jeu de données est alors constitué de 8 729 arbres appartenant à cinquante espèces pour ces analyses. 21 espèces ont des effectifs supérieurs à 200 alors que seules cinq espèces ont plus de 500 individus. 16 espèces appartiennent à la liste des espèces les plus exploitées en Guyane française.

À Paracou, l'unique variable de structure mesurée à l'échelle du peuplement et depuis l'installation du dispositif est le DBH. Les deux tiers des individus du dispositif sont identifiés botaniquement (grâce aux efforts de Petronelli P. et des ouvriers CIRAD). Grâce à ces données, on peut calculer facilement une nouvelle variable, le RAP équivalent au DBH relatif de l'espèce traduisant, de ce fait, son stade ontogénique. Le RAP d'un individu renvoie donc au stade de développement de celui-ci pour un temps t.

Il se définit comme le rapport du DBH mesuré au temps t sur le DBH95 (percentile 95 du DBH de chaque espèce sur les données de parcelles non exploitées de Paracou) de l'espèce à laquelle il appartient :

$$\text{RAP} = \text{DBH} / \text{DBH}_{95}$$

Pour des analyses à l'échelle du peuplement, Nicolini E. (com. pers.) distingue quatre stades de développement : $0 \leq \text{RAP} < 0,3$: les arbres sont au stade « juvéniles » ; $0,3 \leq \text{RAP} < 0,5$: les arbres sont au stade « jeunes adultes » ; $0,5 \leq \text{RAP} < 0,8$: les arbres sont au stade « adultes matures » et ; $0,8 \leq \text{RAP} < 1$: les arbres sont sénescents.

L'indice de perturbation se calcule d'après la formule suivante, inspirée des mesures de connectivité IFM (« Incidence Function Model » référence à la fonction d'incidence de Hanski I. (1994)). Celle-ci prend en considération les distances et les surfaces de différentes trouées environnant chaque arbre. Les données nécessaires aux calculs de ces indices sont extraites du SIG grâce à un outil « macro » (visual basic). Le rôle de l'ouverture du peuplement dans les modifications de croissance, de recrutement et de mortalité est donc proprement estimé grâce à une variable spatialement explicite définie comme telle:

$$I_{\text{perturb}_i} = \sum_j e^{-\alpha \text{Distance}_{ij}} * \text{Surface}_j^{\beta}$$

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Avec $I_{perturb_i}$ l'indice de perturbation individuel, $Distance_{ij}$ la distance entre l'individu i et la trouée j et $Surface_j$ la surface de la trouée j .

Détermination botanique Genre espèce	Famille	Nb.	Détermination botanique Genre espèce	Famille	Nb.
Ambelania acida (Aubl.)	Apocynaceae	29	Lecythis poiteau (Berg)	Lecythidaceae	99
Andira coriacea (Pulle)	Fabaceae	34	Lecythis zabucajo (Aubl.)	Lecythidaceae	27
Bocoa prouacensis (Aubl.)	Caesalpiniaceae	353	Licania alba ((Bernoulli) Cuatrec.)	Chrysobalanaceae	646
Carapa procera (A. D.C.)	Meliaceae	150	Licania canescens (Benoist)	Chrysobalanaceae	171
Catostemma fragrans (Benth.)	Bombacaceae	101	Licania densiflora (Kleinh.)	Chrysobalanaceae	64
Chaetocarpus schomburgkianus ((Kuntze) Pax)	Euphorbiaceae	96	Licania heteromorpha (Benth.)	Chrysobalanaceae	238
Chrysophyllum sanguinolentum (Pierre) Baehni	Sapotaceae	27	Licania membranacea (Sagot ex Laness.)	Chrysobalanaceae	146
Couma guianensis (Aubl.)	Apocynaceae	30	Licania micrantha (Miq.)	Chrysobalanaceae	34
Couratari multiflora ((J.E. Smith) Eyma)	Lecythidaceae	102	Licania ovalifolia (Kleinh.)	Chrysobalanaceae	51
Dicorynia guianensis (Amsh.)	Caesalpiniaceae	209	Licania sprucei ((J.D. Hook.) Fritsch)	Chrysobalanaceae	59
Drypetes variabilis (Uittien)	Euphorbiaceae	34	Manilkara bidentata ((A. DC.) Chevalier)	Sapotaceae	47
Eperua falcata (Aubl.)	Caesalpiniaceae	530	Moronobea coccinea (Aubl.)	Clusiaceae	83
Eperua grandiflora ((Aubl.) Benth.)	Caesalpiniaceae	166	Mouriri crassifolia (Sagot)	Melastomataceae	42
Eschweilera congestiflora ((Benoist) Eyma)	Lecythidaceae	93	Oxandra asbeckii ((Pulle) R.E. Fries)	Annonaceae	555
Eschweilera coriacea ((A.P. D.C.) Mori)	Lecythidaceae	199	Platonia insignis (Mart.)	Clusiaceae	29
Eschweilera decolorans (Sandw.)	Lecythidaceae	42	Pogonophora schomburgkiana (Miers ex Benth.)	Euphorbiaceae	415
Eschweilera sagotiana (Miers)	Lecythidaceae	1005	Poraqueiba guianensis (Aubl.)	Icacinaceae	87
Goupia glabra (Aubl.)	Celastraceae	54	Pradosia cochlearia ((Lecomte) Pennington)	Sapotaceae	171
Gustavia hexapetala ((Aubl.) J.E. Smith)	Lecythidaceae	217	Qualea rosea (Aubl.)	Vochysiaceae	184
Hebepetalum humiriifolium ((Planch.) Benth.)	Hugoniaceae	59	Recordoxylon speciosum ((Benoist) Gazel ex Barneby)	Caesalpiniaceae	92
Hevea guianensis (Aubl.)	Euphorbiaceae	32	Sextonia rubra ((Mez) van der Werff)	Lauraceae	57
Iryanthera hostmannii ((Benth.) Warb.)	Myristicaceae	68	Simaba cedron (Planch.)	Simaroubaceae	171
Iryanthera sagotiana ((Benth.) Warb.)	Myristicaceae	217	Theobroma subincanum (Mart.)	Sterculiaceae	63
Jacaranda copaia ((Aubl.) D. Don)	Bignoniaceae	45	Virola michelii (Heckel)	Myristicaceae	69
Lecythis persistens (Sagot)	Lecythidaceae	1202	Vouacapoua americana (Aubl.)	Caesalpiniaceae	35

Le 1^{er} objectif est de paramétrer alpha et beta sur une partie des données (typiquement les espèces indéterminées) et d'utiliser $I_{perturb}$ comme variable prédictive pour l'autre partie (typiquement les déterminées). La technique de paramétrisation utilisée est celle du maximum de vraisemblance (équivalent au minimum d'AIC à nombre de paramètres constants) par tirage dans une loi uniforme sur [-5 ; 5] de alpha et beta.

Le modèle de prédiction de la croissance utilisé est finalement un modèle linéaire général classique du type :

$$AGR_{is} = \mu_s * I_{perturb_i} + \theta_s * Soil_i + \lambda_s * \frac{DBH_i}{DBH_{95_s}} + \rho_s * I_{perturb_i} : \frac{DBH_i}{DBH_{95_s}} + \omega_s + \varepsilon_i$$

Où AGR est le taux de croissance annuel de l'individu i de l'espèce s . μ , θ , λ , ρ , ω sont les paramètres du modèle et ε les résidus.

Le modèle de prédiction du recrutement ou de la mortalité (M) est un modèle logistique, de type :

$$p(R_i) = \frac{e^{f(I_{perturb_i}, Espèce, Soil)}}{1 + e^{f(I_{perturb_i}, Espèce, Soil)}}$$

Pour le modèle de recrutement, le premier modèle testé est un modèle sans effet d'interaction espèce : $I_{perturb}$. Dans ce cas, on ne teste pas si les espèces réagissent différemment à la perturbation, mais on teste des différences d'ordonnée à l'origine (effet propre, comme en modèle linéaire). Le deuxième modèle testé est un modèle avec effet d'interaction espèce : $I_{perturb}$. Dans ce cas, on teste non seulement les réactions différentielles des espèces à la perturbation (effet d'interaction seul), mais aussi des différences d'ordonnées à l'origine.

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Pour le modèle de mortalité, l'influence du type de mort (chablis, mort sur pied) est étudié mais les effets espèce et sol sont ôtés pour 2 raisons : méconnaissance des espèces pour les individus morts et manque de puissance statistique pour le sol. Une observation attentive des données montrent ensuite qu'il existe en fait deux phénomènes de surmortalité, un pour des $I_{perturb}$ petits et un pour des $I_{perturb}$ importants, et une sous-mortalité intermédiaire. Le moyen d'estimer plus proprement (et relativement facilement) cela est d'intégrer un terme d'ordre 2 dans le modèle comme suit :

$$p(M_i) = \frac{e^{f(I_{perturb_i}, I_{perturb_i}^2)}}{1 + e^{f(I_{perturb_i}, I_{perturb_i}^2)}}$$

La sélection des meilleurs modèles utilise de nouveau le critère AIC.

5.2 Effets de l'exploitation sur la qualité commerciale des arbres

L'objectif de cette étude consiste à réaliser une évaluation de la qualité du peuplement commercial des parcelles de Paracou, 20 ans après l'application des traitements sylvicoles afin de mettre en évidence l'effet des traitements sur ce paramètre important mais non pris en compte dans la modélisation de la reconstitution du stock de bois exploitable. Pour cela une expertise détaillée de toutes les tiges potentiellement commercialisables a été effectuée au cours de l'année 2007 avec le concours des ouvriers du CIRAD préalablement formés par l'animateur sylvicole de l'Office National des Forêts, Olivier Brunaux.

Pour qu'une tige soit considérée de qualité commerciale elle doit remplir plusieurs conditions :

- (1) appartenir à l'une des 87 essences d'intérêt technologique reconnu;
- (2) atteindre un diamètre supérieur au diamètre minimum d'exploitabilité (45 ou 55 cm selon les espèces) ;
- (3) présenter une grume d'au moins 8m de long sans défaut ou tare visible, tant interne qu'externe, avec un fin bout de 45cm au minimum (voir plus loin) ;

Lors de cette étude nous nous sommes aussi intéressés à la qualité commerciale des **arbres de remplacement**, c'est-à-dire toutes les tiges des mêmes essences d'intérêt technologique reconnu, de diamètre compris entre 35 cm et le diamètre minimum d'exploitabilité.

Ce sont près de 5000 tiges de diamètre supérieur à 35cm à hauteur de poitrine appartenant à une essence commercialisable, préalablement répertoriées sur SIG, qui ont été expertisées sur les paramètres suivants :

- l'état du houppier : les arbres présentant de grosses branches sèches ont souvent des cœurs creux ou du bois sec – c'est de plus un élément de diagnostic de l'état de vigueur de l'arbre
- le houppier est normal avec éventuellement quelques trous dans le feuillage (code1) – c'est un arbre d'avenir ;
- le houppier a perdu quelques grosses branches charpentières mais il en reste plus de la moitié (code2) – c'est un arbre du présent ;
- plus de la moitié du houppier est sec ou déjà tombé (code 3) – c'est un arbre du passé ;
- état sanitaire du pied de l'arbre : les bois pourris ou troués à la base ne sont pas commercialisables ;
- la forme générale du tronc :
 - un tronc avec une forte décroissance n'est pas commercialisable : pour une tige de 55-60 cm au pied, le bout le plus fin doit faire minimum 45 cm ;
 - un tronc très courbé n'est pas commercialisable (contre-fil important) ;
 - un tronc très penché (plus de 15%) n'est pas commercialisable (bois de tension) ;
 - un tronc très déformé (vissé, bosselé...) n'est pas commercialisable ;

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

- l'état sanitaire du fût de l'arbre : on observe la présence de champignons, de grosses termitières, ou de trous.
- Sur l'Angélique, le Grignon franc, le Balata et le Goupi la présence d'un trou, même petit s'accompagne fréquemment d'un cœur creux non commercialisable;
- Sur les bois blancs, la présence d'un trou ou d'un champignon est souvent accompagné de pourritures non commercialisables ;
- Sur les Wacapou ou les bois blancs, la présence d'une termitière est souvent considérée comme un risque de pourriture (non commercialisable) ;

Une fiche de relevé a été élaborée et suivie sur le terrain pour une notation exhaustive des différents paramètres pour chaque individu (voir annexe). Toutes les placettes du dispositif de Paracou ont été expertisées (sauf la parcelle 16). L'ensemble des relevés ont été rassemblés dans une base de données Excel. Quelques individus ont été éliminés de la base pour les raisons suivantes :

- 113 cas de diamètre inférieur au 35cm requis (<110 cm sur la circonférence) ;
- 17 cas éliminés pour cause de données incomplètes ne permettant pas de déterminer précisément l'individu ou de diagnostiquer son statut commercialisable ou non ;
- 22 cas d'essences non commercialisables ;

Au final 4596 tiges ont été analysées. Parmi cet échantillon, 1764 tiges appartiennent à des essences considérées comme non-commerciales à la mise en place du dispositif mais aujourd'hui intégrées dans la liste des essences commerciales (essences dites de catégories 4). Chaque analyse a donc été effectuée en considérant la population entière et la sous-population des tiges hors catégorie 4.

5.3 Modélisation du peuplement forestier soumis à l'exploitation

Le modèle SELVA (modèle d'arbre spatialisé tournant sur la plate-forme CAPSIS, déjà utilisé pour modéliser la dynamique de certaines espèces d'arbres à Paracou, (De Coligny *et al.*, 2003, Gourellet-Fleury *et al.*, 2005) est en cours d'être enrichi à partir des résultats précédents acquis sur les réactions du peuplement dans son ensemble et des espèces aux trouées d'abattage. En particulier, la capacité des indices de compétition utilisés dans les modèles de croissance et de mortalité à rendre compte de l'effet des trouées, est en cours d'examen. Des modèles de recrutement adaptés aux espèces les plus abondantes seront mis au point dans le futur, mais n'ont pu aboutir lors de ce projet .

• Résultats et Discussion

5.1 Conséquences de l'ouverture de la canopée sur la dynamique forestière

a. Croissance des arbres

Alors que de nombreuses études précédentes ont décrit différentes stratégies de réponses de la croissance pour des groupes d'espèces tropicales (Vanclay 1991, Gourellet-Fleury & Houllier 2000) ou pour un nombre limité d'essences d'arbres (e.g. Clark & Clark 1999), nos résultats permettent de décrire ces réponses spécifiques pour un grand nombre d'espèces. Le taux de croissance « inhérent » (quand $I_{perturb} = 0$) observé pour les arbres > 10 cm varie fortement entre les espèces (-0.2 – 6.02 mm an⁻¹) et se situe dans la fourchette des valeurs observées en forêts tropicales du Costa Rica (0.5 – 6.7 mm an⁻¹, Lieberman & Lieberman 1985, Clark and Clark 1999), de Bolivie (0.2 – 2.7 mm an⁻¹; Brienen & Zuidema 2006), ou de Malaisie (0.6 – 6.1 mm an⁻¹, King *et al.* 2006)

Alpha et Beta converge respectivement vers 0.106 et 0.257. La réaction de l'indice de perturbation (pour une trouée) à la distance (de 1 à 50 m) et à la surface (de 10 à 2000m) est montrée graphiquement ci-dessous (Figure 5.1.1). On voit que l'indice est surtout dépendant de la distance aux trouées et relativement peu de la surface des trouées, ce qui est attendu pour une fonction puissance proche de 0. Il apparait dès lors clairement que c'est la distance, et peu la surface, aux trouées les plus proches qui influence la réponse des individus. Cependant, la puissance sur la surface n'est pas égale à zéro, indiquant que la taille de la trouée influe sur la croissance, et n'est pas non plus égale à 1, suggérant que la quantité de lumière atteignant la lisière de trouée n'augmente pas linéairement avec l'aire de la trouée (Moilanen & Nieminen 2002).

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

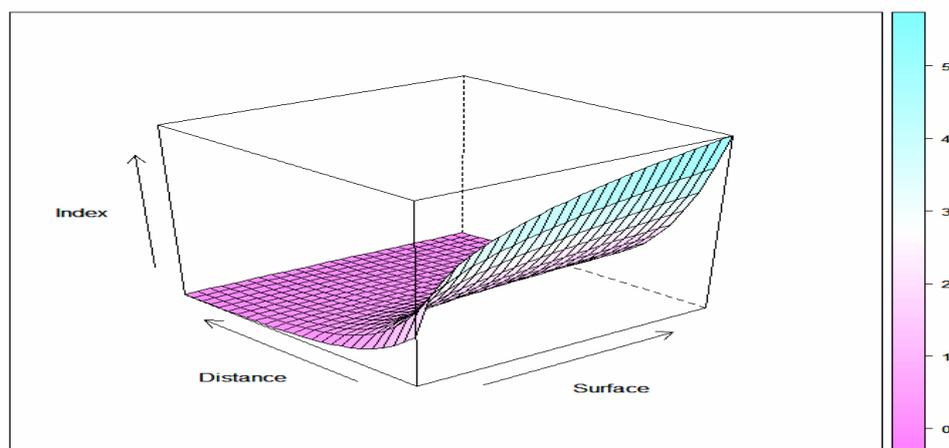
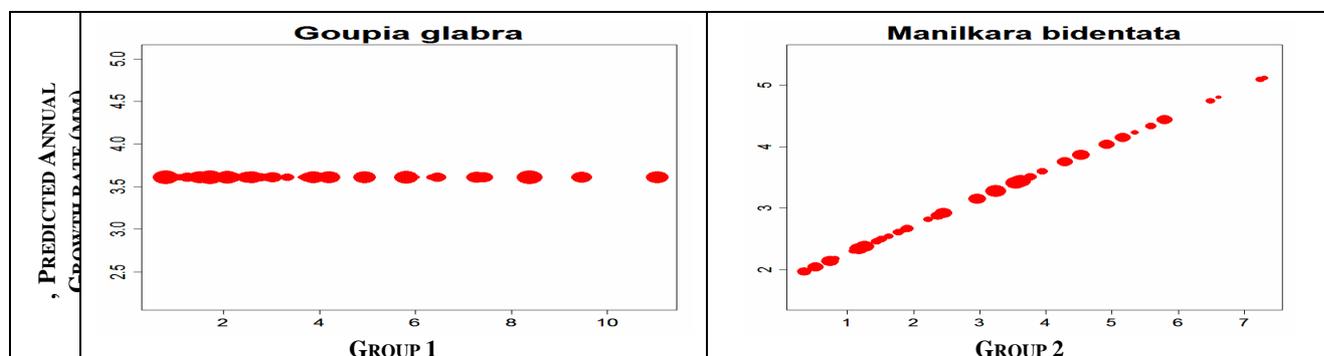


Figure 5.1.1 Comportement de l'indice de perturbation paramétré en fonction de la distance à et de la surface de la trouée la plus proche.

De par le modèle utilisé, nous avons testé *a priori* la possibilité que les espèces puissent changer leurs taux de croissance inhérent avec leur stade de développement (paramètre λ). Deux stratégies peuvent théoriquement être observées : augmentation ou diminution de la vitesse de croissance avec l'âge. Les deux stratégies sont équitablement réparties parmi les 25 espèces (sur un total de 43) qui montrent un changement significatif de la croissance avec le stade ontogénique. Parmi les espèces qui accélèrent leur croissance avec l'âge, on retrouve de nombreux arbres dominants comme *Qualea rosea* (Vochysiaceae) ou *Sextonia rubra* (Lauraceae). Comme déjà mis en évidence par Clark & Clark (1999) pour 6 espèces de canopée du Costa Rica, leur croissance inhérente ne chute pas vers 0 quand ces espèces deviennent âgées. Les autres espèces montrent un comportement strictement opposé : croissance se ralentissant avec l'âge pour *Gustavia hexapetala*, *Licania canescens* (Chrysobalanaceae) ou *Iryanthera sagotiana* (Myristicaceae), la plupart de ces espèces étant des essences de sous-bois qui reçoivent peu de lumière incidente.

Il est généralement attendu que l'augmentation de la lumière incidente provoquée par l'ouverture de la canopée provoque une augmentation de croissance, la lumière étant probablement le facteur le plus limitant pour la croissance en forêt tropicale (Denslow 1987). Logiquement, l'indice de perturbation a été retenu par notre procédure de sélection des variables explicatives pour 31 des 43 modèles de croissance spécifique. Seules les croissances des groupes d'espèces 7 (jeunes arbres) et 8 (vieux arbres, voir Figure 5.1.2) sont liées négativement avec l'indice de perturbation. Une explication possible de ce résultat serait que certaines espèces, à des stades ontogéniques particuliers, ont souffert du dessèchement des sols et de l'air, entraînant des augmentations des pertes en eau par transpiration. Pour compenser, l'arbre augmente fréquemment sa biomasse racinaire et ceci, au détriment de sa biomasse épigée (Porter 1999).



INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

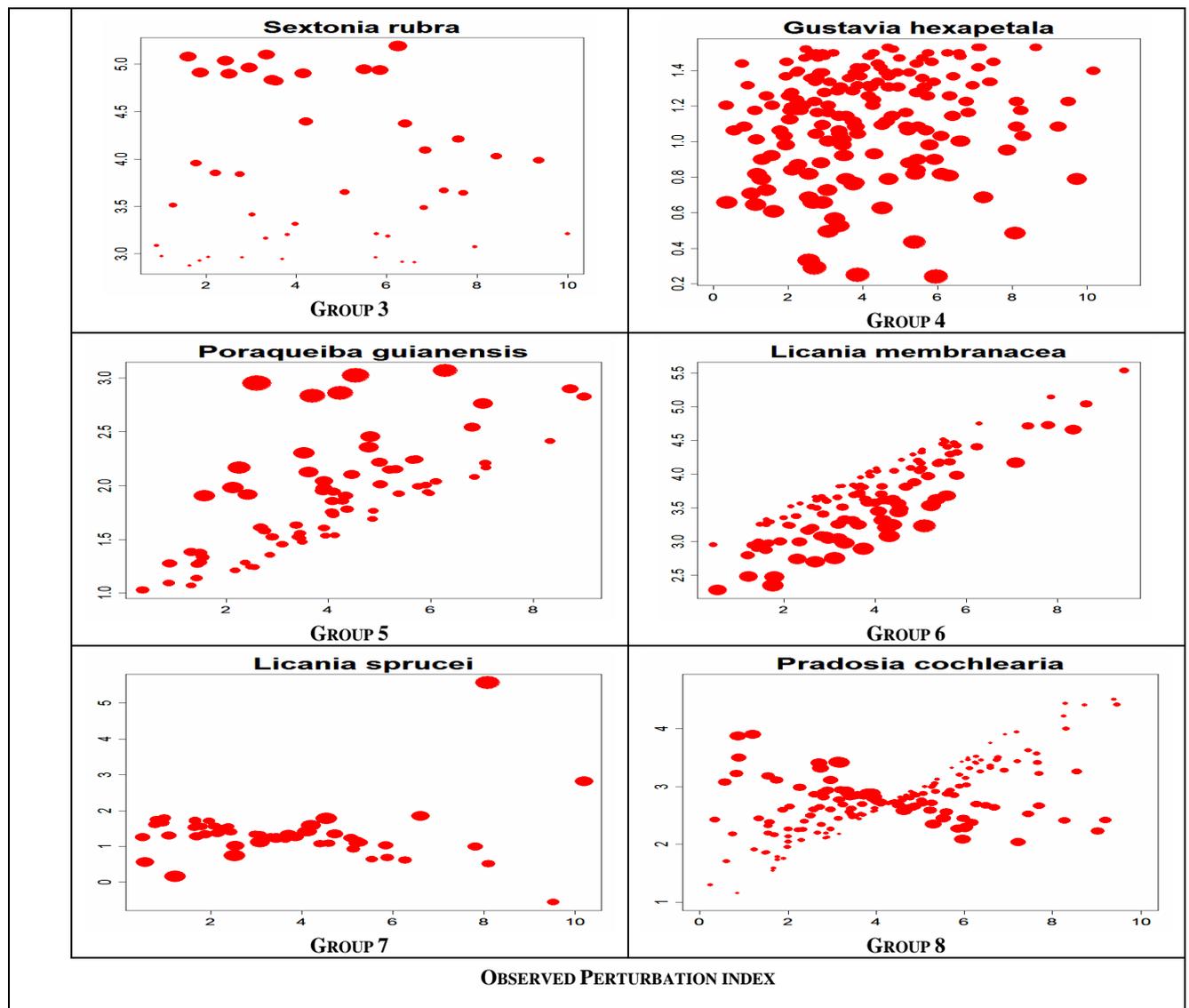


Figure 5.1.2 Exemple d'espèces tirées des huit super-groupes selon leur réponse de croissance à la variable I_{perturb} . Chaque point représente un individu. La taille du point est proportionnelle au DBH de l'individu

Bien qu'il ait été souvent postulé que la réponse de la croissance des arbres à l'ouverture du peuplement pouvait changer en fonction du stade ontogénique de l'individu (Clark & Clark 1991 ; Baraloto et al. 2005 ; Poorter et al. 2007), peu de données existe pour étudier ce phénomène sur un large panel d'espèces. Nos résultats ont révélé deux comportements écologiques diamétralement opposés. Premièrement, la croissance de certaines espèces est négativement liée à l'abondance de lumière (proximité de la trouée) quand l'espèce est jeune alors qu'elle l'est positivement aux stades ontogéniques terminaux (groupe 7). En d'autres termes, les jeunes arbres sont plus performants à l'ombre et les adultes en pleine lumière. Cette stratégie a parfois été qualifiée de modèle « nul » dans le sens où les optima de croissance suivent logiquement les gradients verticaux de lumière (Poorter et al. 2005). Mais nos données suggèrent qu'une autre stratégie est aussi relativement commune. En effet, 10 des 43 espèces étudiées ont des jeunes individus qui poussent plus rapidement près des trouées et des arbres adultes qui sont plus performants loin des trouées. Ce comportement semble regrouper deux stratégies écologiques distinctes. Premièrement, les espèces de sous-bois et de sous-canopée (e.g., *Bocopa prouacensis*, Caesalpinaceae; *Oxandra asbeckii*, Annonaceae) sont performantes en environnement lumineux quand elles sont jeunes et elles semblent ensuite ajuster leur croissance quand elles sont fréquemment surcimées par les arbres de canopée et les émergents. Deuxièmement, les espèces de canopée et les arbres émergents (*Pradosia cochlearia*, Sapotaceae; *Dicorynia guianensis*, Caesalpinaceae) qui ne modifie probablement pas leur comportement de

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

croissance avec l'âge mais qui, elles, surciment les autres arbres quand adultes et donc, ne dépendent pas de la proximité d'une trouée pour leur croissance. Le fait que ces arbres semblent plus performants loin des trouées quand ils sont adultes pourrait avantageusement être mis en relation avec l'idée d'une plus grande sensibilité de ces espèces aux conséquences connexes de la trouée : diminution de la ressource en eau et augmentation de la température au sol (Poorter et al. 2005).

Dans « le meilleur des cas », les variables dont nous avons étudié les effets ont permis d'expliquer 46 % de la variance observée sur la croissance relative annuelle d'une espèce. Toutes espèces confondues, cette valeur tombe à 33 %, ce qui reste tout à fait correct pour un résultat obtenu en forêt tropicale humide.

b. Taux de recrutement spécifique

L'AIC le plus petit est sans contestation obtenu pour le modèle sans interaction $I_{\text{perturb}} : \text{Espèce}$. Bien sûr, la déviance résiduelle est plus faible pour le modèle avec interaction mais la chute de déviance résiduelle (-41) ne peut pas compenser le coût de l'interaction (38 espèces * 2 = 76) en terme d'AIC. Du coup, il s'avère que l'effet d'interaction dans le modèle n'est pas un effet significatif et sent très fort le surparamétrage. En d'autres termes, cela signifie qu'on ne peut raisonnablement pas écarter l'hypothèse que toutes les espèces réagissent de la même manière (augmentation régulière du taux de recrutement, voir Figure 5.1.3) à l'ouverture du peuplement et que les seules différences existantes sont des différences de taux de recrutement 'naturels' (visibles sur le graph pour $x=0$).

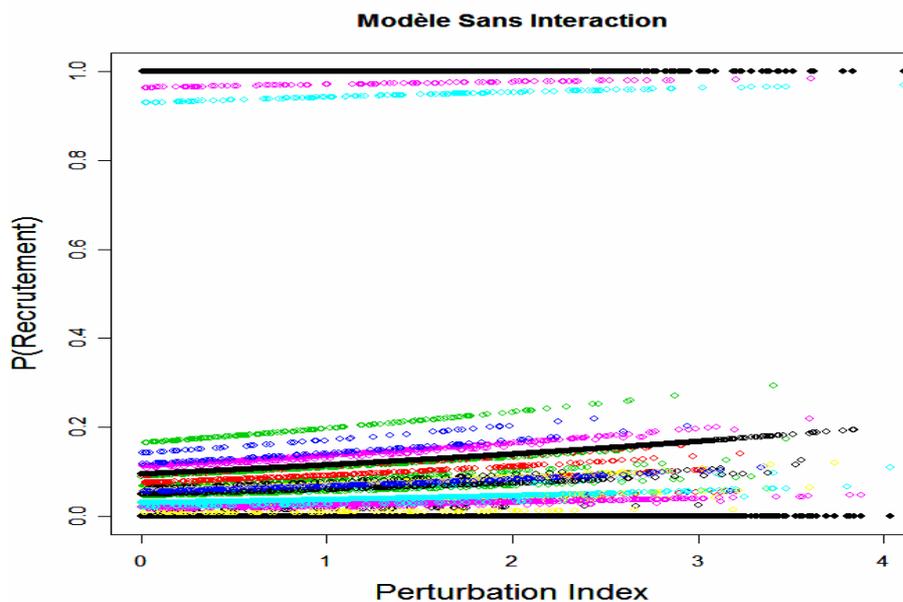


Figure 5.1.3 Modifications des taux de recrutement spécifiques suite à l'exploitation forestière. Pas de différences de réactions des espèces mais, fondamentalement, des taux de recrutement naturels très différents

Ce résultat est un peu contre-intuitif, eu égard aux hypothèses de départ de réactions différentielles des espèces face à l'ouverture. Une des possibilités d'explication est un manque de puissance statistique. En clair, un effet d'interaction existerait dans la réalité mais on ne le capte pas car on n'a pas assez d'effectifs par espèce.

c. Taux de mortalité

Dans la figure ci dessous, sont représentés les 3 modèles de mortalité les plus parcimonieux (AIC). Pour chaque modèle, un seul type de mort est gardé et tous les vivants sont inclus (car il n'est pas possible d'inférer un type de mort à venir pour un arbre vivant, ce qui est somme toute problématique).

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

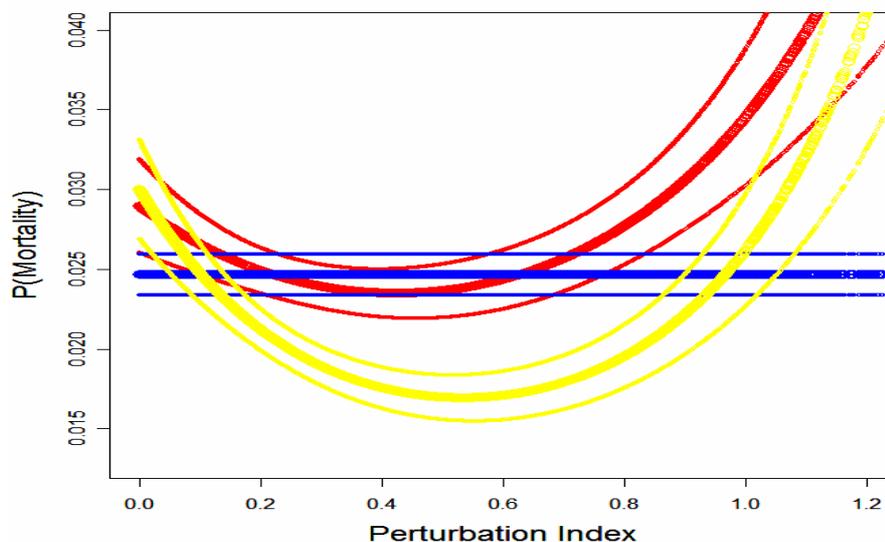


Figure 5.1.4 Modifications des taux de mortalitésuite à l'exploitation forestière : Rouge = Mort sur pied naturel, Bleu = Chablis primaire, jaune= chablis secondaire).

Les surmortalités semblent essentiellement dues aux morts sur pieds naturels et aux chablis secondaires. Les chablis primaires ne montrent pas ce comportement, au contraire, ils auraient plutôt tendance à diminuer avec la perturbation (mais ce n'est pas significatif du tout). Une explication possible est que, près des trouées, la surmortalité est due à un stress se manifestant par une mort sur pied. Fatalement, quand ces arbres tombent (quand ils finissent par tomber) ils entraînent des chablis secondaire. Loin des trouées, la surmortalité est surtout due au chablis secondaire (et peu aux morts sur pieds naturels). Une explication est que en pleine forêt, un arbre qui tombe fait proportionnellement plus de chablis secondaire que près d'une trouée. Il est donc a priori possible que ces phénomènes de surmortalité observés aient des causes différentes : fort stress près des trouées et augmentation du ratio chablis secondaire/autre mort loin des trouées.

5.2 Effets de l'exploitation sur la qualité commerciale des arbres

Le nombre de tiges de remplacement toutes catégories varie de 236 à 391 tiges pour 6,25 ha, soit de 37,5 à 62,5 tiges/ha. La densité moyenne de tiges de remplacement diminue du traitement 0 (témoin) au traitement 3 (prélèvement le plus fort). Une Anova à un facteur montre que l'influence du traitement est significative ($p = 0,0016$). Un test LSD de Fisher montre une différence significative au seuil de 5% entre les traitements 0 et 1(témoin et exploité) d'une part et les traitements 2 et 3 (exploitation + éclaircie) d'autre part.

Les tiges de remplacement sont considérées de qualité commerciale lorsque la hauteur de grume utilisable (avant premier gros défaut ou première grosse branche) est supérieure à 8m, de bonne conformation (courbure, conicité, déformations) et qu'il n'y a pas de défauts rédhibitoires sur cette longueur (trous, pourritures, champignons, termitière). Ce jugement tient compte autant que faire se peut d'éventuels défauts internes pouvant être diagnostiqués sur pied (gros trous sur le fut ou à la base, bruit de « creux » ...).

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

Tableau 5.2.1: pourcentage de défauts dans chaque catégorie de qualité – une tige peut cumuler plusieurs défauts

défauts notés	qualité jugée non commerciale	qualité jugée commerciale
trou ou pourriture au pied	16%	2%
sonne creux	52%	1%
forte conicité de la bille pied	15%	1%
forte courbure de la bille pied	14%	3%
fortement penché	3%	1%
bille pied très déformée	24%	1%
nombreux chancres	9%	3%
nombreux champignons	1%	0%
termitières importantes	3%	2%
trou sur la bille	15%	1%
aucun défaut	6%	87%
nombre de tiges totalement renseignées	905	3630

L'analyse de la fréquence des différentes tares observées parmi les tiges jugées de qualité commerciales et celles jugées non commerciales, met en évidence les défauts rédhibitoires les plus courants : (1) des indices de pourritures internes (52% de cœur creux, 16% de trous) ; (2) des problèmes de formes (24% de billes déformées, 15% de forte conicité, 14% de courbure) ; (3) des problèmes de parasitisme (champignons, termites, chancres).

88% des tiges de qualité commerciale ne présentent aucun défaut alors que 12% présentent des défauts jugés mineurs au regard de la qualité globale de la tige.

A l'inverse 89% des tiges de mauvaises qualités présentent un ou plusieurs défauts. Pour les 11% restant, le classement dans la catégorie non commerciale n'est pas expliqué par les facteurs observés mais peut provenir d'un diamètre fin bout ou d'une hauteur insuffisante.

La part de tiges de mauvaise qualité (0) varie de 12 à 27% selon les parcelles mais ne montre pas de tendance significative en fonction du traitement. L'exploitation et les éclaircies ne semblent pas avoir altéré la qualité générale des tiges. On observe le même résultat si on ne considère pas la catégorie 4 (essences considérées comme non commerciale lors de la mise en place du dispositif).

Trois aspects peuvent être discutés suite à ces résultats. Primo, les éclaircies ont pour conséquence une diminution nette de la densité de tiges de remplacement ce qui est très préjudiciable à la reconstitution du stock exploitable. Cet effet est visible plus de 20 ans après intervention ce qui signifie que la dynamisation des croissances n'a pas permis de compenser les prélèvements et la mortalité indirecte par un passage plus rapide des classes de petits bois [10-30] vers celle des gros bois et bois moyens [35 et +]. De fait, les éclaircies telles que menées sur Paracou risquent de ne pas aboutir au raccourcissement de rotation escompté. Cet effet est globalement mis en évidence dans un des modèles testés par Gourlet-Fleury qui aboutit à des rotations supérieures à 60 ans.

Par contre, les éclaircies et l'exploitation ne semblent pas avoir d'effet ni sur la qualité globale du peuplement de remplacement, ni sur l'état de développement des houppiers. On aurait pu s'attendre à une amélioration de la qualité globale du peuplement et à une augmentation de la part des arbres d'avenir et du présent dans le cas des éclaircies permettant une sélection des tiges et laissant plus d'espace aux développements des couronnes d'arbres en place. Mais ce n'est pas le cas, ce qui marque peut-être une faible réactivité des tiges de remplacement ou une trop forte concurrence des essences non commerciales.

Enfin la qualité commerciale des tiges est fortement liée à l'état de développement du houppier des arbres et à l'effet bloc. Cela signifie d'une part l'existence d'un effet local qui pourrait-être lié à la station (qualité moyenne des sols) ou à la démographie (effet génétique ?). Cela confirme d'autre part qu'il existe une forte dégradation de la qualité des bois avec le stade de développement et que l'état du houppier est un bon élément diagnostique (CCAUB, 1999). Il est donc nécessaire de récolter les arbres du passé et les arbres du présent de fort diamètre lors de l'opération d'exploitation, les

INFLUENCE DE L'INTENSITE D'EXPLOITATION ET DU DEGRE D'OUVERTURE DE LA CANOPEE EN FORET TROPICALE HUMIDE SUR LE MAINTIEN ET LA DYNAMIQUE DE LA BIODIVERSITE

rotations étant longues et les probabilités de passage de la qualité commerciale à la qualité non commerciale sont fortes pour ces tiges. Par ailleurs, le taux moyen de 20% de tiges de mauvaise qualité utilisé par le gestionnaire pour pondérer le nombre de tiges du peuplement commercial est vérifié pour les peuplements naturels comme pour les peuplements précédemment perturbés.

ANNEXE : COPIE DES PUBLICATIONS

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

Blanc, L., Echard, M., Bonal, D., Marcon, E., Chave, J., Baraloto, C. 2009. Dynamics of aboveground carbon stocks in a selectively logged neotropical rainforest. **Ecological Applications** **19**: 1397-1404.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES À PARAÎTRE

Hérault, B., Ouallet, J., Blanc, L., Wagner, F., Baraloto, C. *in review*. Differential species growth response to canopy openings in a neotropical forest: a spatially-explicit approach. Submitted to **Journal of Applied Ecology**.

Baraloto, C., Hérault, B., Paine, C.E.T.P., Massot, H., Blanc, L., Bonal ? D., Chave, J., Molino, D.-F., Nicolini, E., Sabatier, D. Logging degrades tropical forest functional composition. Submitted to **Science**.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PRÉVUES

Une publication sur les résultats obtenus sur la distribution des dégâts d'abattage sur le dispositif Paracou (Revue ciblée : **Forest Ecology and Management**)

Une publication sur l'application des résultats du projet pour la gestion des forêts tropicales humides. (Revue ciblée : **Forest Ecology and Management**)

Une publication sur les résultats obtenus sur la distribution de la diversité génétique de *Jacaranda copaia* (Revue ciblée : **Molecular ecology**)

Une publication sur les résultats obtenus sur la distribution de la diversité génétique de *Virola michelii* (Revue ciblée : **Molecular ecology**).

Une publication sur les résultats obtenus sur l'interaction entre stade de développement et taux de croissance et survie des arbres (Revue ciblée : **Ecology**)