

GeForHet

PRODUIRE PLUS TOUT EN PRESERVANT MIEUX LA BIODIVERSITE : QUELLE GESTION MULTIFONCTIONNELLE DES PEUPLEMENTS FORESTIERS HETEROGENES ?

PRODUCING MORE WHILE PRESERVING BIODIVERSITY BETTER: MULTIOBJECTIVE MANAGEMENT OF HETEROGENEOUS FOREST STANDS

Responsable : Benoit COURBAUD
Irstea

*2 rue de la Papeterie, BP 76 - F38402 Saint-Martin-d'Hères cedex
Benoit.courbaud@irstea.fr*

Synthèse du rapport final

Numéro de contrat MAAF : n°E23 / 2010



Programme « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » (BGF)

Remerciements :

Participants au projet :

Benoit COURBAUD – IRSTEA
Thomas CORDONNIER – IRSTEA
Frédéric GOSSELIN – IRSTEA
Valentine LAFOND – Doctorante IRSTEA
Guillaume LAGARRIGUES – Doctorant IRSTEA
Eric MERMIN - IRSTEA

Christine DELEUZE – ONF
Didier FRANCOIS – ONF
Bruno CHOPARD – ONF
Thierry SARDIN - ONF

Comité de pilotage :

Nous adressons nos remerciements au comité de pilotage qui nous a fait des remarques stimulantes et constructives au cours du projet :

Laurent CHARASSE – MAAF
Philippe DREYFUS - INRA
Sylvie GOURLET-FLEURY - CIRAD

Nos remerciements vont également au programme BGF, à ses animateurs, et au comité scientifique qui ont su créer une dynamique de programme stimulante.

Ce projet a été conduit dans le cadre du programme BGF « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques », conduit par le GIP ECOFOR sous l'égide du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et du ministère (MEDDE) et du ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt (MAAF).

Il répond à l'Appel à Proposition de Recherches 2010.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Résumé Long

Contexte : Le Grenelle de l'environnement et les Assises de la forêt ont conduit à proposer un protocole d'accord pour la forêt (2007) avec le double objectif de produire plus tout en préservant mieux la biodiversité. Les traitements en peuplements irréguliers sont réputés favorables à la multifonctionnalité à l'échelle des peuplements et sont pratiqués depuis longtemps en hêtraie-sapinière-pessière. Cependant, ce mode de gestion reste empirique et basé sur la tradition. Plusieurs questions se posent dans ce contexte : Est-il possible de baisser les diamètres d'exploitabilité pour mieux s'adapter à la demande industrielle? Est-il nécessaire d'accepter un compromis entre production et biodiversité ? Les meilleurs compromis sont-ils atteints pour des intensités intermédiaires de gestion ? Plus largement, quels sont les effets des différents paramètres de la gestion forestière sur la durabilité de la structure irrégulière, la production de bois et la biodiversité ?

Périmètre de l'étude : Ce projet s'est appuyé sur les forêts de Queige en Savoie et Prénovel dans le Jura. Nous avons réalisé des expérimentations sylvicoles par simulation sur des peuplements de 4ha, grâce au couplage entre le modèle de dynamique forestière Samsara2, un algorithme de sylviculture et des indicateurs de biodiversité liés à la structure du peuplement et à la dynamique du bois mort. Nous avons également utilisé les données de l'Inventaire Forestier National (IFN) pour analyser les relations entre flore du sous-bois, structure du peuplement et variables environnementales, et nous avons implémenté le modèle obtenu dans Samsara2. Les simulations ont permis d'étudier l'effet des paramètres de gestion sur la structure du peuplement, la récolte de bois et les indicateurs de biodiversité. Elles ont également été utilisées pour mettre en place des expérimentations sylvicoles de long terme sur le terrain.

Principaux résultats :

Dans les sapinières-pessières gérées en traitement irrégulier pied-à-pied, la réduction des diamètres d'exploitabilité autour de 52.5 cm, avec un fort prélèvement des arbres plus gros, semble compatible avec le maintien à long terme d'une structure irrégulière. Cette stratégie permet de rapprocher les produits récoltés de la demande industrielle, mais entraîne un impact négatif sur les indicateurs indirects de biodiversité basés sur la diversité structurale ou sur la présence de très gros bois. Une sylviculture par micro-trouées (500 m²) permet une production en volume comparable mais plus hétérogène. Elle augmente la diversité structurale, facilite la conservation de quelques très gros bois dispersés, et stimule la régénération par rapport à la sylviculture pied-à-pied. L'analyse des données IFN montre que le couvert et/ou la surface terrière du peuplement et la surface terrière des perches ont un effet généralement négatif sur la biodiversité floristique. La richesse en essence a un effet plutôt positif sur la richesse de la flore. La diversité floristique semble favorisée par des peuplements fermés en condition d'adret ou de pH acide, et par des peuplements ouverts en condition d'ubac ou de pH moins acide. Dans les simulations avec Samsara2, la réduction du diamètre d'exploitabilité et l'augmentation de la part de gros bois récoltés ont un effet positif sur la richesse spécifique des héliophiles, mais négatif sur les sciaphiles et intermédiaires. Une analyse de sensibilité a montré que le diamètre d'exploitabilité, l'intensité de récolte (proportion d'arbres récoltés parmi les arbres supérieurs au diamètre d'exploitabilité), et la taille des trouées sont les paramètres de gestion ayant le plus d'influence sur les indicateurs de structure, de production et de biodiversité. On observe des compromis entre indicateurs de production et de biodiversité (volume de bois récolté vs. densités de très gros bois vivants et gros bois morts debout, richesse spécifique des herbacées sciaphiles et intermédiaires). On note également des compromis entre différents indicateurs de production (volume récolté vs. dimension des arbres coupés) et entre différents indicateurs de biodiversité (richesse spécifique des héliophiles vs richesse spécifique des sciaphiles ou. densité de très gros bois vivants). Ces résultats demandent toutefois à être approfondis et confortés expérimentalement. Nous avons mis en place sur le terrain quatre dispositifs expérimentaux qui demanderont un suivi de long terme. Ils sont destinés à comparer la durabilité d'itinéraires sylvicoles aux diamètres d'exploitabilité différant d'au moins 10cm. Quatre sites d'étude ont été retenus : deux en sapin pur et deux en mélange sapin-épicéa, dans le Jura (calcaire) et en Belledonne (acide). La croissance en diamètre et en hauteur, la régénération et le bois mort au sol et sur pied seront suivis. Les coupes reposeront sur l'utilisation de l'algorithme de sylviculture développé dans le projet et sur des critères complémentaires de qualité des arbres, d'état sanitaire et de présence de cavités.

Apport en termes d'appui aux politiques publiques : L'outil d'aide à la décision mis au point (modèle de dynamique Samsara2, algorithmes de coupe, indicateurs de production et de biodiversité) est disponible sur la plateforme Capsis, et intégré dans la version Capsis-ONF 2014. Au-delà du projet, cet outil est utilisé sur marteloscope et des ateliers sont initiés pour la R&D de l'ONF. Les quatre dispositifs expérimentaux de long terme installés pour tester l'effet d'itinéraires de gestion « dynamiques » seront suivis dans le futur.

Mots clés : Sylviculture irrégulière, hêtraie-sapinière-pessière, compromis production biodiversité, diamètre d'exploitabilité, trouées, flore du sous bois, simulation, dispositif expérimental.

1. Introduction

1.1 Contexte

La forêt constitue un réservoir considérable de biodiversité en même temps qu'elle assure d'autres fonctions essentielles pour la société, telles que production de bois, espace de récréation, protection contre les risques naturels, protection des ressources en eau ou stockage de carbone. Traditionnellement orientée vers la production de bois, la gestion forestière en Europe a de plus en plus un objectif multifonctionnel explicite et vise à réguler de manière conjointe les différentes fonctions de la forêt (Schütz 1997). En France cette multifonctionnalité est traditionnelle et inscrite au Code Forestier depuis très longtemps. Cependant, la France reste fortement déficitaire en production de sciages résineux, avec une demande industrielle de bois plus standardisés dont le diamètre ne dépasse pas 57 cm (Chopard et al., 2013). Le Grenelle de l'environnement et les Assises de la forêt ont conduit à proposer un protocole d'accord (2007) sur le double objectif de produire plus tout en préservant mieux la biodiversité. Ces nouvelles exigences peuvent paraître parfois contradictoires et nécessitent une meilleure compréhension des relations entre modes de gestion et fonctions de la forêt.

Le traitement sylvicole en futaie irrégulière est souvent considéré comme étant favorable à la multifonctionnalité (Gamborg and Larsen 2003; Duncker, Raulund-Rasmussen et al. 2012). Il vise à permettre un renouvellement permanent du peuplement, se traduisant par une diversité de dimensions et d'âges des arbres à l'échelle du peuplement, souvent associée à une diversité d'essences (Schütz 1997). L'hétérogénéité du peuplement (structure et composition diversifiées) favorise localement la diversité des arbres et des habitats et constitue donc un contexte favorable à la préservation de la biodiversité à cette échelle. La diversité des espèces dépendant du bois mort est également favorisée par des structures de peuplements permettant la production de très gros bois morts, d'essences variées. (Similä, Kouki et al. 2003). Quand elle est bien menée, cette sylviculture peut également s'avérer intéressante sur le plan de la production car elle permet d'assurer un revenu régulier à l'échelle de la parcelle ou de la petite propriété. Dans les peuplements mélangés, la biodiversité favorise le renouvellement des peuplements, la stabilité de la production et des revenus (hypothèse d'assurance), la résilience du peuplement après perturbation, et son adaptation à des changements environnementaux.

Malgré une longue tradition de traitement en futaie irrégulière, en particulier en hêtraie-sapinière-pessière, les marges de manœuvre du sylviculteur sont assez mal connues. Le nouvel objectif de « produire plus tout en préservant mieux la biodiversité » interroge donc les pratiques de gestion, en confrontant d'un côté les démarches de conservation des attributs des vieux peuplements (gros bois, bois mort), jugés favorables à une diversité de micro-habitats importants pour des compartiments de biodiversité menacés, et de l'autre la volonté des gestionnaires de diminuer les diamètres d'exploitabilité, en réponse à la demande industrielle (Chopard et al., 2013) et à la volonté de diminuer la vulnérabilité des peuplements (Legay, Mortier et al. 2007; Seidl, Rammer et al. 2011; Seidl, Schelhaas et al. 2011).

Dans ce projet, nous nous sommes concentrés sur les sapinières-pessières et hêtraies-sapinières-pessières irrégulières qui mêlent diversité d'essences et de dimensions. Ces peuplements sont particulièrement favorables au traitement en peuplements irréguliers, car la régénération reste possible même avec un certain couvert des arbres adultes.

1.2 Identifier les leviers d'action de la gestion forestière sur la production et la biodiversité : intérêt des démarches de simulation

Il est possible qu'un compromis entre durabilité de l'hétérogénéité du peuplement, production de bois et préservation de la biodiversité puisse être obtenu pour une gamme intermédiaire de sylvicultures, d'intensité supérieure à celle pratiquée aujourd'hui. Les travaux scientifiques ayant été le plus loin dans le test d'un compromis production-diversité en peuplements hétérogènes ont été conduits par modélisation (Buongiorno and Michie 1980; Buongiorno, Peyron et al. 1995; Buongiorno, Peyron et al. 1996; Schulte and Buongiorno 1998; Buongiorno, Schulte et al. 2004). Les modèles de simulation permettent en effet de tester la durabilité des itinéraires sylvicoles sur une durée suffisante (supérieure à 100 ans) et sur un grand nombre de modalités (Pretzsch, Grote et al. 2008). Nous avons suivi cette démarche dans le projet avec un modèle individu-centré, spatialement explicite qui permet de simuler des itinéraires sylvicoles plus variés (en particulier sylviculture par trouées), et

d'analyser des réponses plus riches en terme de durabilité et d'impact sur la biodiversité (hétérogénéité spatiale). Les hypothèses formulées seront testées expérimentalement à plus long terme grâce au suivi d'un réseau de 4 dispositifs de terrain installés au cours du projet.

1.3 La nécessité de préciser les relations entre structure du peuplement et biodiversité

Une liste de critères de gestion forestière durable a été établie au niveau européen et au niveau national (Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 2011 ; Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2011). Les indicateurs utilisés pour évaluer le critère qui concerne la biodiversité ont été choisis sur la base d'un consensus d'experts (Barthod, 2012). Pourtant, le lien entre ces indicateurs et la biodiversité n'est pas si évident. Dans le cadre du projet, nous avons approfondi la relation entre indicateurs dendrométriques et diversité floristique pour laquelle nous avons beaucoup de données grâce aux relevés de l'Inventaire Forestier national (aujourd'hui IGN).

1.4 Le besoin d'expérimentations de terrain

La complexité de la structure des forêts hétérogènes rend l'expérimentation sylvicole de terrain difficile. Par ailleurs densité, composition spécifique, structure spatiale et taille maximale sont des variables très corrélées entre elles dans les peuplements adultes. Cette difficulté a conduit jusqu'à présent, soit à privilégier des modalités expérimentales peu différentes de la gestion existante soit à des expérimentations sur de jeunes peuplements en plantations.

Les premiers types de dispositifs expérimentaux comparent de grands types de traitements sylvicoles (ex. coupes progressives, jardinage, diamètre limite, pas d'intervention) sur des unités expérimentales en général supérieure à un hectare, avec peu de réplicats. Ces expérimentations, pour la grande majorité, sont conduites sur un seul site. Les deuxièmes étudient de manière plus directe les facteurs densité, proportion relative des espèces et nombre d'espèces. Le nombre de réplicats et la gamme des situations de compétition sont élevés. Parmi ces expérimentations, on retrouve les clinaux, les dispositifs en surface de réponse, les dispositifs par addition ou substitution, ou les dispositifs contrôlant la richesse et l'identité des espèces. Malheureusement, ces expérimentations se restreignent aux stades juvéniles, et ne permettent pas d'aborder la problématique de la compétition dans des peuplements multi strates.

Dans le cadre du projet, notre objectif était d'élaborer un protocole pour des expérimentations pouvant à la fois servir au test d'hypothèses écologiques et apporter des éléments pour la gestion multifonctionnelle des peuplements irréguliers et mélangés. Pour ce faire, nous avons étudié la possibilité de contrôler directement des variables de densité, d'hétérogénéité des dimensions et d'équitabilité des espèces à l'échelle des peuplements.

1.5 Synthèse des Objectifs

Les principaux objectifs de ce projet étaient les suivants, dans le cadre de la forêt de montagne à épicéa-sapin ou épicéa-sapin-hêtre :

- Evaluer à partir de simulations les conditions dans lesquelles une intensification de la sylviculture (au travers de la baisse du diamètre d'exploitabilité et la récolte effective de la majorité des arbres dépassant ce diamètre) est compatible avec la durabilité de la gestion irrégulière et la préservation de la biodiversité.
- Evaluer la pertinence d'indices reposant sur la structure du peuplement comme indicateurs indirects de biodiversité floristique.
- Mettre en évidence les éventuels compromis ou synergies entre production de bois et conservation de la biodiversité.
- Associer modélisation et expérimentation pour élaborer un protocole d'expérimentation sylvicole de terrain adapté aux peuplements hétérogènes et implanter quatre expérimentations de terrain.

2. Méthode

2.1 Evaluation et Amélioration du modèle Samsara

Le modèle de simulation Samsara2 a été développé par Irstea, pour les sapinières-pessières de montagne et implémenté dans la plateforme de simulation Capsis4 (Dufour-Kowalski, Courbaud et al. 2012). C'est un modèle individu-centré spatialement explicite, dans lequel chaque arbre est décrit par son essence, ses coordonnées spatiales (x,y,z), son diamètre, sa hauteur et un houppier symétrique de révolution. Le modèle simule la forme des houppiers en 3D, l'interception de la lumière par chaque arbre, la croissance, la mortalité naturelle et la régénération. Il a été calibré initialement sur différentes placettes d'observation Irstea distribuées dans les Alpes du Nord Françaises (Vieilledent, 2009).

Nous avons conduit une démarche d'évaluation quantitative du modèle, basée sur la reproduction d'itinéraires sylvicoles observés de 1931 à 1980 en forêt de Queige (Savoie). A partir des inventaires de peuplements et de l'historique des coupes, issus des documents de gestion de l'ONF, nous avons reconstitué des peuplements initiaux, simulé les coupes effectuées et comparé les caractéristiques prédites par le modèle aux caractéristiques observées sur le terrain en fin de période (1980 à Queige).

Dans la même logique, nous avons conduit une analyse de sensibilité globale du modèle Samsara2, afin d'évaluer la sensibilité de la durabilité de la structure et de la composition du peuplement (en fin de simulation) aux paramètres d'entrée du modèle Samsara2 (Courbaud et al., in prep). L'ensemble des paramètres démographiques du modèle (21 par espèce) ont été variés dans leur gamme d'incertitude (+/- 1 écart-type autour de la valeur moyenne obtenue pour chaque paramètre lors de la calibration du modèle). De plus, quatre peuplements ont été choisis parmi les peuplements (réels) de la forêt de Queige, afin de tester l'effet « peuplement initial ».

Nous avons ensuite calibré le modèle pour les conditions du Jura à partir des données historiques de la forêt de Prénovel (inventaires et sommiers disponibles de 1953 à 2013). Les paramètres calibrés étaient choisis parmi les paramètres les plus influents détectés par l'analyse de sensibilité précédente : un paramètre de croissance, un paramètre de régénération et un paramètre de mortalité pour chaque espèce. Nous avons utilisé pour cette calibration une démarche statistique innovante : la méthode du Calcul Bayésien Approché (Approximate Bayesian Computation).

2.2 Développement d'outils de simulation de gestion

Pour tester des scénarios de gestion alternatifs, nous avons eu besoin de développer un algorithme de coupes permettant de transcrire les directives de martelage en règles de sélection automatique des arbres à couper. Nous avons formalisé, en partenariat étroit entre Irstea et ONF, ces différents éléments sous la forme d'une quinzaine de paramètres.

Code	Paramètre	min	max	nb niveaux	Échelle
dH	diamètre d'exploitabilité (cm)	42.5	67.5	6	classique
dT	diamètre d'éclaircie (cm)	17.5	32.5	4	classique
gCx	prélèvement maximum par coupe (m ²)	7	12	6	classique
gCs	prélèvement standard par coupe (m ²)	4	7	4	classique
gCn	prélèvement minimum par coupe (m ²)	1	4	4	classique
hRx	% de récolte (en surface terrière) dans les arbres de diamètre d ≥ dH	0.25	1	6	classique
tRx	% d'éclaircie (en surface terrière) dans les arbres de diamètre dT ≤ d < dH	0	0.5	6	classique
sWP	puissance de pondération liée à la proportion de l'espèce	0.1	100	4	log10
hdWP	puissance de pondération liée au diamètre des arbres pour la récolte	0.1	100	4	log10
tdWP	puissance de pondération liée au diamètre des arbres pour l'éclaircie	0.1	100	4	log10
mrC	Seuil de préservation des essences minoritaires (% surface terrière min)	0	0.3	4	classique
aaM	surface maximale des trouées (m ²)	1	2500	6	log10
dB	distance tampon entre arbres ou groupes récoltés (m)	0	15	4	classique
nbT	nb d'arbres préservés pour la biodiversité (nb/ha)	0	6	4	classique
dwpH	% des arbres morts frais récoltés	0	1	6	classique

Tab. 1 : Paramètres de l'algorithme de sylviculture et gammes testées dans l'analyse de sensibilité.

2.3 Développement d'indicateurs de production et de biodiversité

À la suite d'un travail bibliographique, nous avons identifié un ensemble d'indicateurs complémentaires pouvant être calculés à partir de la structure du peuplement et nous permettant d'évaluer la récolte de bois et le niveau de biodiversité potentielle. La plupart des indicateurs sont calculés de manière relativement directe (récolte totale et récolte de gros bois, hétérogénéité de la structure, nombre de très gros bois vivants, composition spécifique du peuplement ...). Deux types d'indicateurs ont cependant demandé un travail de développement important : Les indicateurs liés au bois morts et des indicateurs de richesse spécifique des plantes de sous bois.

Les indicateurs liés à la quantité et qualité du bois mort ont nécessité le développement d'un sous modèle de bois mort (adapté de (Holeksa, Zielonka et al. 2008)) simulant la chute des arbres morts, leur décomposition et la réduction de leur volume et de leur masse (Lafond 2014).

Les indicateurs de richesse spécifique de trois groupes écologiques de végétation (héliophiles, intermédiaires et sciaphiles) ont donné lieu à une tâche spécifique dans le projet (Zilliox et al. 2013). Nous avons modélisé la richesse spécifique et l'abondance de groupes écologiques définis a priori sur la base de leur lien potentiel aux indicateurs dendrométriques étudiés. Etudier l'abondance en plus d'indices de diversité de type richesse spécifique rend les analyses plus complètes (Gosselin and Laroussinie 2004), plus proches de la biologie de la conservation (Zilliox and Gosselin 2014) et permettent de changer plus facilement d'échelle (transposition des résultats obtenus sur de petites placettes à des indicateurs valables pour l'ensemble d'un peuplement). Nous avons enfin codé ces indicateurs dans Samsara2. Pour respecter l'échelle du modèle de richesse des plantes de sous bois, nous avons simulé des placettes IFN localisées aléatoirement dans les peuplements Samsara2 de 4ha.

2.4 Réalisation des expériences de simulation

Une première série d'expériences par simulation a été réalisée avec l'objectif d'évaluer l'effet à long terme de la dynamisation de la gestion, en croisant plusieurs modalités d'intensité de récolte (proportion maximum d'arbres récoltés en une seule opération, parmi les arbres de diamètre supérieur au diamètre d'exploitabilité) avec plusieurs modalités d'agrégation spatiale de la coupe (depuis le jardinage pied à pied jusqu'à la sylviculture par trouées).

Une deuxième série d'expériences a été réalisée pour explorer de manière plus exhaustive l'effet des différents paramètres de l'algorithme de gestion, sur l'ensemble des indicateurs de production et de biodiversité. Nous avons réalisé une analyse de sensibilité des indicateurs de production et de biodiversité aux paramètres de gestion afin (i) d'évaluer l'influence des différents leviers de la gestion en futaie jardinée (paramètres d'entrée de l'algorithme de sylviculture) sur les différents indicateurs de structure, production et biodiversité étudiés ; (ii) de détecter les paramètres influents sur lesquels recentrer l'analyse pour ensuite (iii) d'estimer le signe et la forme de la réponse des différents indicateurs à la gestion (surfaces de réponse). Nous avons ensuite mis en œuvre une méthode d'analyse multicritère (fronts de Pareto) afin (iv) d'identifier les scénarii de gestion « non dominés » (optimisant localement l'ensemble des indicateurs étudiés) et (v) d'analyser et de discuter les compromis entre indicateurs de production et de biodiversité apparaissant le long de ces fronts de Pareto. Ce travail a permis d'identifier des scénarii de gestion intéressants, permettant de maximiser soit l'un des indicateurs de production ou de biodiversité, soit un compromis entre plusieurs indicateurs.

2.5 Expérimentations sylvicoles de terrain : protocoles et implantation

Le travail sur la mise en place de dispositifs expérimentaux de terrain a débuté par un bilan des indices d'hétérogénéité qu'il était possible de faire varier de manière indépendante lors d'une coupe forestière (Cordonnier *et al.* 2012). A l'occasion de cette synthèse, il est apparu que l'indice de concentration de *Gini* présentait plusieurs propriétés intéressantes, l'une d'entre elle étant d'apporter des éléments d'information sur l'importance relative de la compétition symétrique et asymétrique à l'échelle du peuplement.

Nous avons ensuite mis en place quatre expérimentations dans des peuplements hétérogènes afin de tester des sylvicultures basées sur des variations du diamètre d'exploitabilité. L'approche par expérimentation compare sur chaque site deux sylvicultures où le diamètre d'exploitabilité des résineux de montagne (sapin et épicéa) diffère d'au moins 10cm. Nous avons choisi deux types de mélanges initiaux : deux peuplements de mélanges équilibrés sapin-épicéa et deux peuplements à majorité sapin (plus de 70% de sapin en surface terrière) croisés avec deux localisations (Alpes et Jura). Chaque unité expérimentale comprend une zone tampon de 15m de large délimitant une zone centrale de mesure dans laquelle sont effectuées des observations sur la régénération (et des observations sur le bois mort au sol et sur pied. Les remesures sont réalisées à la fréquence de la mi-rotation (4 ou 5 ans selon la fertilité du site). L'application des itinéraires sylvicoles correspondant aux deux modalités testées repose pour une grande part sur l'utilisation de l'algorithme de Lafond *et al.* (2013).

3. Principaux Résultats

3.1 Evaluation et Amélioration du modèle Samsara

Les résultats de l'évaluation du modèle Samsara2 seront détaillés dans (Courbaud et al., in prep). La capacité du modèle à reproduire correctement les dynamiques passées des peuplements de Queige apparaît globalement satisfaisante. Les résultats sont toutefois assez variables d'une parcelle à l'autre. Les caractéristiques prédites pour les peuplements de Queige après 50 ans de simulation sont relativement proches des caractéristiques observées par inventaire statistique, et les biais de prédiction sont du même ordre de grandeur que l'incertitude sur la valeur de référence (incertitude sur les valeurs moyennes observées sur l'ensemble des placettes lors des inventaires statistiques).

L'analyse de sensibilité de Samsara2, a permis de détecter les principaux facteurs influents. Les facteurs les plus influents sont l'état initial du peuplement et deux paramètres de croissance pour chaque espèce. Ces derniers influencent en particulier la surface terrière finale, le diamètre moyen final, la structure en diamètre et la proportion relative des deux espèces. On note également l'influence d'un paramètre de régénération, qui affecte la densité et composition des perches, la densité totale et la structure en diamètre. Les paramètres de mortalité ont une influence plutôt moyenne, portant surtout sur la densité totale.

La calibration des paramètres les plus influents, à l'aide de la méthode ABC, s'est avérée très pertinente. Par rapport à la calibration initiale, elle a permis de calibrer Samsara2 pour un nouveau site : Prénovel ; d'obtenir des valeurs de paramètres propres à chaque peuplement ; d'estimer les valeurs des paramètres pour le hêtre, espèce absente du jeu de données initial.

3.2 Développement d'outils de simulation de gestion

Les algorithmes de sylviculture développés dans le projet sont disponibles sur la plateforme Capsis et peuvent être adaptés facilement pour être utilisés avec d'autres modèles de dynamique forestière individu-centrés.

L'algorithme, qui permet de diriger la sélection des arbres coupés est très souple et permet de simuler des stratégies sylvicoles variées. Il est par ailleurs adaptatif, c'est-à-dire qu'il fait évoluer de lui-même la proportion de récolte ou d'éclaircie au cours de la dynamique du peuplement. La description de cet algorithme ainsi qu'un exemple d'expériences de simulation illustrant son potentiel a été publié dans (Lafond, Lagarrigues et al. 2013).

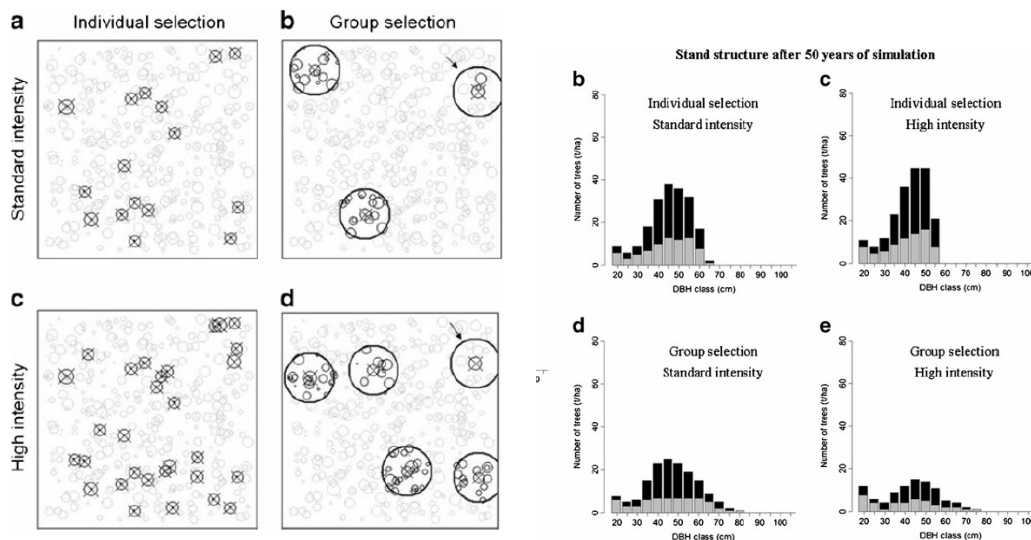


Figure 1 : Sélection des tiges par l'algorithme de sylviculture, en fonction de l'intensité et de l'agrégation spatiale des coupes et effet de la gestion sur le peuplement, après 50 ans de simulation ((Lafond, Lagarrigues et al. 2013).

3.3 Développement d'indicateurs de production et de biodiversité

Les prédictors clés de la richesse spécifique – soit en termes de significativité des effets, soit en termes de magnitude des effets – étaient la richesse en essences, l'abondance totale, de l'épicéa et du sapin (couvert ou surface terrière) et la surface terrière des arbres non précomptables (moins de 17.5 cm de diamètre à hauteur de poitrine) (Zilliox and Gosselin 2014). Les effets de ces variables sur la richesse spécifique des différents groupes, quand ils étaient non-négligeables ou significatifs, étaient plutôt positifs pour la richesse en essences et presque exclusivement négatifs pour les variables d'abondance. Il faut néanmoins noter que l'effet majoritairement positif de la richesse en essences disparaissait – voire était inversé – quand on restreignait l'analyse aux groupes écologiques d'herbacées (Zilliox and Gosselin 2014, Tableau 5). La présence de Très Gros Bois n'est pas ressortie comme une variable déterminante pour la flore du sous bois, à l'échelle des petites placettes IFN.

Notre second objectif était de savoir si ces relations entre indicateurs dendrométriques et richesse spécifique des groupes de la flore vasculaire variaient en fonction des conditions écologiques. Nous avons sélectionné quatre gradients : la pente et l'orientation, le pH du sol estimé par la flore, l'altitude et la région. Les modèles incluant les interactions entre ces gradients et les indicateurs dendrométriques étaient globalement meilleurs que les modèles sans interaction, indiquant l'intérêt de prendre en compte le contexte écologique de la relation entre indicateurs et biodiversité.

Deux de ces gradients – l'orientation et le pH – modifiaient les réponses à d'autres indicateurs tels que l'abondance de l'épicéa et du sapin et la surface terrière des arbres non précomptables, de manière « convergentes » pour l'ensemble des groupes écologiques. C'est-à-dire que l'effet de l'indicateur sur la biodiversité changeait en général dans le même sens et avec à peu près la même magnitude le long du gradient, quel que soit le groupe écologique. A l'inverse, le gradient d'altitude semblait interagir avec de nombreux indicateurs de manière assez variable entre groupes écologiques. Par ailleurs la réponse des groupes écologiques à deux indicateurs – la surface terrière des essences autres que le sapin et l'épicéa et la richesse en essences – était influencée par les trois gradients analysés (orientation, pH et altitude) de manière là encore très hétérogène entre les groupes. En d'autres termes, une ouverture du peuplement aurait un effet globalement positif sur la diversité de la flore en conditions d'ubac ou de pH plus acide et plutôt négatif en conditions d'adret ou de pH peu acide. Bien sûr, il reste à mieux comprendre ce qui se cache derrière ces résultats. On peut néanmoins noter qu'ils font écho à des hypothèses selon lesquelles les interactions entre espèces (ici entre strate arborée et richesse du sous-bois) seraient davantage positives en conditions abiotiques stressantes qu'en conditions abiotiques non stressantes.

Les trois familles d'indicateurs de biodiversité dont nous disposons (caractéristiques du peuplement vivant telles que densité de gros et très bois ou diversité des diamètres, caractéristiques du bois mort, et richesse spécifique des herbacées) s'avèrent très complémentaires. Nos simulations test montrent en effet qu'elles répondent différemment à la gestion. Par ailleurs, elles nous informent sur des compartiments de biodiversité différents. Elles peuvent donc nous aider à mettre en évidence d'éventuels compromis entre compartiments de biodiversité.

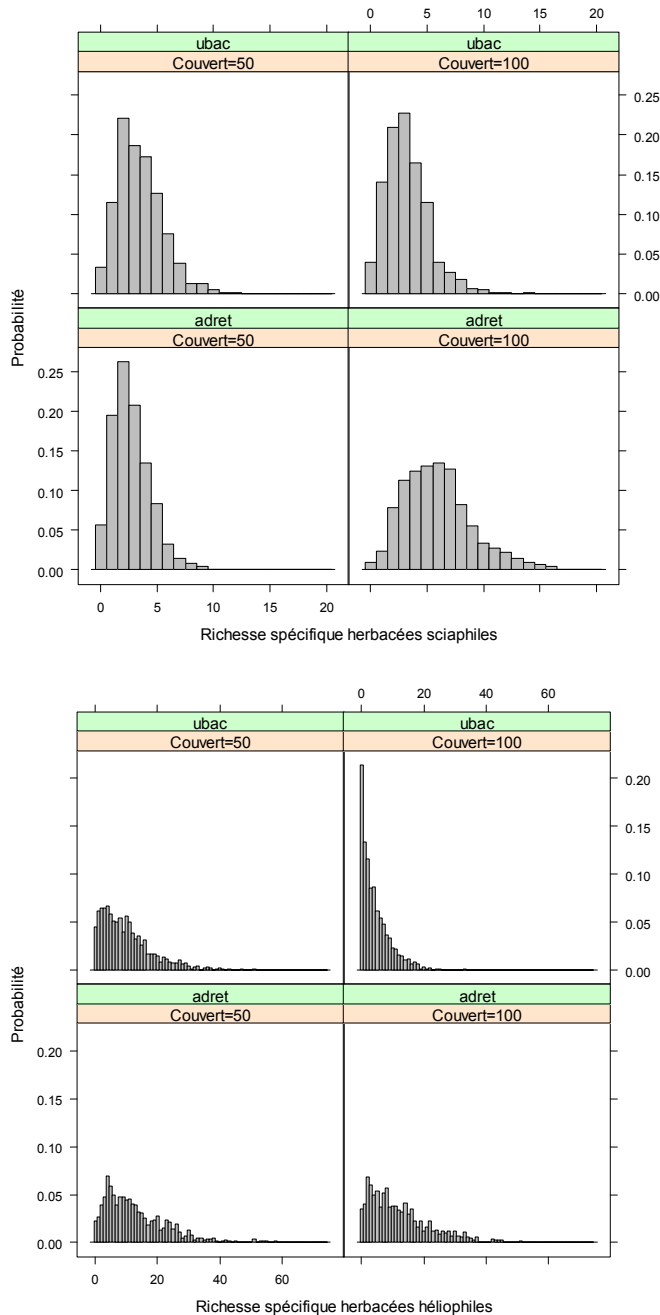


Figure 2 : Distribution de probabilité prédite des richesses spécifiques des herbacées sciaphiles (à gauche) et héliophiles (à droite) en adret (orientation Sud) et ubac (orientation Nord), en situation pentue, pour un Couvert total du peuplement de 50% ou un couvert total du peuplement de 100%.

3.4 Réalisation des expériences de simulation

➤ Effet de l'intensité de gestion et de l'agrégation des prélèvements sur la structure et la composition du peuplement

La première expérience de simulation a donné lieu à la publication d'un article (Lafond, Lagarrigues et al. 2013). Elle a permis d'explorer l'effet de l'intensité de gestion et de l'agrégation des prélèvements sur la structure et la composition du peuplement, dans une logique de renouvellement continu du peuplement, de maintien durable de la structure irrégulière et du mélange. Nous avons testé 3 états initiaux différents, issus de la forêt de Queige en Savoie. L'effet de l'état initial disparaissait après quelques décennies de simulation. Nous présentons ici les résultats de la simulation effectuée sur le peuplement n°38, initialement un peu surcapitalisé (surface terrière de 37.6 m²/ha). Ce peuplement est assez représentatif d'un grand nombre de peuplements des Alpes du Nord.

Quand le peuplement initial est fortement capitalisé (surface terrière > 35 m²/ha) et riche en gros bois (nombreux arbres de diamètre supérieur à 60cm), la combinaison d'un diamètre d'exploitabilité modéré (52.5 cm) associée à une forte intensité de prélèvement parmi les arbres supérieurs à ce diamètre (respect plus strict du diamètre d'exploitabilité) permet une augmentation des volumes coupés à chaque intervention (calés alors sur le haut de la fourchette autorisée) et une récolte rapide des gros bois. Après quelques rotations, les récoltes se calent néanmoins sur la production du peuplement. Ce phénomène explique que les volumes moyens récoltés sur la totalité de la simulation (150 ans) soient assez similaires pour tous les itinéraires. Une forte intensité de prélèvement conduit également à une diminution de la diversité structurale du peuplement, avec une densité de gros bois et une diversité des diamètres plus faible (indice de Gini faible).

Dans la gamme de tailles de trouées considérées (0 – 5000 m²), la surface terrière diminue et l'irrégularité en diamètre augmente (Gini plus élevé) avec la taille de la trouée. Ces deux effets s'expliquent par le fait que les trouées diminuent le poids du critère diamètre dans la sélection des arbres coupés. Les trouées sont implantées préférentiellement sur des bouquets de gros bois, mais suppriment également les bois moyens et petits bois se trouvant dans la trouée (comme l'indique la diminution du diamètre moyen des arbres récoltés). La contrainte de ne récolter que des arbres supérieurs au diamètre d'exploitabilité est donc relâchée et les prélèvements augmentent légèrement. A l'inverse, les trouées évitent les zones moins chargées du peuplement, même si de gros bois isolés s'y trouvent, ce qui explique la diversité des diamètres à l'échelle du peuplement (à la fois plus de petits et plus de gros-très gros bois). Les trouées augmentent logiquement l'hétérogénéité spatiale du peuplement (baisse de l'indice de Clark-Evans). Le recrutement de perches augmente avec la taille des trouées et atteint un plateau à partir d'une surface de trouée de 500 m². Le léger effet négatif des trouées de 5000m² doit être interprété avec précaution, au regard des limites du modèle (dynamique de peuplement régulier au sein de trouées), bien qu'il soit cohérent avec des observations faites dans d'autres études (Coates 2002). Par rapport à une sylviculture irrégulière pied-à-pied (diamètre d'exploitabilité de 52.5 cm), une sylviculture par micro-trouées (500 m²) favorise la diversité structurale et la régénération du peuplement à l'échelle de peuplements de 4ha. Toutefois, contrairement à nos hypothèses de départ, la sylviculture par micro-trouées ne semble pas suffisante pour maintenir à long terme la proportion d'épicéa (qui diminue au profit du Sapin), du moins avec les paramètres utilisés dans ces simulations, ce qui est cohérent avec la dynamique de régénération observée dans la forêt de Queige. Néanmoins, les paramètres de régénération ont une influence très forte sur la composition de la régénération et du peuplement. Des simulations effectuées ultérieurement avec d'autres valeurs de paramètre de régénération ont montré un effet positif des trouées sur la régénération et le maintien de l'épicéa. Il semble donc nécessaire d'affiner ces résultats en tenant compte du contexte environnemental, avant de les généraliser.

Dans les conditions de l'étage montagnard des Alpes intermédiaires, une sylviculture par micro-trouées d'environ 500 m² avec une intensité de prélèvement moyenne (maximum 50% des arbres supérieurs à chaque intervention si le diamètre d'exploitabilité est de 52.5 cm) semble un bon compromis permettant de maintenir la structure irrégulière du peuplement de manière durable (Gini relativement élevé), de réaliser une récolte de bois satisfaisante, et de maintenir l'hétérogénéité du peuplement favorable à la fois à la durabilité du traitement (régénération facilitée) et à la biodiversité.. L'influence du contexte environnemental sur ces résultats mériterait d'être précisée par des travaux complémentaires.

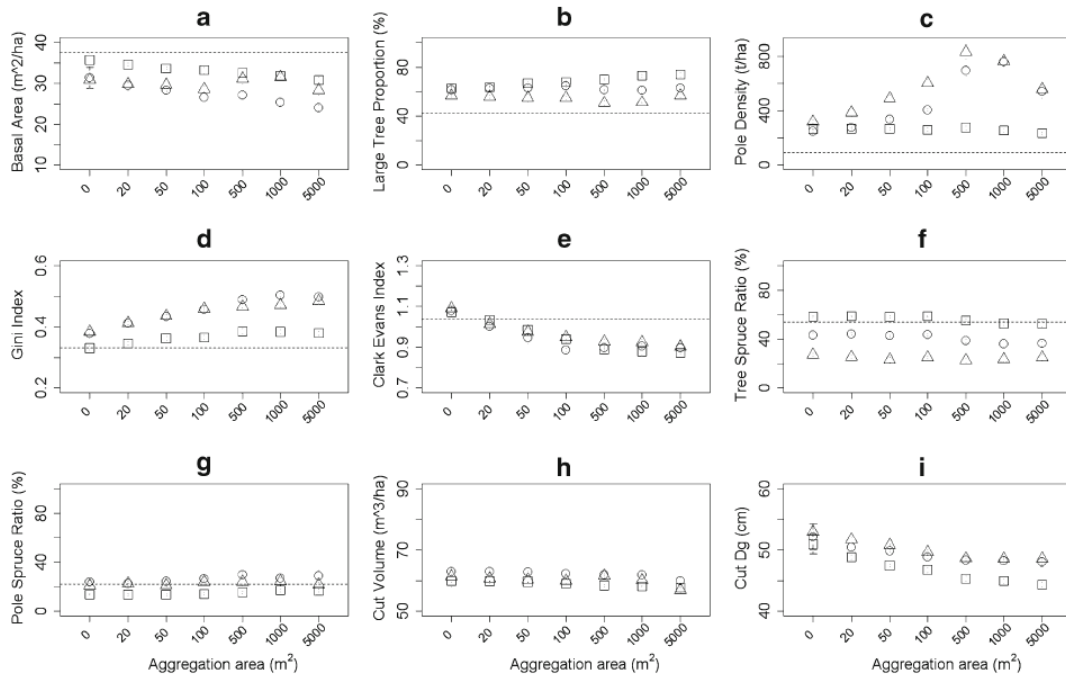


Fig. 3 Effect of group size on stand production and heterogeneity, at different time scales. Here are presented nine indicators describing the simulation results obtained for the cutting aggregation experiment (Exp1). Each plot gives the relation between the *Aggregation area* parameter modalities (x axis) and one stand indicator (y axis), as observed after 50 years (*squares*), 100 years (*circles*), and 150 years (*triangles*), compared to initial values (*dotted lines*). a and b give information about living stock, c about regeneration, d to g about heterogeneity, and h and i about wood production. Each *point* represents the mean value calculated on the five simulations done for the given silvicultural modality, and *error bars* represents one standard deviation

(*triangles*), compared to initial values (*dotted lines*). a and b give information about living stock, c about regeneration, d to g about heterogeneity, and h and i about wood production. Each *point* represents the mean value calculated on the five simulations done for the given silvicultural modality, and *error bars* represents one standard deviation

Figure 3 : Effet de la taille des trouées sur la structure, la composition et la production de bois ((Lafond, Lagarrigues et al. 2013).

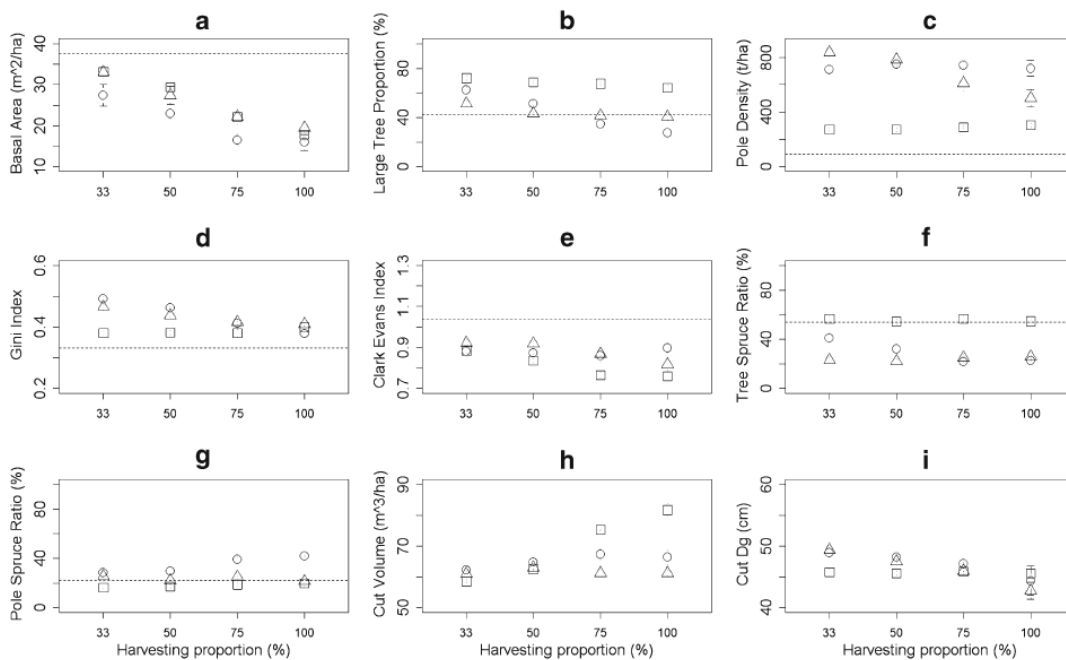


Fig. 5 Effect of harvesting intensity on stand production and heterogeneity at different time scales, in the case of group selection cutting (group size= 500 m²). Here are presented nine indicators describing the results obtained for the harvesting intensity experiment in the case of group selection cutting based on aggregation areas of 500 m² (Exp3). Each plot gives the relation between the *Harvesting proportion* parameter modalities (x axis) and one

stand indicator (y axis), as observed after 50 years (*squares*), 100 years (*circles*), and 150 years (*triangles*), compared to initial values (*dotted lines*). a and b give information about living stock, c about regeneration, d to g about heterogeneity, and h and i about wood production. Each *point* represents the mean value calculated on the five simulations done for the given silvicultural modality, and *error bars* represents one standard deviation

Figure 4 : Effet de l'intensité des prélèvements sur la structure, la composition et la production de bois. ((Lafond, Lagarrigues et al. 2013)

➤ Analyse de sensibilité des indicateurs de production et biodiversité aux paramètres de gestion

Une approche par analyse de sensibilité présente l'avantage de faire varier l'ensemble des paramètres et ainsi évaluer leur influence sur les variables de sortie, seuls ou en interaction. Nous avons testé dans cette étude non seulement l'effet des paramètres de gestion mais également un effet « peuplement » représentant un gradient de productivité. Les résultats indiquent que cet effet peuplement est influent à très influent pour la plupart des indicateurs étudiés.

Les facteurs de gestion ayant une influence forte à très forte sur un ou plusieurs indicateurs sont : la taille des groupes d'arbres récoltés (trouées de 0 à 2500m² dans des peuplements de 4ha), le diamètre d'exploitabilité, la proportion maximale d'arbres mûrs (d ≥ diamètre d'exploitabilité) récoltés à chaque passage, la proportion maximale d'arbres coupés en éclaircie, la proportion maximale de bois mort frais récolté, la quantité standard prélevée et le seuil de mise en conservation des espèces minoritaires (% min de la surface terrière, en dessous de laquelle les arbres de cette espèce ne sont plus sélectionnables pour la coupe). L'analyse des fronts de Pareto a permis de confirmer l'existence de compromis entre indicateurs, notamment entre le volume de bois récolté et différents indicateurs de biodiversité (densité de très gros bois vivants, densité de gros bois morts debout, richesse spécifique de la strate herbacée...). On note également l'existence de compromis entre différents indicateurs d'un même service : entre volume récolté et dimension des arbres coupés, entre richesse spécifique des herbacées intermédiaires et héliophiles, ou encore entre cette dernière et la densité des très gros bois vivants.

L'analyse approfondie des itinéraires de gestion identifiés par les fronts de Pareto est complexe et nous avons jugé préférable de ne pas fournir de liste d'itinéraires à préconiser avant d'avoir conduit des analyses complémentaires. En effet, les interactions entre paramètres de gestion sont nombreuses, amenant des itinéraires a priori très différents à produire des résultats très proches. Il semble donc nécessaire de mieux quantifier ses interactions et de les intégrer dans les analyses de similarité entre itinéraires, pour pouvoir ensuite discuter des modalités de gestion avec les gestionnaires et élaborer conjointement des recommandations sylvicoles. Ce travail est en cours actuellement et donnera lieu à un article prévu en 2015.

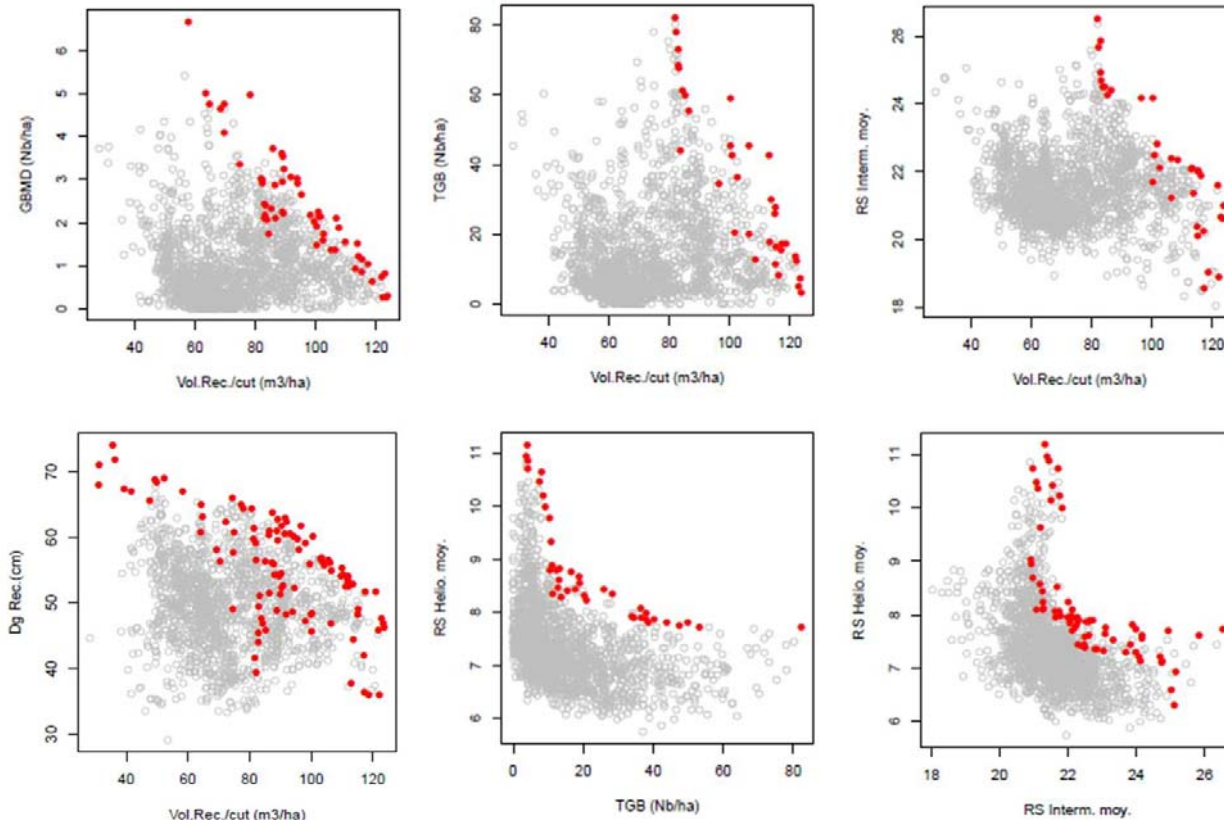


Figure 5 : Visualisation de compromis entre indicateurs grâce aux fronts de Pareto.

3.5 Expérimentations sylvicoles de terrain

La synthèse de la bibliographie a permis de mettre en évidence quatre dimensions d'hétérogénéité dans les peuplements forestiers : hétérogénéité des espèces, hétérogénéité des dimensions, hétérogénéité spatiale des arbres et hétérogénéité des facteurs pédologiques. Cette synthèse a attiré notre attention sur un indice encore peu utilisé en foresterie pour caractériser l'inégalité des dimensions des arbres : l'indice de concentration (ou indice d'inégalité) de *Gini*. Cet indice est très employé en sciences économiques pour caractériser les inégalités de revenus. Dans le cadre de ce projet, nous avons pu montrer qu'il était possible de relier cet indice à l'importance de la compétition asymétrique dans un peuplement pur (Cordonnier & Kunstler, soumis).

Les possibilités de manipulation du taux de mélange et de la diversité des tailles dépendent de l'équilibre du mélange à l'état initial. Il est beaucoup plus aisé de réduire la diversité des tailles que de l'augmenter. Un des résultats intéressants est que l'on peut, dans les situations équilibrées, créer des différences de taux de mélange importantes en une seule coupe en maintenant un même niveau d'hétérogénéité des diamètres et un même niveau de diamètre moyen quadratique à l'échelle du peuplement.

SITE	MASSIF	FORET	SUBSTRAT	PEUPLT	ALTITUDE	PENTE	EXPOSITION	T° MOY.	P. MOY.
1	Jura	Communale de Saint-Pierre (P41)	calcaire du Jurassique supérieur	Sapin-Epicéa	890m	0°	-	7.9	1852
2	Jura	Domaniale de Noiremont (P8)		Sapin pur	1220m	0°	-	5.8	1745
3	Belledonne	Communale de La Table (P9)	Dépôts glaciaires (moraines) principalement du Würm. Dépôts fluvio-glaciaires ou glacio-lacustres localement associés.	Sapin-Epicéa	1030	18°	Nord-Ouest	8.3°	1477mm
4	Belledonne	Domaniale de Saint-Hugon (P38)		Sapin pur	1330	15°	Nord-Est	7.7°	1332mm

Tab.2 : Caractéristiques générales des quatre sites d'étude. Précipitations et températures annuelles moyennes : données Aurehly (1981-2010).

SAINT-PIERRE

UE	MODALITE	ETAT	G	N	DG	G SAP.	N SAP.	G EPI.	N EPI.	G FEUIL.	N FEUIL.	GINI
1	Forte	avant intervention	33.8	317	36.8	17.9	184	12.0	68	3.8	64	0.61
		après intervention	27.8	291	34.9	15.7	174	8.4	54	3.8	63	0.60
2	Faible	avant intervention	36.4	350	36.4	17.0	172	16.4	116	3.0	62	0.56
		après intervention	28.4	312	34.1	14.1	155	11.4	95	3.0	62	0.54

LA TABLE

UE	MODALITE	ETAT	G	N	DG	G SAP.	N SAP.	G EPI.	N EPI.	G FEUIL.	N FEUIL.	GINI
1	Forte	avant intervention	43.6	378	38.3	23.2	233	20.2	142	0.2	3	0.49
		après intervention	33.7	320	36.6	19.2	209	14.3	108	0.2	3	0.50
2	Faible	avant intervention	38.7	386	35.7	18.5	196	19.8	183	0.7	7	0.47
		après intervention	29.3	324	33.9	13.6	168	15.3	149	0.7	7	0.47

Tab.3 : Résultats avant et après intervention sur le site de Saint-Pierre et le site de La Table. Les surfaces terrières sont fournies en m².

4. Discussion

4.1 Implications pratiques :

Quand le peuplement initial est fortement capitalisé (surface terrière > 35 m²/ha) et riche en gros bois (nombreux arbres de diamètre supérieur à 60cm), la combinaison d'un diamètre d'exploitabilité modéré (52.5 cm) associée à une forte intensité de prélèvement parmi les arbres supérieurs à ce diamètre (respect plus strict du diamètre d'exploitabilité), se traduit par une décapitalisation et une récolte élevée pendant quelques rotations. Cependant, après quelques rotations, la récolte est ajustée à la production du peuplement et se stabilise. Une forte intensité de prélèvement dans les classes de diamètre supérieures au diamètre d'exploitabilité se traduit par l'élimination de la majorité des très gros bois. Ceci n'a que peu d'influence sur la récolte totale en volume, mais conduit à une diminution du volume moyen des arbres récoltés. En termes de production, les produits récoltés peuvent alors être considérés comme plus en adéquation avec la demande industrielle. En revanche, l'élimination des très gros bois a un effet négatif sur les indicateurs de biodiversité caractérisant l'hétérogénéité de la structure forestière (diversité des diamètres) et la présence d'habitats de forêts mûres (densité de très gros bois, abondance et diversité du bois mort). On peut donc craindre une diminution de la diversité des niches et une diminution des habitats favorables aux espèces saproxyliques inféodées aux écosystèmes forestiers.

Ce résultat est cependant fortement dépendant de la répartition spatiale des interventions. Une sylviculture par micro-trouées (500 m²) permet d'atteindre les mêmes niveaux de production en volume que la sylviculture pied à pied. En termes de production, elle conduit cependant à un diamètre moyen des produits récoltés plus faible. En effet, même si les trouées sont assises préférentiellement sur les zones de gros bois, elles laissent des très gros bois isolés dans le peuplement et prélèvent en contrepartie des bois moyens situés dans la trouée. En termes de production, il y a donc une augmentation de l'hétérogénéité des produits récoltés. En termes de biodiversité, les micro-trouées augmentent la diversité structurale et la régénération par rapport à la sylviculture pied-à-pied. Elles favorisent donc une plus grande diversité de niches. La densité de très gros bois apparaît supérieure dans le peuplement géré en micro-trouées qu'en pied-à-pied, puisque des très gros bois isolés ne sont pas récoltés. Cependant cet effet semble diminuer au fur et à mesure des rotations, une fois l'ensemble du peuplement parcouru par les trouées. La sylviculture par micro-trouées apparaît néanmoins comme une piste intéressante à explorer dans la recherche d'un compromis entre production et biodiversité. Elle permet en effet une production soutenue, bien que plus hétérogène qu'en pied à pied, tout en favorisant la biodiversité au travers d'une plus grande hétérogénéité des habitats et la présence de quelques très gros bois isolés. Les micro-trouées favorisent également une régénération abondante.

Le nombre de leviers de gestion réellement influents est relativement réduit et la plupart de ces leviers sont communs aux différents indicateurs étudiés. Diamètre d'exploitabilité, intensité de récolte parmi les arbres supérieurs à ce diamètre, et taille des trouées sont les paramètres de gestion les plus influents. Des compromis apparaissent entre indicateurs de production et de biodiversité (volume de bois récolté vs. densité de très gros bois vivants, densité de gros bois morts debout, richesse spécifique de la strate herbacée...). On note également des compromis entre différents indicateurs de production (volume récolté vs. dimension des arbres coupés) et entre différents indicateurs de biodiversité (richesse spécifique des sciaphiles vs. héliophiles ou encore richesse des héliophiles vs. densité des très gros bois vivants). L'analyse approfondie des itinéraires de gestion et l'identification de modalités assurant un bon compromis entre production et biodiversité est toutefois délicate à ce stade et demande des analyses complémentaires pour mieux tenir compte des nombreuses interactions entre facteurs sylvicoles.

Si la recherche de compromis à l'échelle de la parcelle est intéressante, il est évident que l'analyse doit également se faire à l'échelle du paysage. La recherche du même compromis sur toutes les parcelles d'un massif forestier risquerait en effet de réduire fortement la gamme des services fournis en éliminant certains compartiments de biodiversité inféodés à des types de peuplements spécifiques (biodiversité spécifique des îlots de vieillissements par exemple) ou en réduisant trop fortement certains produits demandés par l'industrie. Une mosaïque d'itinéraires de gestion, paraît donc souhaitable à l'échelle du massif. La démarche initiée dans ce travail nous semble à même de préciser de quelle nature doit être cette mosaïque. Elle permet en effet d'identifier un ensemble de modalités de gestion performantes pour un service ou une combinaison de services (modalités situées sur les fronts de Pareto, c'est-à-dire celles qui maximisent un service pour des niveaux fixés

des autres services) par opposition à des modalités de gestion « à éviter », car dominées par d'autres modalités pour au moins un indicateur. Les mosaïques paysagères à favoriser sont donc celles qui combinent différentes modalités de gestion distribuées le long du front de Pareto. La production de bois et la biodiversité résultantes à l'échelle du paysage résultera alors du choix des surfaces relatives dévolues à ces différentes modalités.

Les travaux effectués sur les indicateurs de biodiversité floristique ont confirmé l'intérêt de considérer la biodiversité de manière plurielle (approche par groupes écologiques et par espèce). Ils ont par ailleurs indiqué que les relations entre indicateurs et biodiversité étaient contingentes puisqu'elles variaient le long de gradients écologiques. Ce double niveau de complexité ou de variabilité n'ont pas empêché quelques résultats convergents : ainsi il est apparu qu'en condition d'adret ou de pH acide, on avait intérêt à avoir des peuplements fermés alors qu'en condition d'ubac ou de pH moins acide, des peuplements ouverts étaient favorables à la diversité floristique.

Le projet a confirmé la difficulté de mettre en place des expériences de sylviculture irrégulière sur le terrain. En effet nous nous sommes confrontés à de nombreuses difficultés pour trouver des paires de peuplements aux conditions de sol homogènes, avec des taux de mélange et une irrégularité définis. L'équilibre de départ conditionne grandement les possibilités de manipulation de la structure et du mélange ensuite et l'approche théorique a permis de hiérarchiser nos priorités sur les conditions recherchées. Le couplage entre approches de modélisation et expérimentation de terrain nous semble donc inévitable à l'avenir.

4.2 Limites et perspectives

L'analyse de sensibilité effectuée avec la méthode de Morris a permis d'évaluer l'influence relative des différents facteurs d'entrée à moindre coûts (en termes de temps de simulation) mais donne des indications assez sommaires sur les interactions entre facteurs. Une analyse complémentaire a été initiée d'une part pour quantifier de manière plus fine les effets de chaque facteur et d'autre part pour synthétiser la réponse de chaque indicateur de production ou de biodiversité aux paramètres de gestion à travers un métamodèle (modèle simplifié construit par régression sur les résultats de simulation). Ces métamodèles permettent de visualiser les surfaces de réponse d'un indicateur à plusieurs leviers, faisant apparaître les non-linéarités dans les réponses et les interactions entre facteurs (Lafond 2014). Ils suggèrent que dans un certain nombre de cas, l'effet d'un levier de gestion sur un indicateur peut être compensé par l'action sur un autre levier. La rétention volontaire d'un certain nombre de très gros bois (« arbres bio ») dans le peuplement, semble ainsi permettre dans une certaine mesure de compenser l'effet négatif sur la biodiversité d'une diminution du diamètre d'exploitabilité. Cependant l'efficacité de ces stratégies de rétention, leur coût en termes de production et leur durabilité sont à analyser en détail. Leur étude mérite sans aucun doute un projet de recherche à part entière, car ils représentent aujourd'hui une piste particulièrement intéressante d'amélioration du compromis production-biodiversité en forêt.

Par ailleurs, l'analyse des fronts de Pareto, initiée dans ce projet, est à poursuivre pour identifier clairement quels sont les itinéraires les plus performants soit pour maximiser certains indicateurs, soit pour assurer un compromis équilibré. L'analyse des fronts de Pareto devrait permettre de vérifier l'hypothèse selon laquelle des gammes intermédiaires d'intensité de gestion pourraient permettre d'obtenir des compromis entre production de bois et maintien de la biodiversité sur une parcelle donnée.

Construire des indicateurs indirects de biodiversité riches et pertinents est une tâche difficile au regard de la diversité des réponses des espèces aux conditions de milieu. Il paraît donc essentiel d'affiner et d'enrichir la palette des indicateurs disponibles. A la suite de ce projet, deux pistes ont été initiées dans ce sens. La première est la réalisation de modèles d'abondance pour les différents groupes écologiques de la flore vasculaire. Ces modèles devraient apporter des informations complémentaires aux modèles de richesse spécifique de la flore. Ils seront plus faciles à intégrer à différentes échelles (les abondances de différentes sous-placettes peuvent être cumulées à l'échelle du peuplement, à la différence des richesses) et permettront de cibler des espèces indicatrices particulières. La deuxième piste est la réalisation d'un modèle de dynamique des dendromicrohabitats (cavités, fentes, décollements d'écorces, etc.) dans le peuplement. Ceux-ci permettront de mieux évaluer l'impact du prélèvement ou de la rétention de très gros bois sur la biodiversité : les dendromicrohabitats sont en effet présents de manière plus fréquente sur les très gros bois, mais pas sur l'ensemble d'entre eux et des stratégies de rétention spécifique des arbres porteurs de dendromicrohabitats pourraient s'avérer favoriser un meilleur compromis production-biodiversité que la simple rétention de très gros bois.

En intégrant dans l'analyse quatre peuplements initiaux différents correspondant à un gradient de fertilité, nous avons vu que la dynamique du peuplement était sensible aux paramètres des processus démographiques du modèle Samsara. L'extrapolation à d'autres forêts des résultats obtenus doit donc être faite avec prudence. L'étude des interactions entre gradient environnemental, paramètres de gestion, production et biodiversité nous semble un axe important à développer dans de futures recherches.

4.3 Recommandations :

Ce projet a permis de mettre en évidence un certain nombre d'avantages et d'inconvénients que présentent différentes stratégies sylvicoles en termes de production et de biodiversité. Il a cependant surtout permis de construire une stratégie de modélisation et d'analyse qui demande à être poursuivie pour aboutir à des résultats complets.

Dans les sapinières-pessières gérées en traitement irrégulier pied-à-pied, la réduction des diamètres d'exploitabilité autour de 52.5 cm, avec un fort prélèvement des arbres supérieurs à ce diamètre, semble compatible avec le maintien à long terme d'une structure irrégulière avec un capital sur pied autour de 25-35 m²/ha. Cette stratégie permet au bout de quelques rotations de rapprocher les produits récoltés de la demande industrielle, mais entraîne un impact négatif sur des indicateurs de biodiversité importants, en particulier la diversité structurale, qui favorise une diversité de niches et la présence de très gros bois qui est indispensable pour la conservation d'espèces inféodées aux forêts matures (les très gros bois favorisent les nécessaires aux espèces cavicoles et la production de gros bois morts importants pour les espèces saproxyliques).

La création de micro-trouées d'environ 500 m² avec un diamètre d'exploitabilité relativement élevé (supérieur ou égal à 52.5 cm) et une intensité de prélèvement moyenne (maximum 50% des arbres supérieurs au diamètre d'exploitabilité en une coupe) semble intéressante à considérer dans la recherche d'un compromis production-biodiversité. Elle permet une production en volume comparable, bien que plus hétérogène. Elle favorise la diversité des niches, le maintien de quelques très gros bois dispersés dans le peuplement et la résilience du peuplement grâce à une régénération plus fournie.

Ces résultats, très sensibles aux paramètres de croissance et de régénération utilisés dans le modèle sont cependant à moduler selon les conditions environnementales. Les paramètres utilisés ici représentaient l'étage montagnard dans les Alpes avec une dynamique de croissance et de régénération modérées.

Les derniers résultats du projet suggèrent que des opérations ciblées sur la rétention d'éléments déterminants pour la biodiversité (préservation des très gros bois et préservations de gros bois morts) peuvent favoriser certains compartiments de biodiversité spécifiquement forestiers (insectes et champignons saproxyliques, oiseaux, chauve-souris) sans amputer la production de bois. L'exploration de ces nouvelles pistes correspond au fort intérêt qui se fait jour autour de la conservation d'arbres porteurs de dendromicrohabitats et la création d'îlots de sénescence. Elles méritent clairement de nouveaux travaux.

Le projet a mis en évidence des compromis production-biodiversité à l'échelle du peuplement. Le choix du niveau de compromis désiré est cependant une décision de gestion. Par ailleurs, les compartiments de biodiversités les plus dépendants des structures de peuplements matures ne peuvent être conservés que si l'on accepte de ne pas récolter tous les arbres mûrs. Une mosaïque de modalités de gestion paraît donc souhaitable à l'échelle du massif. Ces modalités doivent cependant être choisies parmi un sous-ensemble de modalités que l'on peut juger comme performantes car elles maximisent une combinaison donnée de services, ou une combinaison d'indicateurs complémentaires au sein d'un même service.

4.4 Partenariats

Les nombreux échanges entre partenaires ONF et Irstea que le projet a motivé ont été particulièrement intéressants. Ces échanges ont permis d'identifier des failles dans le modèle Samsara et de les corriger, de construire un algorithme de sylviculture opérationnel pour le gestionnaire, d'utiliser les données de gestion pour l'évaluation et la recalibration du modèle, de discuter des résultats de simulation d'itinéraires sylvicoles, et de réaliser ensemble la prospection et

l'installation des dispositifs expérimentaux. Ce projet a donc fortement renforcé le partenariat Irstea-ONF.

4.5 Réalisations pratiques et valorisation :

➤ Logiciels

Nous avons mis au point d'une chaîne de simulation dans la plateforme Capsis (modèle de dynamique Samsara2 + algorithmes de coupe + indicateurs de production et de biodiversité). Au-delà du projet, elle a été utilisée sur marteloscope et des ateliers sont initiés pour la R&D de l'ONF.

➤ Dispositifs expérimentaux

Quatre dispositifs expérimentaux de long terme ont été installés : deux dans les Alpes et deux dans le Jura. Ces dispositifs seront suivis dans les prochaines années.

➤ Publications scientifiques et techniques à comité de lecture parues

Lafond, V., Cordonnier, T., De Coligny, F. & Courbaud, B. (2012b). Reconstructing harvesting diameter distribution from aggregate data. *Annals of Forest Science* 69: 235-243.

Gosselin, F. (2012). Indicateurs de biodiversité forestière utilisant la richesse, l'abondance, et la composition en essences: réflexions méthodologiques à propos de leur mise à l'épreuve. *Revue Forestière Française* 64: 733-739.

Cordonnier, T., Dreyfus, P. & Trouvé, R. 2012. Quelles dimensions et indices d'hétérogénéité privilégier pour l'étude des peuplements forestiers ? *Revue Forestière Française* 64 : 773-787.

Lafond, V., G. Lagarrigues, et al. (2014). "Uneven-aged management options to promote forest resilience for climate change adaptation: effects of group selection and harvesting intensity." *Annals of Forest Science* 71(2): 173-186.

Zilliox, C. and F. Gosselin (2014). "Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space." *Forest Ecology and Management* 321: 105-116.

➤ Publications scientifiques à paraître

Lagarrigues, G., F. Jabot, et al. ((in press)). "Approximate Bayesian Computation to recalibrate individual-based models with population data: illustration with a forest simulation model." *Ecological Modelling*.

➤ Publications scientifiques prévues

Cordonnier, T. & Kunstler, G. The Gini concentration index brings asymmetric competition to light. Soumis dans *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics*.

Courbaud, B., Lafond, V., Lagarrigues, G., Vieilledent, G., Jabot, F. & Coligny (de), F. Integrating levels of organization in individual based model calibration and evaluation: example of the forest dynamic model Samsara. *revue cible: Ecological Modelling*.

Herpigny, B. & Gosselin, F. Analysing plant cover data quantitatively: customized cumulative beta distributions show promising results.

Lafond, V., Cordonnier, T. & Courbaud, B. Sensitivity analysis techniques for computationally expensive models: interest and applicability illustrated with the case of mixed and uneven-aged mountain forests. *revue cible: Ecological Modelling*.

Lafond, V., T. Cordonnier, B. Courbaud. (submitted). "Reconciling biodiversity conservation and timber production in uneven-aged mountain forests: identification of ecological intensification pathways." *Environmental management*.

➤ **Thèses**

Lafond, V. (2014). Sylviculture des forêts hétérogènes de montagne & compromis production-biodiversité: une approche par simulation, Université Joseph Fourier, Grenoble. Thèse de Doctorat: 180 p.

➤ **Rapports de stage**

Lagarrigues, G. (2012). Développement d'un algorithme de sylviculture. Master 1, Université Joseph Fourier / Irstea, Grenoble.

Lagarrigues, G. (2013). Variations des processus démographiques entre parcelles et massifs forestiers pour l'épicéa et le sapin : test d'une méthode Bayésienne approchée et perspectives pour l'étude de la coexistence des espèces dans les forêts gérées en futaie irrégulière. Master 2, Université Joseph Fourier / Irstea, Grenoble.

Trouvé, R. (2011). Possibilités d'actions sur la structure de peuplements adultes. Réflexions dans le cadre d'expérimentations menées en forêts hétérogènes., 81: AgroParisTech / Cemagref.

Zilliox, C., ed. (2012) *Indicateurs de biodiversité floristique en forêt : prise en compte de la variation de la relation entre indicateur et biodiversité en fonction des conditions stationnelles et de la région, dans les Alpes et le Jura français*. Master, Agro ParisTech Montpellier, Montpellier.

➤ **Présentations orales**

Courbaud, B. (2013). Integrating levels of organization in individual based model calibration and evaluation: example of the forest dynamic model Samsara. In *Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability in the context of Global Change* Toulouse, 28-31 October 2013.

Gosselin, F., Zilliox, C. (2012) Tree species composition and abundance as indicators of understory vegetation diversity in French mountain forests: a matter of scale and ecological context? IUFRO second International Conference on Biodiversity in Forest Ecosystems and Landscapes, Cork, IRL, 28/08/2012

Gosselin, F. (2012) Mélange, richesse et abondance des essences comme indicateurs de biodiversité en forêt. Pour une mise au banc d'essai des indicateurs de gestion forestière durable. Séminaire Midi Pile, 9 octobre 2012, Université d'Orsay.

Gosselin, F. (2013) Pour une approche multitaxonomique quantitative, comparative et contextualisée. Séminaire BGF, Bordeaux, Juin 2013.

Lafond, V. (2013a). Effet de la gestion sur les services écosystémiques des forêts hétérogènes de montagne : Analyse du compromis production- biodiversité par simulation. In *Forêts et écosystèmes cultivés : vers une intensification écologique* ? 3-4 décembre 2013, Grenoble.

Lafond, V. (2013b). Sensitivity analysis techniques for computationally expensive models: interest and applicability of two techniques illustrated with the case of mixed and uneven-aged mountain forests. In *Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability in the context of Global Change, Toulouse*, 28-31 October 2013.

Lafond, V. (2013a). Effet de la gestion en futaie irrégulière sur la production et la biodiversité en forêt hétérogène de montagne. In *CAQ16 - Prénovel*, 10 Avril 2013.

Lafond, V., Cordonnier, T. & Courbaud, B. (2012a). Can we maintain mixed, uneven-aged and productive forests ? In *Tackling climate change: the contribution of forest scientific knowledge*. Tours, 21-24 May 2012.

Lafond, V., Cordonnier, T. & Courbaud, B. (2012b). Etude de compromis production-biodiversité: une méthode fondée sur la modélisation et les techniques d'analyse de sensibilité. In *CAQ 15* Nogent sur Vernisson, 2-4 Avril 2012.

Lafond, V., Courbaud, B. & Cordonnier, T. (2011a). Evaluation d'un modèle de dynamique forestière: cas des forêts hétérogènes de montagne avec Samsara2. In *CAQ 14* Avignon, 4-6 Avril 2011.

Lafond, V., Courbaud, B., Cordonnier, T. & De Coligny, F. (2011b). Evaluation d'un modèle de dynamique forestière: cas des forêts hétérogènes de montagne avec Samsara2. In *Ecoveg 7* - Lausanne, 1e Avril 2011.

Lagarrigues, G. (2013a). Likelihood-free inference for complex mechanistic models: calibrating the forest dynamics model Samsara2 with historical management data and prior knowledge. In *Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability in the context of Global Change* Toulouse, 28-31 October 2013.

Lagarrigues, G. (2013b). Recalibration des paramètres de samsara2 sur les données de Prénovel en utilisant la méthode ABC (Approximate Bayesian Computation). In *CAQ16 -Prénovel*, 8-9 Avril 2013.

Bibliographie succinte

- Barthod, C., 2012. Aux origines des indicateurs de gestion durable des forêts. *Revue Forestière Française*, 64(5), 551-560.
- Buongiorno J, Peyron J-L, Valdenaire J-M, Bruciamacchie M (1996) Croissance et aménagement de la futaie jardinée du Jura : stratégies de gestion et structure des peuplements. *Rev For Fr XLVIII*:49-61
- Buongiorno J, Peyron JL, Houllier F, Bruciamacchie M (1995) Growth and Management of Mixed-Species, Uneven-Aged Forests in the French Jura - Implications for Economic Returns and Tree Diversity. *Forest Sci* 41:397-429
- Chopard B., Deleuze C., François D., Collet R., Boudey A., Moureaux T., 2013. Comprendre l'évolution de la demande de bois résineux en France pour mieux l'intégrer dans la gestion forestière. *Rendez-vous Techniques* n°39-40: 7-13.
- Dufour-Kowalski S, Courbaud B, Dreyfus P, Meredieu C, de Coligny F (2012) Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. *Ann For Sci* 69:221-233
- Gamborg C, Larsen JB (2003) 'Back to nature' - a sustainable future for forestry? *For Ecol Manage* 179:559-571.
- Gosselin, F., 2013, Diversité du vivant et crise d'extinction: des ambiguïtés persistantes. In: J Delord et E. Casetta (Eds.), *La biodiversité. Enjeux éthiques, philosophiques et scientifiques*. Editions Matériologiques.
- Gosselin, F. et M. Gosselin, 2004, Analyser les variations de biodiversité : outils et méthodes. In: M. Gosselin et O. Larroussinie (Eds.), *Biodiversité et gestion forestière : connaître pour préserver - synthèse bibliographique*. Collection Etudes du Cemagref - Série gestion des territoires n°20.. Coédition GIP Ecofor - Cemagref Editions, Antony, pp. 58-99.
- Gosselin, F. et M. Gosselin, 2008. Pour une amélioration des indicateurs et suivis de biodiversité forestière. *Ingénieries-EAT*, 55-56, 113-120.
- Holeksa J, Zielonka T, Zywiec M (2008) Modeling the decay of coarse woody debris in a subalpine Norway spruce forest of the West Carpathians, Poland. *Can J For Res-Rev Can Rech For* 38:415-428
- Legay M, Mortier F, Mengin-Lecreux P, Cordonnier T (2007) La gestion forestière face aux changements climatiques : tirons les premiers enseignements. *Rendez-vous techniques de l'ONF*:95-102
- Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 2011. *State of Europe's forests 2011 - Status and trends in Sustainable Forest Management in Europe*.
- Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2011. *Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines - Edition 2010*, MAP, Paris.
- Pretzsch H, Grote R, Reineking B, Rotzer T, Seifert S (2008) Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Ann Bot* 101:1065-1087
- Schulte BJ, Buongiorno J (1998) Effects of uneven-aged silviculture on the stand structure, species composition, and economic returns of loblolly pine stands. *For Ecol Manage* 111:83-101
- Schütz JP (1997) *Sylviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lauzane.
- Seidl R, Rammer W, Lexer MJ (2011a) Adaptation options to reduce climate change vulnerability of sustainable forest management in the Austrian Alps. *Can J For Res* 41:694-706
- Seidl R, Schelhaas MJ, Lexer MJ (2011b) Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology* 17:2842-2852
- Similä M, Kouki J, Martikainen P (2003) Saproxylic beetles in managed and seminatural Scots pine forests: quality of dead wood matters. *For Ecol Manage* 174:365-381
- Vieilledent G (2009) Structurer l'incertitude et la variabilité dans les modèles de dynamique forestière. Application à la coexistence du Sapin et de l'Epicéa en forêt de montagne., *AgroParisTech*,
- Vieilledent G, Courbaud B, Kunstler G, Dhôte JF, Clark JS (2010) Individual variability in tree allometries determines light resource allocation in forest ecosystems - A hierarchical Bayes approach. *Oecologia* 163:759-773
- Zilliox, C., 2012. Indicateurs de biodiversité _ floristique en forêt : prise en compte de la variation de la relation entre indicateur et biodiversité en fonction des conditions stationnelles et de la région, dans les Alpes et le Jura français. Master Thesis, Agro ParisTech Montpellier, Montpellier.
- Zilliox, C. et F. Gosselin, 2013. Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space. *Forest Ecology and Management*.

- Buongiorno, J. and B. R. Michie (1980). "A matrix model of uneven-aged forest management." Forest Science **26**(4): 609-625.
- Buongiorno, J., J.-L. Peyron, et al. (1996). "Croissance et aménagement de la futaie jardinée du Jura : stratégies de gestion et structure des peuplements." Revue Forestière Française **XLVIII**(1): 49-61.
- Buongiorno, J., J. L. Peyron, et al. (1995). "Growth and Management of Mixed-Species, Uneven-Aged Forests in the French Jura - Implications for Economic Returns and Tree Diversity." Forest Science **41**(3): 397-429.
- Buongiorno, J., B. Schulte, et al. (2004). "Quantifying trade-offs between economic and ecological objectives in uneven-aged mixed-species forests in the Southern United States." General Technical Report - Forest Products Laboratory, USDA Forest Service(FPL-GTR-145): 5 pp.
- Coates, K. D. (2002). "Tree recruitment in gaps of various size, clearcuts and undisturbed mixed forest of interior British Columbia, Canada." Forest Ecology and Management **155**(1-3): 387-398.
- Dufour-Kowalski, S., B. Courbaud, et al. (2012). "Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling." Annals of Forest Science **69**(2): 221-233.
- Duncker, P. S., K. Raulund-Rasmussen, et al. (2012). "How Forest Management affects Ecosystem Services, including Timber Production and Economic Return: Synergies and Trade-Offs." Ecology and Society **17**(4).
- Gamborg, C. and J. B. Larsen (2003). "'Back to nature' - a sustainable future for forestry?" Forest Ecology and Management **179**(1-3): 559-571.
- Gosselin, M. and O. Laroussinie (2004). Biodiversité et gestion forestière. Connaître pour préserver, GIP-Ecofor, Cemagref éditions.
- Holeksa, J., T. Zielonka, et al. (2008). "Modeling the decay of coarse woody debris in a subalpine Norway spruce forest of the West Carpathians, Poland." Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere **38**(3): 415-428.
- Lafond, V. (2014). Sylviculture des forêts hétérogènes de montagne & compromis production-biodiversité: une approche par simulation, Université Joseph Fourier, Grenoble. **Thèse de Doctorat**: 180 p.
- Lafond, V., G. Lagarrigues, et al. (2013). "Uneven-aged management options to promote forest resilience for climate change adaptation: effects of group selection and harvesting intensity." Annals of Forest Science: 1-14.
- Legay, M., F. Mortier, et al. (2007). "La gestion forestière face aux changements climatiques : tirons les premiers enseignements." Rendez-vous techniques de l'ONF(Hors-série n° 3 « Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques »): 95-102.
- Pretzsch, H., R. Grote, et al. (2008). "Models for forest ecosystem management: A European perspective." Annals of Botany **101**(8): 1065-1087.
- Schulte, B. J. and J. Buongiorno (1998). "Effects of uneven-aged silviculture on the stand structure, species composition, and economic returns of loblolly pine stands." Forest Ecology and Management **111**(1): 83-101.
- Schütz, J. P. (1997). Sylviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Lauzane, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Seidl, R., W. Rammer, et al. (2011). "Adaptation options to reduce climate change vulnerability of sustainable forest management in the Austrian Alps." Canadian Journal of Forest Research **41**(4): 694-706.
- Seidl, R., M. J. Schelhaas, et al. (2011). "Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe." Global Change Biology **17**(9): 2842-2852.

Programme « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » (BGF)

Similä, M., J. Kouki, et al. (2003). "Saproxyllic beetles in managed and seminatural Scots pine forests: quality of dead wood matters." Forest Ecology and Management **174**(1-3): 365-381.

Zilliox, C. and F. Gosselin (2014). "Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space." Forest Ecology and Management **321**: 105-116.