Les modèles de croissance : un outil de la recherche transférable à la gestion ?



Damien Lauvin
Bi-diplômant FIF-ENSTIB
Apprenti ONF, RDI pôle de Dole

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLEVES

AgroParisTech	**TRAVAUX D'ÉLEVES**
TITRE : Les modèles de croissance : un outil de la recherche transférable à la gestion ?	Mots clés : modèle de croissance ; Sylviculture ; Douglas ; Carbone ; Exportations ; Minérales
AUTEUR(S) : Damien Lauvin	Promotion : FIF 25
Caractéristiques : 1 Volumes ; 61 Pages ; 32 Figures ; 0 Annexes ; 1 Cartes ; bibliographie	

CADRE DU TRAVAIL		
ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Office National des Forêts ; département RDI Nom du responsable : Christine Deleuze Fonction : Chef du pôle RDI de Dole		
Nom du correspondant AgroParisTech : Yves Ehrhart		
☒ Spécialité	☐ Stage 2A ☐ Stage fin d'études Date de remise :	☐ Autre

SUITE À DONNER (réservé au Service des Etudes)
☒ Consultable et diffusable ☐ Confidentiel de façon permanente ☐ Confidentiel jusqu'au ……/……/…… , puis diffusable

Remerciements :

Je tiens particulièrement à remercier Christine DELEUZE de m'avoir fait confiance et soutenu dans l'ensemble des missions qui m'ont été confiées. En réalisant ces dernières, j'ai enrichi mes compétences et cela a contribué à mon épanouissement professionnel.

Je remercie Emila AKROUME pour avoir encadré mon travail au sein du projet RESPIRE. Un esprit d'équipe irréprochable et une grande fluidité nous ont permis de réaliser les nombreuses tâches qui nous ont été affectées.

Je remercie également Didier François pour avoir partagé son expérience de sylviculteur. En plus d'apporter un regard critique à mes résultats, nos échanges ont été particulièrement instructifs sur le plan technique.

Je fais part de mon admiration à Philippe DREYFUS pour avoir implémenté un modèle douglas dans *Sydy* en un temps record. Sans lui, bon nombre de mes simulations n'auraient pas pu être réalisées.

Je remercie d'autre part Jean-Pierre RENAUD pour son investissement dans les scripts R. Son sérieux et sa bonne humeur ont grandement participé à la réussite du projet RESPIRE.

Enfin, j'adresse mes remerciements à Luc LIBAULT, Didier BIER, Stephen COSSET et François JOUSSEMET avec lesquels j'ai pris part aux activités régaliennes du pôle. Intérêt scientifique et convivialité ont rythmé nos journées de relevés sur le terrain.

Résumé :

Ce rapport retrace les missions réalisées dans le cadre de cette dernière séquence en entreprise, avant l'obtention du diplôme d'ingénieur AgroParisTech, spécialité production forestière. Ce dernier est construit autour d'une thématique, l'utilisation des modèles de croissances.

Les modèles de croissances sont généralement développés et utilisés par les acteurs de la recherche fondamentale. Le département recherche et développement de l'Office National des Forêts s'intéresse fortement aux potentialités de tels outils. En se plaçant en tant qu'utilisateur de modèles, nous avons mis en exergue les fonctionnalités indispensables qu'un gestionnaire forestier exige. De plus, nous avons comparé deux modèles de croissance douglas, *FCBA Pseudotsuga menziesii* et *Gymnos*. Ce retour d'expérience alimente les connaissances acquises sur les modèles de croissance et ajoute une essence dans le module *Sydy*.

Dans un second temps, les modèles de croissance ont été utilisés dans le cadre du projet RESPIRE. Ils fournissent des résultats plus rapidement que les mesures réalisées sur le réseau MOS. Ce dernier vise à évaluer les effets des exportations de minéralomasse sur la fertilité des sols en cas de récolte des menus bois. Il s'appuie sur 18 dispositifs répartis dans des peuplements de chênes, de hêtres et de douglas. Avec l'aide de modèles, nous avons simulé l'évolution de ces peuplements sur une révolution complète. Les nombreuses données extraites de ces simulations ont été la base de calcul pour quantifier les exportations de biomasse et de minéralomasse au cours d'un itinéraire complet. Les résultats ainsi obtenus ont permis d'établir plusieurs scénarios de récolte et ont donné lieu à de nombreuses discussions sur la politique à mener en forêt.

Enfin le modèle de croissance douglas fraîchement implémenté dans *Sydy* a favorisé l'élaboration d'une gamme d'itinéraires sylvicoles innovants pour cette essence. Les simulations de ces itinéraires ont généré de nombreuses données. Nous avons réutilisé ces dernières dans le cadre d'une analyse multicritère. Ainsi la performance économique, la production ligneuse, les exportations de minéralomasse et la séquestration de carbone ont été calculées pour chacun de ces itinéraires. Tous ces résultats donnent lieu à des discussions et permettent au propriétaire de choisir l'itinéraire le plus en adéquation avec ses besoins.

Summary:

This report traces the missions carried out in the framework of this last sequence in the company, before obtaining the Diploma of Engineer AgroParisTech in forestry production. This report is built around a thematic, the use of growth models.

Growth models are generally developed and used by fundamental researchers. The research and Development Department of the National Forest Office is very interested in the potential of such tools. By positioning itself as a model user, we have highlighted the essential features that a forest manager requires. In addition, we compared two Douglas growth models, *FCBA Pseudotsuga menziesii* And *Gymnos*. This return of experience feeds the knowledge gained on the growth models and adds a gasoline in the module *Sydy*.

In a second step, growth models were used as part of the RESPIRE project. They provide results faster than the measurements made on the MOS network. This network aims to quantify exports of mineralomass in the event of harvesting of the small wood. It is based on 18 devices distributed in stands of oak, Beech and Douglas-fir. With the help of models, we simulated the evolution of these stands. The data extracted from these simulations were the basis of calculation for biomass and mineralomass exports. The results obtained were used to establish several harvest scenarios and gave rise to discussions on the policy to be carried out in the forest.

Finally, the Douglas growth model, freshly implemented in *Sydy*, has fostered the development of a range of innovative silvicultural routes for this species. The simulations of these routes generated a lot of data. We have used the latter as part of a multi-criteria analysis. Thus, economic performance, woody production, mineralomass exports and carbon sequestration were calculated for each of these routes. All these results give rise to discussions and allow the owner to choose the route most appropriate to his needs.

Abréviations :

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

BASI0 : Bénéfice actualisé en séquence infinie

ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

EMERGE (projet ANR, APR Bioénergie2008, 2009-2013) : Elaboration de Modèles pour une Estimation Robuste et Générique du bois Energie

FCBA : Forêt Bois Cellulose Ameublement

GERBOISE (projet ADEME, 2016-2018) : Gestion raisonnée de la Récolte de BOIS Energie

ICIF : Itinéraires de Culture Innovants en Forêt

INSENSE (projet ADEME, APR REACCTIF 2013, 2013-2017) : Indicateur de SENSibilité des Ecosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IRSTEA : Institut National de la Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

MOS (réseau) : Matière Organique des Sols

ONF : Office National des Forêts

RDI : Recherche, Développement et Innovation

RENECOFOR (réseau) : Réseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers

RESPIRE (projet ADEME, APR REACCTIF 2013, 2013-2018) : REcolte des menus boiS en forêt : Potentiel, Impact et Remédiation par Epandage de cendres

TIR : Taux interne de rentabilité

Table des matières

Introduction : 1

I. Comment choisir un modèle de croissance au sein de la plateforme *Capsis* ? 2

1. Choix de la forme d'un modèle : Comparaison Fagacées et Sydy 2

a. Equité de la comparaison 3

b. Simulation de la sylviculture 3

c. Sorties et extracteurs 4

2. Choix d'un modèle sur le fond : Comparaison modèle Pseudotsuga mensiezii de FCBA et Gymnos de Gembloux 5

a. Méthodologie de la comparaison 6

b. Jeux de données 6

i. Grison 7

ii. Réseau RENECOFOR 7

c. Simulation de l'évolution des peuplements 8

i. Initialisation des peuplements 8

ii. Phases de croissance et éclaircies 9

iii. Extraction des variables dendrométriques 10

d. Résultats et analyses 10

i. Grison 10

ii. Réseau RENECOFOR 15

3. Productions et suites de l'étude 18

a. Implémentation d'un modèle douglas dans *Sydy* 18

b. Confection de notices et ajout de fonctionnalité 20

II. Une utilisation pragmatique : Reproduction et évolution de peuplements réels 21

1. Simulation d'itinéraires dans le cadre du projet RESPIRE 22

a. Présentation du réseau MOS 22

b. Méthodologie des simulations 23

i. Initialisation des peuplements 23

ii. Evolution des peuplements 24

iii. Extraction de données 24

c. Résultats des simulations 25

i. Hêtre 25

ii. Chêne 26

2. Bilan minéral des itinéraires sylvicoles 27

a. Méthodologie de calcul 27

i. Calcul du volume 27

ii. Calcul de biomasse 28

iii. Calcul de minéralomasse 28

b. Résultats et analyses 29

i. Biomasse 29

ii. Minéralomasse 30

c. Scénarios de prélèvement et compensation 32

i. Scénario de prélèvement 32

ii. Bilan minéralogique 33

iii. Compensation par apports de cendres 34

3. Analyse de sensibilité aux variations de fertilité 34

a. Variation de fertilité 34

b. Résultats et analyses 36

III. Une utilisation théorique : Réalisation d'une gamme d'itinéraires sylvicoles douglas 37

1. Création de nouveaux itinéraires sylvicoles 38

a. Identification des variables stratégiques 38

b. Créations des peuplements initiaux 39

c. Choix des itinéraires sylvicoles 40

2. Analyse multicritère des itinéraires 42

a. Rentabilité économique 43

b. Production 45

c. Biomasse et minéralomasse 47

i. Coûts de la biomasse 47

ii. Flux annuels 48

d. Séquestration de carbone 49

3. Bilan de l'analyse multicritère 50

Conclusion : 52

Bibliographie : 53

Introduction :

A l'amont de la filière forêt-bois, les gestionnaires, privés comme publics, sont garants de l'alimentation des industries en matière ligneuse. L'hétérogénéité des forêts françaises induit des produits forestiers très différents. Ces derniers se regroupent en trois grandes familles, le bois d'œuvre, le bois d'industrie et les bois d'énergie. Il revient aux gestionnaires d'en estimer la production. Afin de mener à bien cette mission, les forestiers disposent de tables de production (Bouchon J., 1988). Ces dernières sont construites à partir de mesures d'accroissement passé, le tout dans un contexte pédoclimatique et un stade de développement donné. Cependant, les incertitudes climatiques futures sont nombreuses : sécheresses, vents accidentels, etc. De plus, l'opinion publique est de plus en plus critique à l'égard de la gestion forestière. Il est légitime de se demander si les tables de production sont les outils les mieux adaptés pour appréhender le futur et s'il est pertinent de continuer à les utiliser. Si les modèles de croissance n'intègrent pas encore ces problématiques, ils facilitent la diversification des itinéraires et la mise en place des stratégies appliquées sur le terrain.

Le département de recherche, développement et innovation de l'Office National des Forêts, partage le même constat dans son document d'orientations stratégiques pour la période de 2016 à 2019. L'adaptation de l'aménagement forestier aux changements climatiques, technologiques et socio-économiques est l'un des quatre axes stratégiques mentionnés dans ce document. Le développement d'outils de simulation et de prévision de la production figure dans le programme de travail du département RDI.

Les modèles de croissance et les simulateurs d'évolution de peuplements forestiers sont généralement développés au sein des organismes de recherche tels que l'INRA, l'IRSTEA ou le FCBA. S'ils ne prennent pas toujours en compte le changement climatique, ils sont bien plus réactifs et adaptables que les tables de production. Néanmoins, les gestionnaires forestiers ne sont pas sensibilisés et formés à l'utilisation de ce genre d'outils. Le département RDI est à l'interface entre le monde des chercheurs et celui des forestiers de terrain. Dans le cadre de projets de recherche appliquée, j'ai été amené à manipuler modèles et simulateurs de croissance. Ce mémoire vise à identifier les potentialités et les lacunes de ces outils en vue d'un transfert vers la gestion. Tout d'abord, on portera un regard critique sur les éléments indispensables d'un modèle de croissance. Ensuite, on présentera l'utilisation des modèles dans le cadre d'un projet de recherche appliqué menés par la RDI. Enfin, on s'appuiera sur les modèles de croissance afin de réaliser une analyse multicritère d'itinéraires douglas innovants.

I. Comment choisir un modèle de croissance au sein de la plateforme *Capsis* ?

Capsis est une plateforme de développement de modèles de croissance pour les peuplements forestiers. Elle a été créée par l'INRA et est aujourd'hui gérée par François de Coligny. Lorsqu'un groupe de chercheurs met au point un modèle pour une essence donnée, il est accompagné pour le portage de son modèle sur la plateforme. Aujourd'hui, *Capsis* héberge 84 modèles différents. Une grande partie est encore en cours de développement ou d'amélioration mais ils peuvent tout de même être utilisés. Un séminaire conviant modélisateurs et utilisateurs est organisé annuellement et réunit une quarantaine de personnes. L'affluence est en légère hausse depuis quelques années, ce qui démontre le dynamisme autour de la plateforme.

L'ONF dispose d'une compilation *Capsis* qui regroupe uniquement 27 modèles de croissance, pour des raisons de propriété intellectuelle. Parmi cette liste à notre disposition, nous avons plus particulièrement travaillé avec les modules suivants :

- *Fagacées* (Chêne et Hêtre)
- *Sydy* (Chêne et Hêtre)
- *Gymnos* (Douglas)
- *FCBA Pseudotsuga menziesii* (Douglas)

Nous avons utilisé ces modèles pour différentes applications qui seront détaillées dans la suite de ce rapport. Lors des manipulations, nous avions régulièrement des finalités et des contraintes différentes qui étaient en lien avec les réalités forestières. Bien souvent, l'outil de modélisation n'était pas parfaitement adapté à notre travail. En effet, les modèles sont mis au point par des chercheurs qui sont quelques fois déconnectés du terrain. De plus, les modèles sont initialement développés afin de répondre à des questions de recherche et pas directement pour des applications ONF. Afin de nous accommoder des particularités de chaque modèle, nous avons dû caractériser finement nos besoins. Sur la base de comparaisons bienveillantes, on relate ici les éléments qui nous semblent indispensables pour évaluer un modèle de croissance, aussi bien sur le fond que sur la forme.

1. Choix de la forme d'un modèle : Comparaison *Fagacées* et *Sydy*

Dans le cadre d'un projet de recherche qui sera présenté par la suite, nous voulions simuler l'évolution de peuplements de chêne et de hêtre à partir d'inventaires réels. La compilation Capsis de l'ONF offrait deux possibilités de modèles : *Fagacées* et *Sydy*. Etant peu familiarisé avec l'outil de simulation, nous les avons testés successivement. Nous avons constaté que les fonctionnalités offertes par un modèle sont primordiales pour l'utilisateur.

a. Equité de la comparaison

Fagacées est un modèle de croissance plutôt ancien qui simule l'évolution de chênaies et de hêtraies, (Dhôte et al. 2004). La fiabilité de *Fagacées* est reconnue car il a notamment été utilisé pour élaborer les référentiels de sylviculture suivants :

- Hêtraies continentales, Sardin et al., 2011.
- Hêtraie Nord-Atlantique, Pilard-Landeau et al., 2008.
- Chênaies continentales, Sardin, 2008.
- Chênaie atlantique, Jarret, 2004.

Sydy a été développé par Philippe Dreyfus, ancien chercheur de l'INRA et aujourd'hui employé par l'ONF. C'est un module plus qu'un modèle. En effet, il fonctionne avec le même noyau d'équations que *Fagacées* et se différencie uniquement par l'ajout de plusieurs fonctionnalités. La simulation de l'évolution pour un peuplement forestier sera identique sur *Sydy* et sur *Fagacées*.

Les deux modèles de croissance reposant exactement sur la même base, on les compare uniquement sur la forme pour la suite de l'étude.

b. Simulation de la sylviculture

L'intérêt d'utiliser un modèle de croissance réside dans la possibilité de simuler une sylviculture sur mesure. Si les deux modèles font pousser les peuplements de la même façon, ils diffèrent dès que l'on souhaite intervenir dans le peuplement.

Fagacées fonctionne avec une sylviculture que l'on peut qualifier de « pas à pas ». On fait pousser le peuplement quelques années, ensuite on réalise une éclaircie et on recommence la manipulation. Lorsque l'on souhaite marquer une éclaircie, celle-ci s'effectue avec l'aide d'un diagramme de prélèvement. En plus d'être une méthode chronophage, on obtient la densité et la surface terrière souhaitée par tâtonnement. Cela induit qu'il est très difficile de reproduire à l'identique la révolution d'un peuplement. Il existe d'autres méthodes de prélèvements, plus simplistes. Toutefois ces dernières ne nous permettaient pas de contrôler la sylviculture sur la densité et la surface terrière.

Sydy a été développé avec un module de sylviculture automatique. Pour un événement donné, lorsque le peuplement atteint un certain âge ou une hauteur dominante par exemple, on peut choisir d'intervenir et ajuster automatiquement des variables dendrométriques telles que la densité ou la surface terrière. On retrace ainsi en quelques secondes la totalité de l'itinéraire sylvicole à appliquer sur le peuplement.

Cette sylviculture automatique est un avantage incontestable de *Sydy* par rapport à *Fagacées*. Elle est très facile à prendre en main et permet d'ajuster l'itinéraire. Le forestier peut se consacrer entièrement sur son cœur de métier, la sylviculture. De plus, nous avons retranscrit les guides dans les fichiers de sylviculture automatique. Ainsi, pour un référentiel géographique et une fertilité donnée, on peut appliquer l'itinéraire adéquat à un peuplement. Le sylviculteur confirmé doit s'adapter à son cas d'étude et appliquer une sylviculture de rattrapage si nécessaire.

c. Sorties et extracteurs

Capsis offre de nombreuses sorties graphiques compatibles avec la plupart des modèles. On visualise facilement l'évolution de variables dendrométriques au cours de la simulation. Ce retour graphique qui est quasi instantané permet d'identifier les erreurs et de les corriger au plus vite.

Dans le cadre de projets de recherche, nous avons eu besoin d'extraire des données dendrométriques afin de les traiter plus finement sur le logiciel R et de les mettre en forme. Capsis dispose d'extracteurs pour faire cela mais ils présentent plusieurs limites :

- Les extracteurs ne sont pas compatibles avec tous les modèles. Par exemple, l'export par liste d'arbres développé par P. Dreyfus sur *Sydy* n'est pas utilisable sur *Fagacées*
- Les données visualisables sur les sorties graphiques ne sont pas forcément exportables. Par exemple, des modèles de biomasse et de minéralomasse ont été implémentés sur *Fagacées*, on peut visualiser les résultats mais pas les extraire sans passer par un copier-coller. En plus, d'être une manipulation fastidieuse, le risque de générer des erreurs est très élevé.
- Les fichiers exports ne se présentent pas toujours sous une forme optimale selon le travail que l'on souhaite réaliser. Des efforts de prétraitement et de mise en forme doivent être réalisés par l'utilisateur du modèle.

Ces quelques points négatifs peuvent être un frein à la démocratisation de l'utilisation de modèle pour les gestionnaires. Un utilisateur de modèle cherche à produire des données précises lorsqu'il s'oriente vers un outil de type modèle de croissance. Ce dernier doit répondre exactement aux besoins de l'utilisateur.

Créer un extracteur de données est une manipulation aisée pour un développeur Capsis. Le département RDI de l'ONF a la chance de compter dans ses rangs Philippe Dreyfus. Ce dernier est expérimenté sur Capsis et peut faire évoluer son module *Sydy* très rapidement. Dans le cadre d'un projet, nous désirions extraire des données par arbre identifiés tout au long de la simulation. Or, *Sydy* n'offrait pas encore cette possibilité. Nous avons fait part à Philippe Dreyfus de cette nécessité. En quelques jours seulement, il nous a produit un extracteur de données qui répondait parfaitement à nos besoins.

La forme est un élément déterminant lorsque l'on choisit un modèle de croissance. La sylviculture automatique et la possibilité d'adapter le modèle à nos besoins ont orientés notre choix. *Fagacées* et *Sydy* sont deux modèles équivalents, il n'en est pas toujours de même. Le cas échéant, il convient de comparer les modèles sur le fond avant de les comparer sur la forme.

2. Choix d'un modèle sur le fond : Comparaison modèle *Pseudotsuga mensiezii* de FCBA et *Gymnos* de Gembloux

Les activités du pôle RDI de Dole nous ont amené à simuler l'évolution de peuplements de douglas. Précédemment, nous avions à notre disposition des modèles chêne et hêtre, couramment employés et qui faisaient l'unanimité. En revanche, ce n'est pas le cas pour les modèles douglas, moins utilisés, même s'il en existe un certain nombre :

- *FCBA Pseudotsuga menziesii* (anciennement Oasis)
- *GO+* (développé en Python et non sur *Capsis*)
- *Gymnos*
- *SimCoP*
- *Organon*

Ces modèles sont très différents dans leur conception et leur fonctionnement. *GO+* est un modèle éco-physiologique*, (Loustau et al., 2012)*. Il fait croître un peuplement forestier en intégrant un maximum de facteurs environnementaux. Ce modèle est très récent et sa calibration n'est pas encore terminée pour le douglas. De plus, il n'est pas encore implémenté sur Capsis, c'est pourquoi nous avons choisi de ne pas le prendre pour notre étude comparative. Le modèle *SimCoP* simule le développement d'un peuplement forestier dès le stade de la graine, (Ottorini 1995). Les peuplements sont entièrement virtuels et il n'est pas encore possible d'importer un inventaire réel. Etant donné que nous voulions reproduire l'évolution de peuplements existants, le modèle *SimCoP* ne répondait pas à nos besoins et nous avons décidé de ne pas l'intégrer à l'étude comparative. *Organon* est un modèle de croissance du douglas qui ne permet pas de faire des éclaircies et qui a été calibré sur des placettes expérimentales se trouvant en Amérique du nord, (Nathaniel et al., 2014). Les conditions climatiques et la sylviculture étant vraiment éloignées de nos contextes locaux, nous n'avons pas pu retenir *Organon* dans notre étude comparative de modèles. Après avoir filtré les modèles qui pourraient répondre à nos besoins, il ne reste plus que *FCBA Pseudotsuga menziesii,* (Bailly et al., 1997), et *Gymnos*, (Périn et al., 2016). Le premier est développé, comme son nom l'indique par l'institut FCBA, le second par les chercheurs de l'université de Gembloux en Belgique.

Pour mémoire, les modèles de croissance tels que *Gymnos* et *FCBA Pseudotsuga menziesii* sont calibrés à l'aide de mesures relevées sur le terrain. La collecte de données est coûteuse, chronophage et nécessite d'être suivie dans le temps. C'est pourquoi les modèles sont calibrés avec un nombre limité de données. A la vue de la variabilité des sites, des itinéraires et des âges, les modèles fonctionnent rapidement en extrapolation. Le cas échéant, il est tout à fait légitime de s'interroger sur les estimations fournies par ces derniers.

a. Méthodologie de la comparaison

Derrière cette comparaison, on cherche à tester en parallèle la fiabilité de *Gymnos* et *FCBA Pseudotsuga menziesii*. C'est-à-dire leur aptitude à simuler les accroissements que l'on observe sur le terrain. Afin de mener à bien cette étude, on applique le processus détaillé dans la Figure 1.

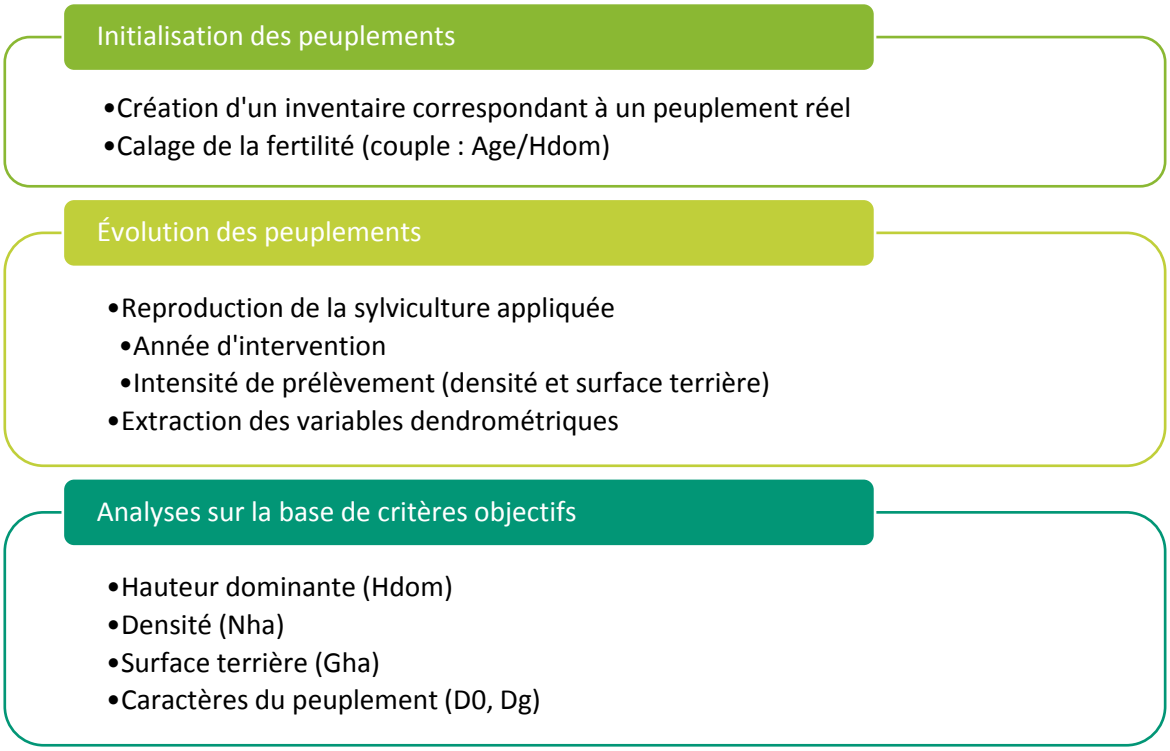


Figure 1 : Processus de test de fiabilité pour modèle de croissance

Le fil conducteur du processus de test est plutôt simple à assimiler. La difficulté réside au niveau des contraintes techniques induites dans chaque étape. Elles seront détaillées au fur et à mesure de ce mémoire.

b. Jeux de données

La première étape du processus de test est l'initialisation des peuplements. On cherche à créer une liste d'arbres dont on connait précisément le diamètre ou la circonférence. Cette liste correspond à un inventaire en plein sur une surface donnée. Il convient également d'avoir l'âge exact du peuplement régulier dont on souhaite reproduire l'évolution. L'âge couplé avec la hauteur dominante permet de retrouver la fertilité de la station. Toutes ces informations doivent être importées dans Capsis à l'aide d'un fichier inventaire.

Afin de réaliser ce travail, il convient d'avoir à sa disposition un jeu de données fournissant tous ces éléments. De plus, ce jeu est totalement indépendant de celui qui a servi à la calibration du modèle. Par ce moyen, on cherche à observer le comportement du modèle, lorsque l'on explore des situations contrastées. De plus, il est indispensable d'avoir un suivi tige par tige sur une surface donnée et de connaitre précisément la répartition des prélèvements au fil du temps. Sans ces informations, il sera impossible de reproduire la sylviculture qui a été appliquée sur le terrain. Enfin le dispositif

expérimental doit être suivi pendant une vingtaine d'années pour qu'il soit pertinent de confronter les données collectées avec un modèle de croissance.

Tous ces éléments apportent de nombreuses contraintes et ce n'est pas aisé de trouver des informations qui répondent à l'ensemble de ces critères. Or, des jeux de données de ce type sont plutôt rares. On a toutefois pu s'appuyer sur deux jeux de données différents :

- Dispositif expérimental de sylviculture du Douglas en forêt domaniale du Grison
- Placettes Douglas du Réseau Renecofor

i. Grison

Ce premier jeu de données repose sur un dispositif expérimental historique suivi par le pôle RDI de Dole. Cet essai a été installé en fin d'année 1991 et avait initialement pour objet la comparaison de quatre sylvicultures : locale, moyenne, forte et une absence de sylviculture (témoin). En 1996, certaines placettes du dispositif ont été intégrées dans un réseau national : « Coopérative de données douglas ». Leur itinéraire sylvicole a été modifié afin d'être conforme aux exigences du réseau. Par conséquent, ce dispositif regroupe 8 placettes expérimentales qui couvrent un gradient de sylviculture très étendu, allant de l'absence de sylviculture à des sylvicultures très dynamiques.

La forêt Domaniale du Grison se situe dans le Mâconnais. Les conditions stationnelles sont homogènes sur l'ensemble de la parcelle et plutôt favorables au développement du douglas. Des campagnes de mesures périodiques ont été réalisées depuis 1991, la dernière remontant à 2015. Cela représente un suivi sur plus de 24 ans et répond totalement à nos attentes. De plus, lorsqu'une placette passe en exploitation, un inventaire avant et un autre après exploitation sont systématiquement effectués. Même à la tempête de 1999, les chablis ont été quantifiés afin de ne pas perdre l'information. Cet aspect est particulièrement important lorsque l'on cherche à reproduire la sylviculture dans la partie évolution des peuplements. On connait exactement le nombre d'arbres à prélever et leur ventilation dans les classes de diamètre. Enfin, lors de chaque campagne de mesure, la hauteur des arbres échantillons est mesurée. Nous avons ainsi à notre disposition, tous les éléments permettant de calculer la hauteur dominante.

Cette richesse d'information est condensée sur un seul et même site présentant plusieurs placettes expérimentales dans des conditions homogènes. Mes simulations sur l'évolution de chaque peuplement donnent des indications sur la capacité des modèles à reproduire une large gamme de sylviculture. Toutefois il peut être pertinent de voir comment se comportent les modèles dans des contextes pédoclimatiques différents.

ii. Réseau RENECOFOR

Depuis 1991, l'Office National des Forêts a mis progressivement en place le Réseau National de Suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). Sur ces 102 placettes réparties sur toute la France métropolitaine, on collecte des données floristiques, pédologiques, dendrométriques etc. Toutefois, on se focalisera uniquement sur les données dendrométriques des 6 placettes présentant des peuplements de douglas. Sébastien Macé, responsable de la base de données du réseau RENECOFOR, m'a fourni les jeux de données répondant à mes besoins.

Chaque placette RENECOFOR présente une zone centrale dont la surface est d'environ 1ha. Depuis la mise en place des placettes, une campagne d'inventaire est réalisée tous les cinq ans. Jusqu'en 2000, il y avait uniquement des inventaires en plein mais, depuis cette date, un suivi tige par tige est effectué. Comme pour les placettes en forêt domaniale du Grison, un inventaire avant et un autre après coupe sont réalisés. De même, la hauteur des arbres échantillons est mesurée, ce qui nous permet de recalculer la hauteur dominante du peuplement. En théorie, une sylviculture conforme aux référentiels locaux est appliquée sur la placette. Cependant, on verra par la suite que cela n'est pas toujours le cas.

En principe, le suivi du réseau RENECOFOR est aussi exhaustif que celui apporté aux placettes en forêt domaniale du Grison. On dispose de toutes les informations nécessaires à notre étude et ce, sur une période de plus de vingt ans. De plus, ce jeu de données complète le précédent, car il porte sur des peuplements d'âges différents et des contextes pédoclimatiques variés (cf. figure 2).

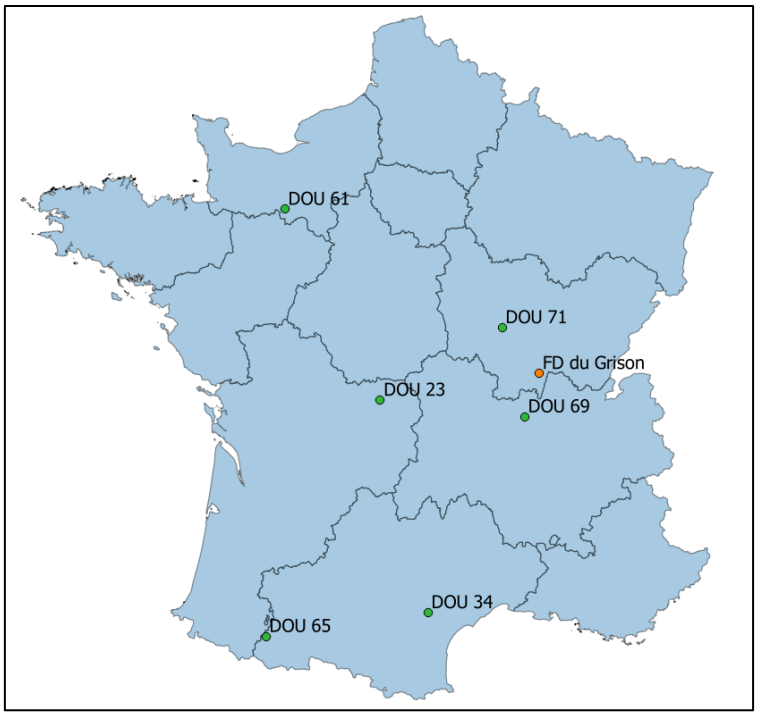


Figure 2 : Répartition géographique des placettes de test

c. Simulation de l'évolution des peuplements

Dès que toutes les données nécessaires à notre étude sont rassemblées, il est possible de démarrer le travail de simulation sur Capsis.

i. Initialisation des peuplements

Il convient de fournir au simulateur un point de départ. Dans notre cas, il s'agit du premier inventaire à notre disposition. Chaque modèle présente des particularités dans la structuration des fichiers inventaires (cf. notice de fonctionnement). Lorsque l'on souhaite initialiser un peuplement dans *Gymnos*, l'inventaire se présente sous la forme d'une liste d'arbres. Cette dernière est accompagnée du couple d'information âge/hauteur dominante. Ces deux variables permettent à Capsis de caler le peuplement sur une courbe de fertilité. Sur *FCBA Pseudotsuga menziesii*, on ne renseigne pas une liste d'arbres, mais un inventaire en plein par classe de diamètre. Les mêmes

informations auxiliaires sont renseignées afin de déterminer la fertilité du peuplement. Sur ce dernier modèle, il est possible de choisir soi-même l'équation de fertilité au sein d'une gamme exhaustive. Toutefois, nous avons fait le choix de ne pas forcer la courbe de fertilité car un utilisateur occasionnel se contenterait de celle sélectionnée par défaut.

Une subtilité entre les deux modèles est à prendre en compte pour le couple âge/hauteur dominante. Le modèle *Gymnos* considère l'âge de plantation, (Perin et al., 2009), tandis que *FCBA Pseudotsuga menziesii* considère l'âge de germination de la graine, c'est-à-dire l'âge du plant lors de la plantation. Lorsque nous ne disposons pas de cette information, nous faisons l'hypothèse que les plants sont des 1+1 car ce sont les plus communément vendus.

ii. Phases de croissance et éclaircies

Les placettes expérimentales ont été sélectionnées car on connaissait précisément les années d'intervention et les intensités de prélèvement. En effet, chaque fois qu'une placette, RENECOFOR ou en forêt domaniale du Grison, doit passer en intervention, deux inventaires sont réalisés. Le premier a lieu avant l'exploitation et le second après. On connait ainsi la distribution exacte des tiges prélevées lors de l'éclaircie. L'image obtenue après la coupe est parfaitement fidèle à la réalité.

Sur Capsis, on reproduit l'évolution de chaque peuplement. Pour cela, on respecte les années d'intervention et on applique les mêmes prélèvements. Toutefois, les peuplements divergent légèrement au fil des années et l'on doit s'adapter aux particularités du modèle de croissance employé. Sur *Gymnos*, toutes les interventions ont été réalisées à l'aide du diagramme de prélèvement (cf. notice). Ainsi, on peut choisir les classes de diamètre des arbres que l'on souhaite couper. Par ce moyen fastidieux mais précis, on peut revenir à une distribution semblable à celle observée sur le terrain tout en gardant une fiche de martelage proche de celui pratiqué.

Sur *FCBA Pseudotsuga menziesii*, le diagramme de prélèvement est fonctionnel uniquement si l'intervention a lieu l'année de l'initialisation. Pour toutes les autres éclaircies, nous sommes contraints d'utiliser la sylviculture automatique du modèle (cf. notice). Comme précédemment, on choisit les années d'intervention, par contre, on ne choisit pas explicitement la distribution des arbres que l'on souhaite couper. Chaque éclaircie est caractérisée par deux variables, le nombre de tiges coupées et le coefficient d'éclaircie K. Il est très simple de reporter le nombre de tiges coupées lors de l'intervention.

$$K = \frac{v_{éclaircie}}{v_{avant\ éclaircie}}$$

$v_{éclaircie}$: Volume de l'arbre moyen coupé lors de l'éclaircie

$v_{avant\ éclaircie}$: Volume de l'arbre moyen avant intervention

Le coefficient d'éclaircie est le rapport entre le volume l'arbre moyen coupé et le volume de l'arbre moyen avant éclaircie. En le faisant varier, on choisit si l'on prélève des arbres « par le haut », sylviculture dynamique, ou « par le bas », sylviculture timorée. Comme le nombre de tiges que l'on coupe est fixé, faire varier le coefficient d'éclaircie a un impact immédiat sur l'intensité de l'intervention et donc, sur la surface terrière après coupe. Nous avons choisi de faire varier le

coefficient d'éclaircie jusqu'à retomber sur la surface terrière observée après coupe. La reproduction des interventions n'est pas aussi fidèle que sur *Gymnos*, mais après chaque intervention on repart sur un peuplement ayant même densité et surface terrière que la réalité.

iii. Extraction des variables dendrométriques

Dès que l'évolution du peuplement a été reproduite sur toute la période que l'on souhaitait, il convient d'exporter les variables dendrométriques que l'on avait désignées comme critères objectifs de comparaison :

- Hauteur dominante (Hdom)
- Densité (Nha)
- Surface terrière (Gha)
- Distribution des diamètres (Ddom, Dg)

Une fois encore, nous devons nous adapter aux particularités de fonctionnement de chaque modèle. Sur *Gymnos*, l'exportation de la table des peuplements permet d'obtenir ces grandeurs année par année. En revanche, cette fonctionnalité n'est pas disponible sur *FCBA Pseudotsuga menziesii*. Pour ce dernier, un export manuel par copier-coller est impératif. De plus, le modèle restitue les données dendrométriques uniquement pour les années d'intervention.

d. Résultats et analyses

En regardant tous les critères objectifs de comparaison, nous allons confronter les modèles *Gymnos* et *FCBA Pseudotsuga menziesii* aux grandeurs observées sur les dispositifs expérimentaux. La présentation des résultats et les analyses se feront parallèlement sur les deux jeux de données.

Comme mentionné précédemment, une ambiguïté sur l'âge peut prêter à confusion. Nous avons décidé de nous baser sur l'âge de plantation car c'est sur cette variable que s'opère habituellement le suivi expérimental. Cela induit de soustraire l'âge du plant à l'âge de la graine pour les résultats fournis par *FCBA Pseudotsuga menziesii*.

i. Grison

Le dispositif expérimental en forêt domaniale du Grison est composé de 8 placettes qui testent un gradient d'itinéraires sylvicoles, allant des modalités les plus dynamiques au témoin. Ce gradient est conservé dans la mise en forme des résultats. La modalité la plus dynamique se trouve en haut à gauche et on passe progressivement aux modalités plus conservatrices.

Dans un premier temps, on s'intéresse à l'évolution de la hauteur dominante (cf. figure 3). Ce critère représente l'aptitude d'un modèle à caler le peuplement sur sa courbe de fertilité.

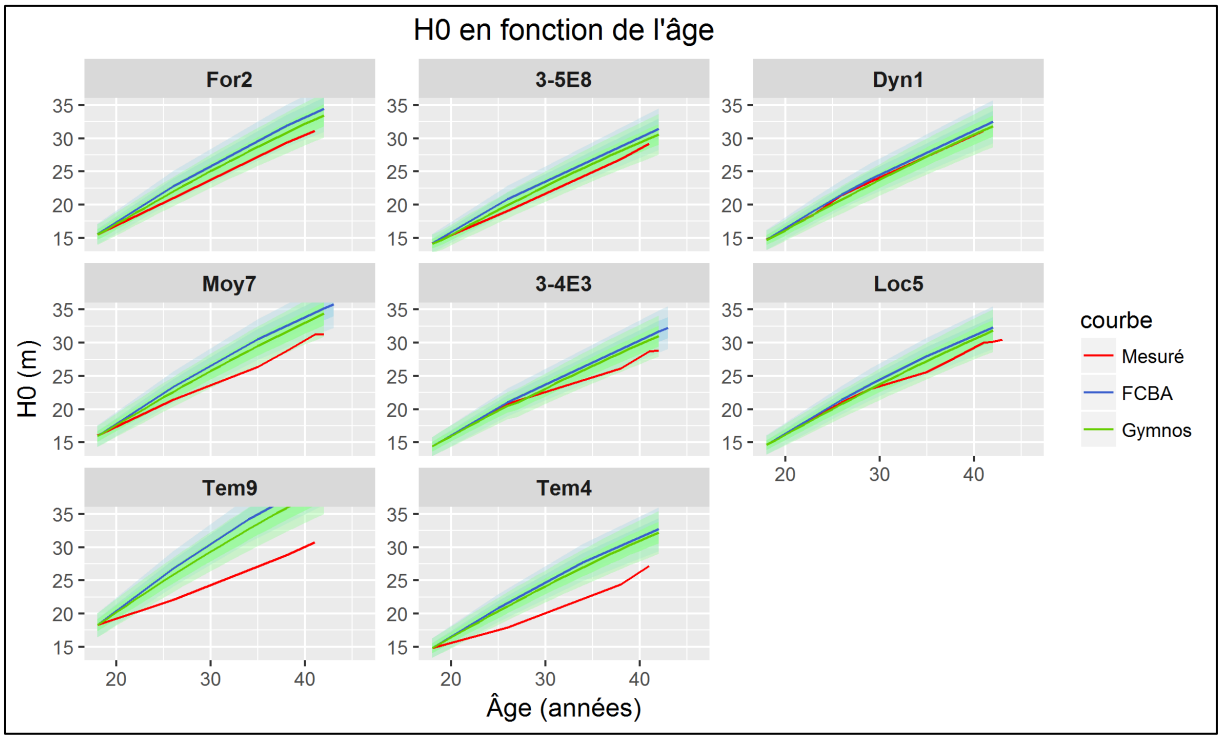


Figure 3 : Evolution de la hauteur dominante par placette

Bien que *Gymnos* et *FCBA Pseudotsuga menziesii* appliquent des équations de fertilité différentes, les estimations fournies par ces deux modèles sont pratiquement confondues. Elles sont également proches des valeurs mesurées sur le terrain. En effet, lorsqu'une sylviculture est appliquée aux placettes, la courbe rouge, relative aux mesures, est systématiquement comprise dans un faisceau de ± 10% les valeurs estimées (faisceau vert). Dans les témoins, on observe une surestimation de la hauteur dominante par les deux modèles. D'une part, les modèles sont généralement calibrés avec l'aide de placettes expérimentales sur lesquelles on applique une sylviculture conventionnelle. C'est pourquoi, on s'attend à avoir des incohérences lorsque la densité est maximale. D'autre part, même si la hauteur dominante d'un peuplement est censée dépendre uniquement de la station et non de la densité, il est probable que les courbes de fertilité ne soient pas adaptées à des densités extrêmes.

Les résultats relatifs à la hauteur dominante sont corrects lorsque la placette est en sylviculture et l'on observe moins de 10% d'écart entre les modèles et les mesures effectuées sur le terrain. On s'intéresse désormais à la densité et la surface terrière.

Les résultats sur la densité, (cf. figure 4), donnent des indications sur la capacité des modèles à reproduire la mortalité dans les peuplements témoins. En effet, sur la placette témoin 9, *Gymnos* reproduit parfaitement la mortalité observée sur le terrain. Cette mortalité est légèrement surestimée sur la placette témoin 4, le douglas étant une essence particulièrement résistante lorsque le capital sur pied est très élevé. Lors des campagnes de mesures, il n'est pas toujours évident de déterminer si un individu est mort ou juste très affaibli. Il serait intéressant de suivre l'évolution de la mortalité lors des prochaines mesures car cette dernière n'est pas toujours constante au fil du temps pour un peuplement donné. En outre, on observe un premier point de différence entre les deux modèles. En effet, le module de mortalité de *FCBA Pseudotsuga menziesii* n'a pas fait mourir la moindre tige lors des simulations.

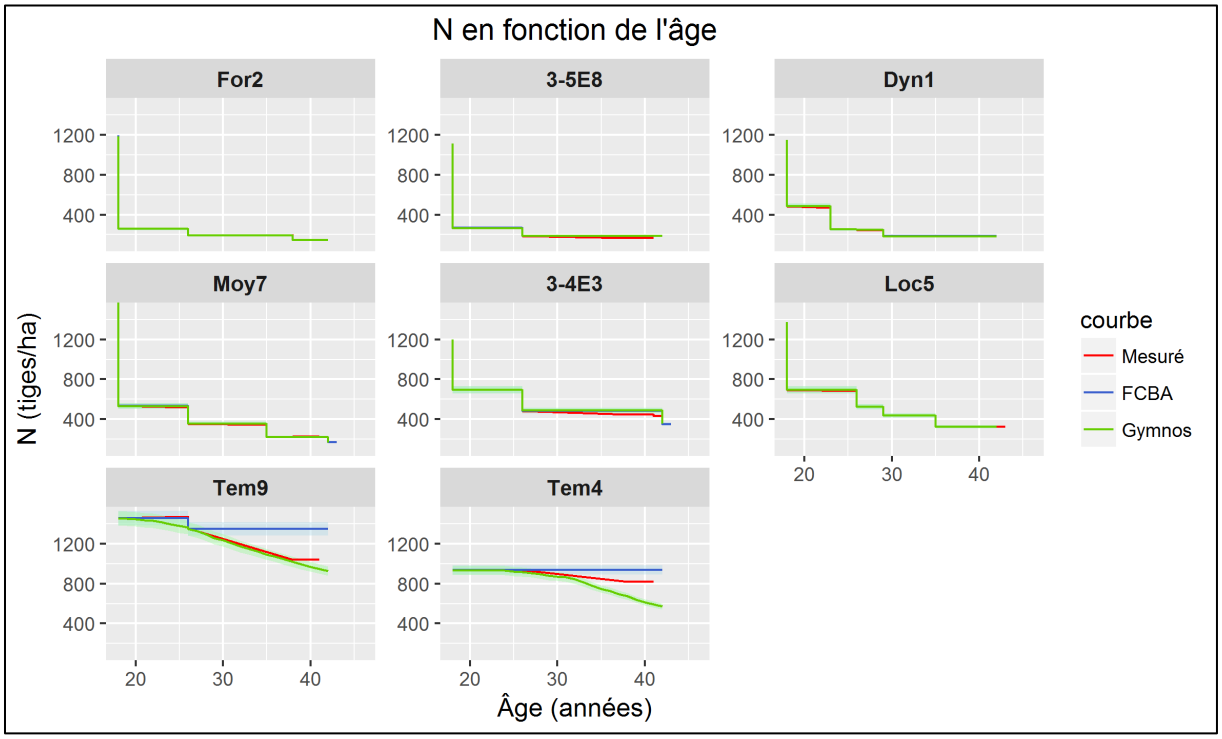


Figure 4 : Evolution de la densité par placette

Pour mémoire, nous avons décidé d'appliquer les prélèvements réels lors des simulations. C'est pourquoi les courbes de densité sont confondues pour les observations et les estimations des modèles. Ces résultats prouvent que nous avons respecté l'une de nos contraintes, fixer la densité. Désormais, on peut se focaliser sur la surface terrière afin d'évaluer la capacité des modèles à appliquer une production similaire à la réalité. Hormis sur les témoins car nous avons fait le choix de ne pas retirer les tiges excédentaires dues à une mortalité faiblement estimée.

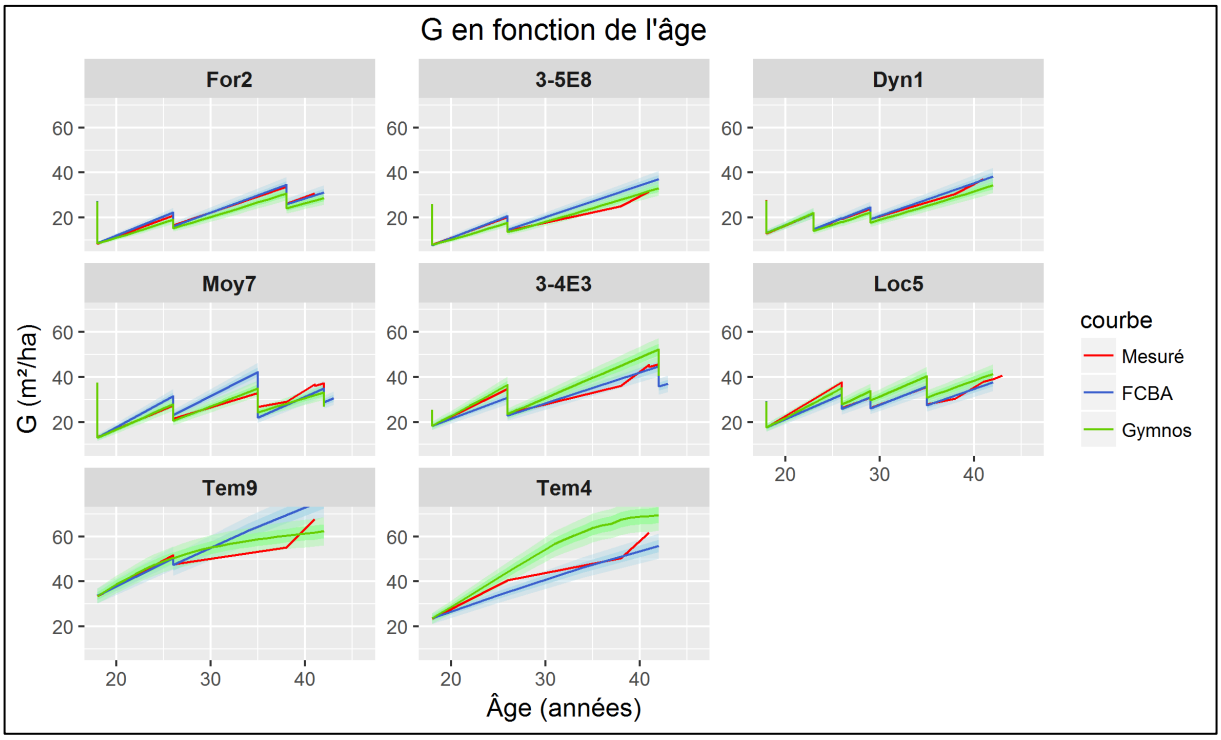


Figure 5 : Evolution de la surface terrière par placette

Sur les placettes en sylviculture, la surface terrière est globalement bien approchée par les estimations des modèles de croissance. En effet, les valeurs mesurées sont majoritairement dans le faisceau de ± 10% la valeur estimée. Ces résultats sont jugés très corrects, lorsqu'il s'agit d'estimation du capital avec des outils de télédétection. Par ailleurs, on n'observe pas de différence significative, ni de tendance au niveau de la performance des modèles et ce, quelle que soit la densité de peuplement. Il n'y a pas de biais dans les résultats fournis par les modèles. Ces derniers surestiment autant qu'ils sous-estiment, comme le démontre l'égale répartition des points par rapport à la première bissectrice sur la figure 6.

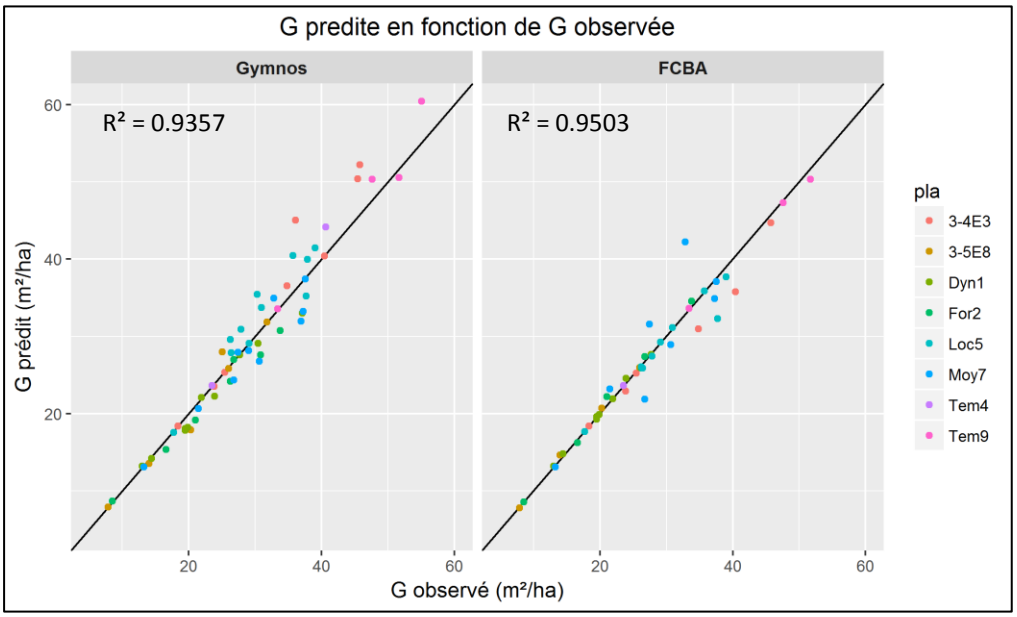


Figure 6: Dispersion des mesures de surface terrière

Le dernier critère que l'on regarde est un critère relatif à la caractérisation du peuplement, le diamètre dominant. Encore une fois, les valeurs estimées par les modèles sont proches des mesures observées sur le terrain et il n'est pas possible de mettre en exergue des différences significatives, (cf. figure 7).

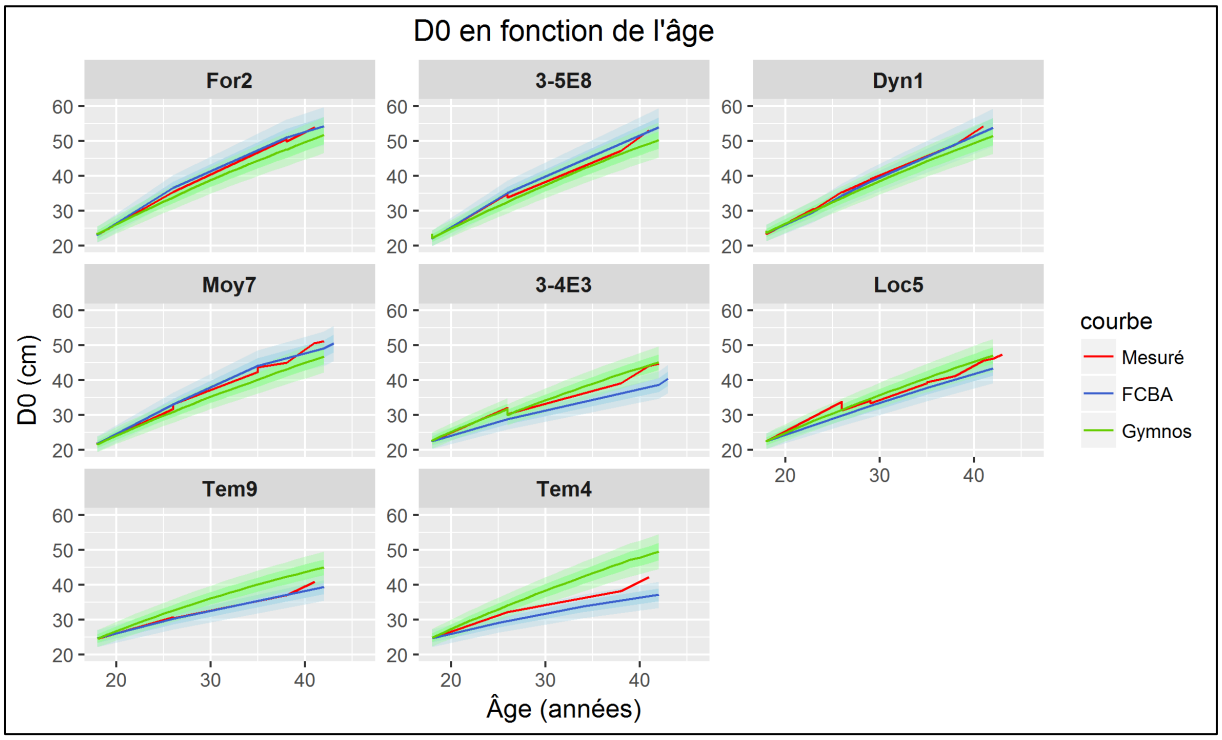


Figure 7 : Evolution diamètre dominant par placette

Comme pour la surface terrière, il n'y a pas de biais dans les estimations du diamètre dominant par les modèles. En effet, sur la figure 8, les points sont bien répartis par rapport à la droite d'équation y=x et le coefficient de corrélation est plutôt élevé.

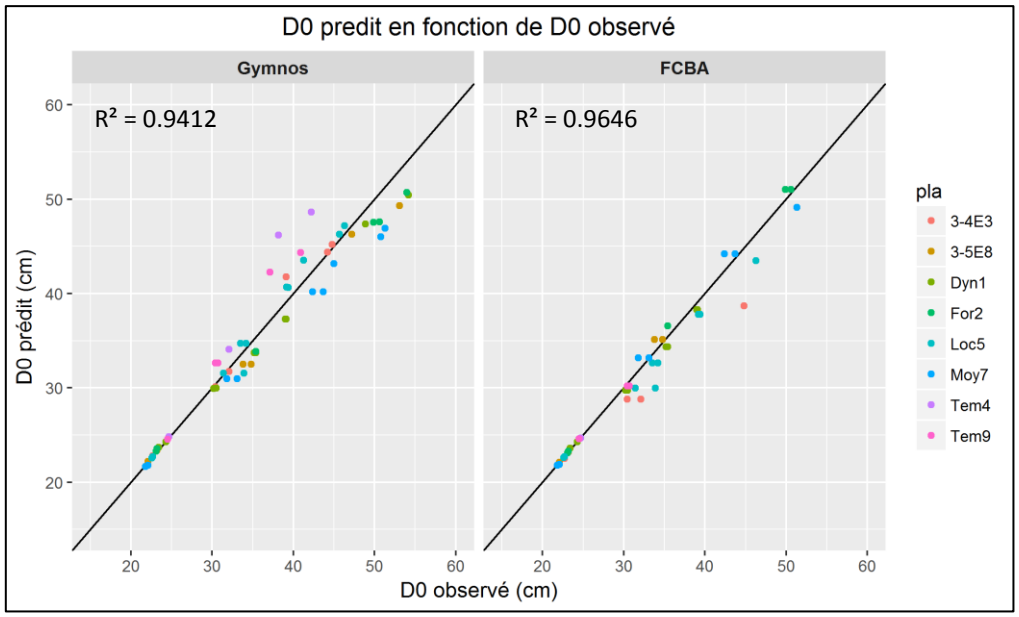


Figure 8 : Dispersion des mesures de diamètre dominant

Les premiers résultats sur les placettes expérimentales en forêt domaniale du Grison sont plutôt encourageants. Les variables dendrométriques mesurées au sein du peuplement sont généralement comprises dans un intervalle de ± 10% des variables estimées. Les deux modèles de croissance offrent des résultats très similaires sur tout le gradient de sylviculture, hormis au niveau de la mortalité dans le témoin.

ii. Réseau RENECOFOR

Les résultats des simulations des placettes douglas du réseau RENECOFOR vont être analysés avec la même méthodologie. Il est primordial de confirmer ou d'infirmer les tendances observées sur les résultats précédents. Cette fois-ci, les peuplements ne suivent pas un gradient de sylviculture mais un itinéraire conventionnel. De plus, ils couvrent des fertilités et des stades de développement différents, (cf. figure 9). En effet, il existe de grandes disparités entre les placettes DOU 23, DOU 71 qui ont une vingtaine d'années et DOU 34 dont le suivi a commencé lorsque le peuplement avait 45 ans.

Les estimations des hauteurs dominantes en fonction de l'âge sont beaucoup plus contrastées que pour les placettes en forêt domaniale du Grison. En effet, seules les simulations de DOU 71 sont en adéquation avec les valeurs observées sur le terrain. Dans les autres cas, Gymnos *et FCBA Pseudotsuga menziesii* ont tendance à surestimer la hauteur dominante mesurée. Toutefois, les courbes de cette dernière présentent des paliers. Ils sont très nets sur DOU 23 et DOU 61. Ces accidents de croissance ne peuvent pas être anticipés par les modèles. Ils sont probablement dus à des aléas climatiques de type sécheresse ou à l'implantation de ces peuplements de douglas sur des stations peu adaptées.

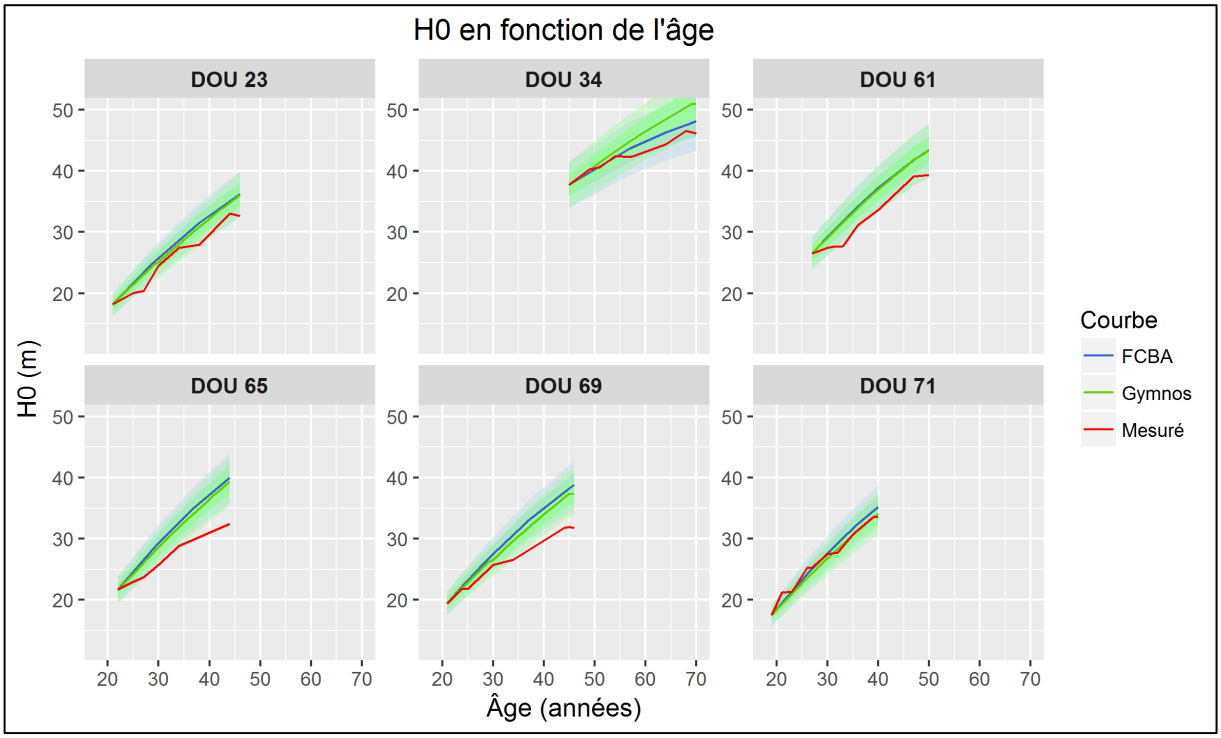


Figure 9 : Evolution de la hauteur dominante par placette

L'assiduité de collecte de données est disparate selon les placettes. Il arrive que la densité de peuplement chute brutalement entre deux inventaires quinquennaux obligatoires, (cf. figure 10). Les deux causes les plus probables sont les tempêtes et les exploitations forestières. Théoriquement, lorsque l'un de ces deux phénomènes a lieu, il incombe aux responsables de la placette de réaliser des inventaires avant et après exploitation. Dans les faits ce n'est pas toujours vérifié. Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes résolus à émettre des hypothèses sur les diminutions de densité entre deux inventaires quinquennaux. Lorsque cette diminution a eu lieu entre 1995 et 2000, on l'a attribuée à la tempête de décembre 1999. De la même façon, on considère la tempête Klaus de janvier 2009 pour les placettes sur sa trajectoire, DOU 23, DOU 34 et DOU 65. Elle est cependant notée 2008 car elle intervient après la saison de végétation de 2008. Enfin, dans les dossiers du pôle RDI de Dole, il est mentionné que la placette DOU 71 a été frappée par un orage en août 2010 et elle a subi quelques dégâts à cette occasion.

En plus des hypothèses, la figure 10 offre un aperçu de la sylviculture appliquée sur chaque placette. Cette dernière est moins « conventionnelle » qu'attendue. On observe même une absence complète d'intervention sur DOU 65.

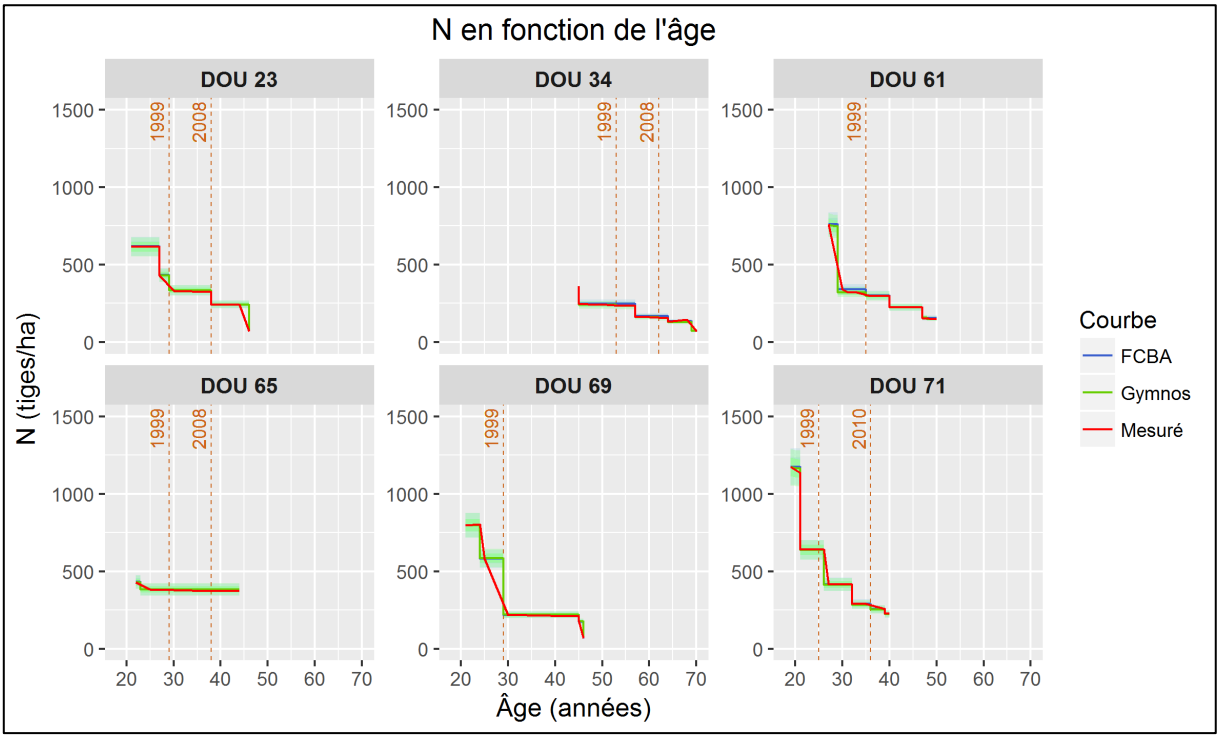


Figure 10 : Evolution de la densité par placette

Sur les placettes RENECOFOR, nous n'avons pas à notre disposition les fiches de martelage, comme c'était le cas en forêt domaniale du Grison. Lorsque l'on simule les interventions, il convient de simuler un martelage plausible tout en cherchant à faire coïncider les surfaces terrières mesurées et estimées, sur le point d'inventaire suivant. Après chaque intervention, cela permet de repartir d'une même densité et surface terrière. Ainsi, on observe le comportement du modèle de croissance.

Globalement, le modèle *Gymnos* approche légèrement mieux la production en surface terrière, (cf. figure 11) que le modèle *FCBA Pseudotsuga menziesii*. En effet, sur les placettes DOU 23 et DOU 34, peuplements de faible fertilité, le modèle du FCBA avait tendance à sous-estimer la production. On

était contraint d'effectuer des éclaircies par le bas pour limiter l'impact des prélèvements sur le capital. En revanche, le modèle *FCBA* surestime la production sur DOU 61. *Gymnos* est plus régulier dans les résultats simulés, hormis sur la placette DOU 65. Lorsqu'aucune intervention n'est programmée et que le capital est déjà bien élevé, *Gymnos* continue d'appliquer une production très forte.



Figure 11 : Evolution de la surface terrière par placette

La tendance du modèle FCBA à sous-estimer la production est confirmée sur la figure 12. En effet, il y a bien plus de points en dessous de la première bissectrice. On met ainsi en évidence un petit biais dans le fonctionnement du modèle. En ce qui concerne *Gymnos*, les points sont très bien répartis, hormis ceux de la placette sans intervention, DOU 65.

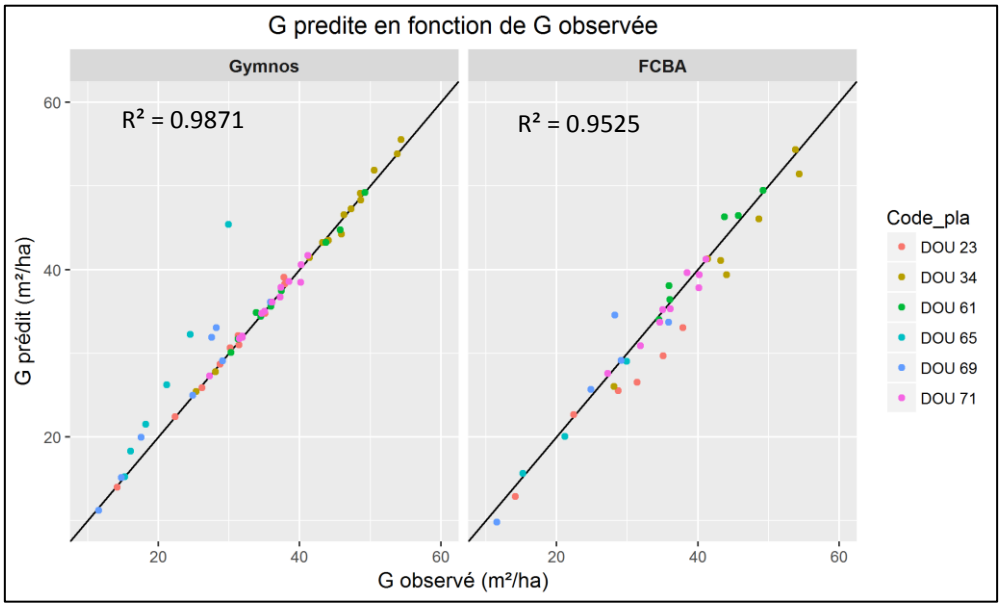


Figure 12: Dispersion des mesures de surface terrière

Le dernier élément de comparaison pour les deux modèles de croissance est leur capacité à déterminer le diamètre dominant du peuplement au fil du temps. Sur ce jeu de données, c'est *Gymnos* qui donne les résultats les plus satisfaisants. Sur la figure 13, la courbe de *Gymnos* est quasiment toujours confondue avec celles des valeurs mesurées. Le graphique des biais n'est pas intégré dans ce rapport afin de ne pas le surcharger davantage, mais il est similaire à celui des surfaces terrières. On y voit clairement que *FCBA Pseudotsuga menziesii* a tendance à sous-estimer le diamètre dominant. En revanche, *Gymnos* ne présente pas de biais, même pour la placette DOU 65.

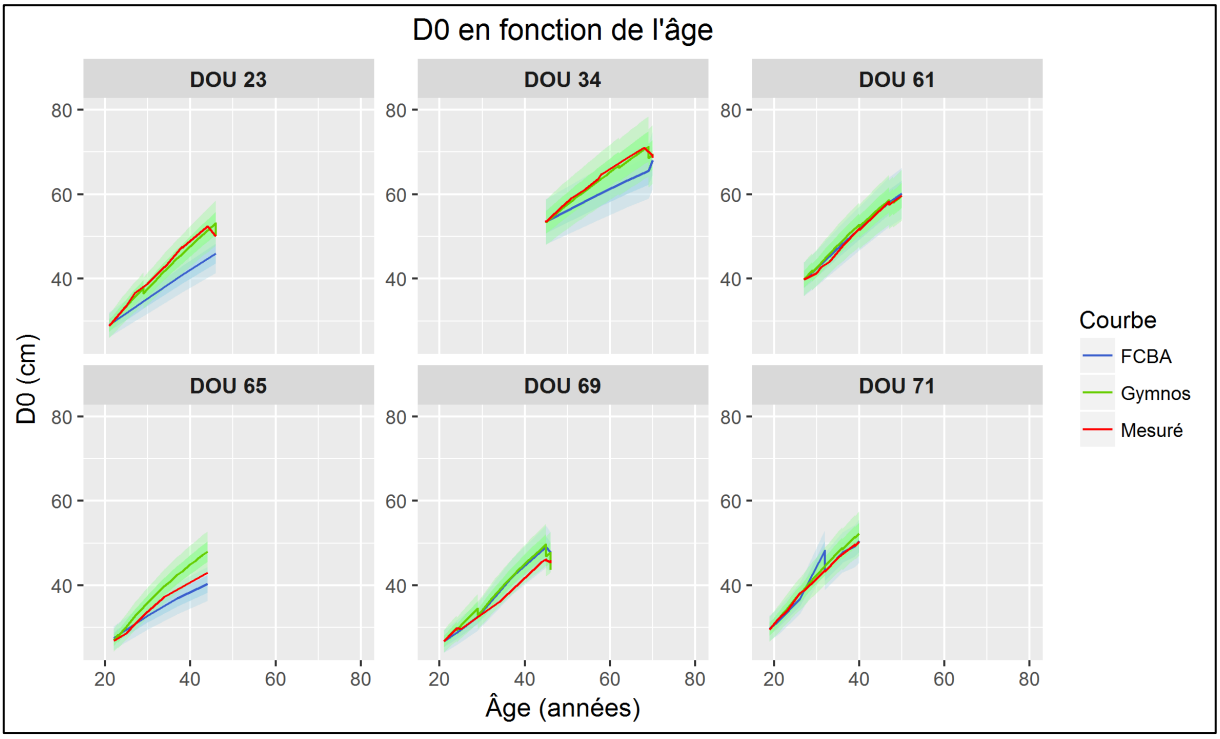


Figure 13: Evolution du diamètre dominant par placette

Il ressort de cette comparaison que les estimations fournies par les deux modèles sont globalement satisfaisantes. En effet, la hauteur dominante, la surface terrière et le diamètre dominant sont bien approchés lors des simulations. Si les deux modèles sont très proches en termes de résultats, il semblerait que *Gymnos* ait été légèrement plus précis sur le jeu de données RENECOFOR. Toutefois *FCBA Pseudotsuga menziesii* n'en reste pas moins performant.

3. Productions et suites de l'étude

a. Implémentation d'un modèle douglas dans *Sydy*

Ce travail sur les modèles de croissance entre dans le cadre de missions affectées à la RDI. Il s'intègre dans une stratégie qui consiste à capitaliser les connaissances sur les modèles et à promouvoir leur utilisation. Dans le cadre de projets en cours ou à venir, la RDI de l'ONF a besoin de simuler l'évolution de certains peuplements de douglas. C'est pour cela que la question sur la performance des modèles douglas a été soulevée. Il en est ressorti que les deux modèles avec lesquels on a travaillé, étaient performants avec un léger avantage pour *Gymnos*. Or, ce constat repose uniquement sur l'analyse des résultats estimés par le modèle. Si l'on souhaite se servir des modèles dans le cadre de projet, il est primordial de ne pas négliger leurs fonctionnalités.

Tableau 1 : Forme et fonctionnalités des modèles douglas

Modèles	*FCBA Pseudotsuga menziesii*	*Gymnos*
Sylviculture et Eclaircies	Automatique	Pas à pas
Extracteur de données	Incomplet	Complet sur le peuplement
Courbes de fertilité	Paramétrables et nombreux choix possibles	Imposées

Les points forts de *FCBA Pseudotsuga menziesii* sont la sylviculture automatique et le paramétrage des courbes de fertilité. En revanche, il est particulièrement fastidieux d'extraire les données relatives aux peuplements. Le modèle *Gymnos* a un fonctionnement voisin du modèle *Fagacées*. Par conséquent, on lui trouve les mêmes limites lorsque l'on veut réaliser une intervention. En conclusion, aucun modèle ne répondait exactement à nos exigences de forme. C'est en partant de ce constat que nous avons eu l'idée de cloner l'un d'entre eux sur le module de croissance *Sydy*. La question des droits et autorisations se pose alors à nous. En effet, *Gymnos* est la propriété intellectuelle de l'université de Gembloux. De même, *FCBA Pseudotsuga menziesii* est la propriété intellectuelle du FCBA.

Dès que l'idée de porter un modèle douglas sur *Sydy* nous est apparue, Gauthier Ligot et Jérôme Périn, chercheurs à l'université de Gembloux, nous ont fait part de leur enthousiasme et ont donné leur accord pour cette manipulation. Les résultats des tests sur le modèle étant très corrects nous avons choisi d'intégrer *Gymnos* dans le module *Sydy*. Cette mission a été réalisée par Philipe Dreyfus. En quelques jours seulement, le noyau de *Gymnos* était copié dans *Sydy.* Ce travail a été réalisé en interaction avec mon service afin d'éliminer les erreurs résiduelles. En effet, en tant qu'utilisateur fréquent des modèles *Sydy* et *Gymnos*, nous étions les plus à même de tester le bon fonctionnement de ce nouveau *Gymnos* intégré dans *Sydy*, *SydGym*.

Le test de *SydGym* a été réalisé sur le jeu de données des placettes en forêt domaniale du Grison. Nous avions déjà à notre disposition les inventaires de départ, il ne restait plus qu'à retranscrire les itinéraires sylvicoles. Au lieu d'appliquer une sylviculture « pas à pas » comme nous l'avions fait dans *Gymnos*, nous avons créé des fichiers itinéraires dans lesquels on mentionnait la densité et la surface terrière objectif après chaque intervention. A l'aide de la sylviculture automatique, les simulations ont été réalisées très rapidement sur *SydGym*. Les variables dendrométriques estimées par *SydGym* ont alors été comparées à celle de *Gymnos*. Nous voulions nous assurer que le portage de *Gymnos* dans *Sydy* n'avait pas altéré son fonctionnement. Comme on peut le voir sur la figure 14, cela n'a pas été le cas. SydGym applique au peuplement la même production. De plus, la sylviculture automatique n'a absolument pas induit de décalage dans les itinéraires après les interventions. Si l'on s'intéresse à la

hauteur dominante ou le diamètre dominant, on obtiendrait une parfaite concordance entre *SydGym* et *Gymnos* comme pour la surface terrière.

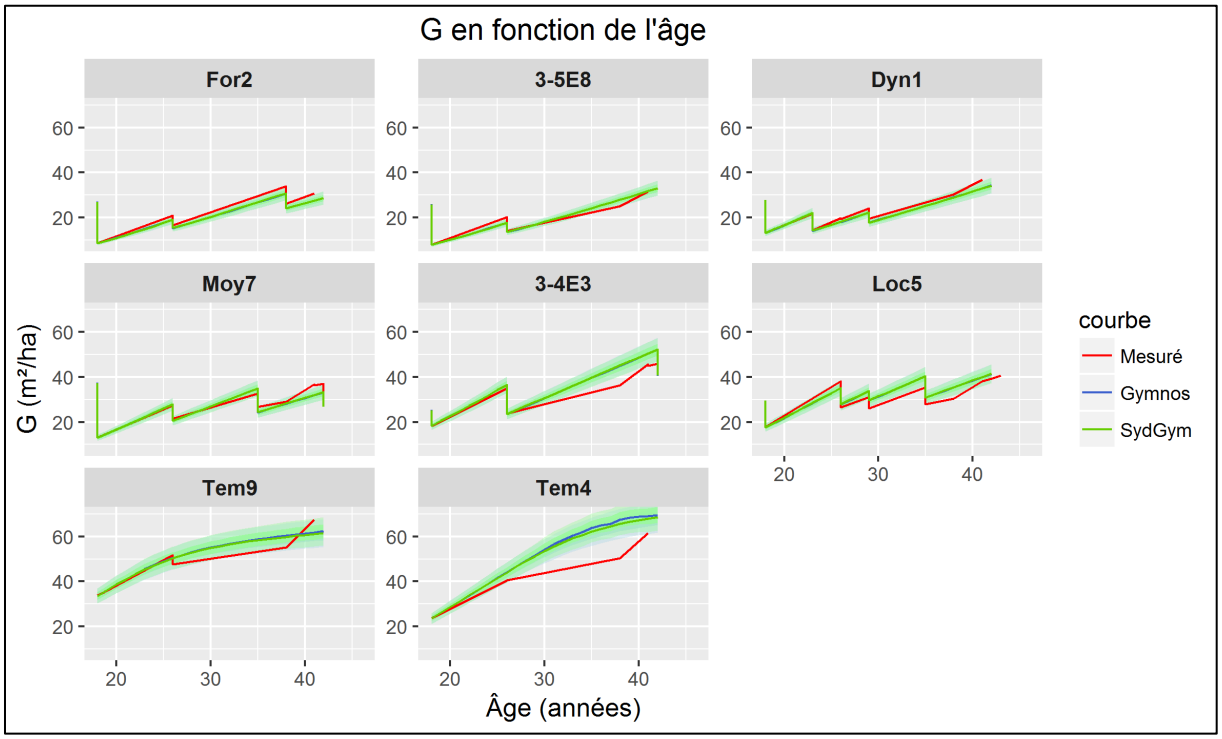


Figure 14: Comparaison de production SydGym et Gymnos

b. Confection de notices et ajout de fonctionnalité

En conclusion, lorsque l'on utilise un modèle de croissance pour la première fois, il n'est pas toujours évident de le prendre en main immédiatement. Les nombreux travaux réalisés à l'aide de ces outils nous ont fait acquérir une expérience significative en tant qu'utilisateur sur les quatre modèles de croissance suivant :

- Fagacées
- FCBA Pseudotsuga menziesii (anciennement Oasis)
- Gymnos
- Sydy (avec Gymnos intégré)

Afin qu'un utilisateur néophyte puisse prendre en main ces modèles de croissance le plus rapidement possible, nous avons rédigé des notices de fonctionnement pour chaque modèle. Ces dernières ne sont pas exhaustives, bien au contraire mais les méthodologies de travail que nous avons appliqué sur ces modèles sont détaillées afin qu'elles puissent être reproduites facilement.

Travailler sur des simulations d'accroissement a été l'occasion d'échanger avec de nombreux modélisateurs avides de retours constructifs sur le fonctionnement de leur modèle. A l'occasion d'un séminaire dédié aux modélisateurs et utilisateurs Capsis, nous avons fait l'éloge du système de sylviculture automatique développé par Philippe Dreyfus. Le responsable de la plateforme Capsis, François de Coligny, s'est montré très intéressé par notre regard d'utilisateur car ces derniers sont

généralement peu nombreux aux séminaires Capsis. Dès lors, le portage de la sylviculture automatique sur le noyau de Capsis commun à tous les modèles a été évoqué. Ainsi, il ne serait plus nécessaire de copier les équations d'un modèle dans *Sydy* lorsque l'on souhaite utiliser la sylviculture automatique.

Les échanges entre utilisateurs et modélisateurs sont primordiaux, si l'on souhaite faire progresser le développement de ces outils. En rendant ces modèles plus accessibles, on incite à leur utilisation. L'intégration de nouveau modèle dans *Sydy* favorise cette appropriation. L'utilisateur s'habitue à une seule interface et peut simuler l'évolution de peuplements parmi un panel d'essences de plus en plus important.

II. Une utilisation pragmatique : Reproduction et évolution de peuplements réels

Le bois énergie représente près de la moitié de l'énergie renouvelable produite en France. Depuis quelques années, on constate une évolution des méthodes de récolte en forêt. En effet, les menus bois (MB) dont le diamètre est inférieur à 7 cm ne présentaient que peu d'intérêt et étaient résidus de l'exploitation forestière (Achat et al., 2014). Avec l'essor du bois énergie, la pression sur ces bois augmente et il est de plus en plus question de les commercialiser afin d'obtenir davantage de combustible. L'enjeu est encore plus important lors de la première éclaircie car cela permet de rentabiliser une intervention autrefois peu rentable mais c'est à ce stade que la proportion de menus bois est la plus importante.

Cependant, c'est au niveau des feuilles et des branches fines, que les éléments minéraux des arbres sont les plus concentrés. Ces éléments sont indispensables à la croissance de l'arbre et leur disponibilité au fil des révolutions doit rester stable si l'on souhaite maintenir le même niveau de production. L'arbre puise dans le sol les minéraux nécessaires à son développement. Lorsque les feuilles tombent en fin d'année, ainsi que les branches mortes occasionnellement, la matière organique commence à se décomposer. Ainsi, les éléments minéraux sont restitués au sol et sont de nouveau disponibles pour la croissance d'arbres futurs.

Lorsque du bois est prélevé, et ce quelle que soit sa taille, une proportion plus ou moins importante de minéraux est exportée selon le compartiment auquel appartient ce bois. Toutefois, les différentes méthodes de récolte n'ont jamais été réellement comparées sur la base de critères quantitatifs. Les modèles de croissance se présentent comme l'outil idéal pour quantifier ces exports de biomasse et de minéralomasse tout au long de l'itinéraire sylvicole. Il parait évident qu'une intensification des exportations pourra entraîner à terme une variation de fertilité selon le niveau de richesse chimique du sol. Cependant, aucune analyse de sensibilité à une variation de fertilité n'a été réalisée à ce jour. Encore une fois, les modèles de croissance peuvent apporter des éléments de réponse à toutes ces interrogations.

1. Simulation d'itinéraires dans le cadre du projet RESPIRE

Le projet RESPIRE est issue d'une collaboration entre plusieurs organismes de recherche et de R&D dont l'ONF et l'INRA (Institut national de la recherche agronomique). Il comporte un volet itinéraire sylvicole et reprend à son compte les problématiques soulevées précédemment sur les exportations de minéralomasse et les variations de fertilité. Dans le cadre de ce projet, on simule l'évolution de plusieurs peuplements de chêne, de hêtre et de douglas. Afin de comparer les valeurs de biomasse et de minéralomasse que nous allons estimer, il est primordial de s'appuyer sur des peuplements réels pour lesquels ces informations sont accessibles. Les peuplements du réseau MOS (Matière Organique des Sols) correspondent exactement à nos critères et serviront de base pour toutes les simulations.

a. Présentation du réseau MOS

Le réseau *MOS* cité précédemment a pour objectif de quantifier l'impact de l'exportation de biomasse. Emila AKROUME, chargée de recherche à l'Office national des forêts au pôle RDI de Dole a abordé ces problématiques lors de sa thèse à l'INRA (Akroume et al.). Afin d'y répondre, elle a mis en place un réseau comprenant 18 dispositifs répartis sur toute la France. Tous ces dispositifs sont implantés dans des peuplements en futaie régulière au stade de la première ou de la seconde éclaircie. On compte 6 peuplements de hêtre, 6 peuplements de chêne et 6 peuplements de douglas. Sur chaque dispositif, les 4 modalités suivantes sont testées :

- Témoin : sylviculture habituelle, prélèvement des grumes mais conservation des menus bois après coupe
- Retrait des menus bois
- Retrait des menus bois + de la litière
- Retrait des menus bois + compensation par apport de cendres (expertise ONF RDI)

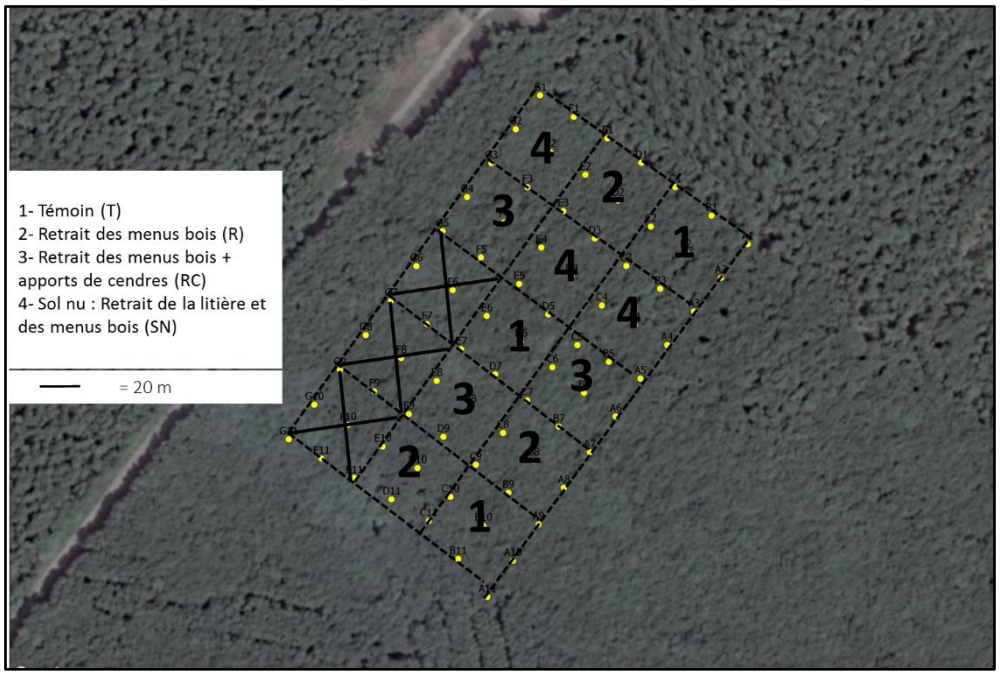


Figure 15 : Exemple de dispositif MOS, site de Ban d'Harol

Chaque modalité est répétée 3 fois par dispositif. On trouve ainsi 4x3 soit 12 placettes de 40 m x 40 m sur chaque site. Chaque placette fait 1600m² et la totalité d'un dispositif s'étend en moyenne sur 2 ha. Un inventaire par placettes circulaires est réalisé à l'installation sur chaque placette de 1600m². Ce dernier fourni les effectifs par classe de diamètre ainsi que la hauteur dominante du peuplement, soient toutes les informations nécessaires à l'initialisation d'une simulation. De plus, des mesures de biomasse (par pesée) et de minéralomasse (analyse chimique d'échantillons des fagots exportés) sont effectuées sur les dispositifs lorsque les rémanents sont retirés. Ces données permettront à terme de nuancer les résultats obtenus à ce jour avec l'aide de modèle.

b. Méthodologie des simulations

En 2017, à l'occasion d'un rapport d'activité, j'avais détaillé les différentes étapes de mise au point de notre méthodologie. Cette dernière a encore évolué cette année et se trouve définitivement stabilisée.

i. Initialisation des peuplements

Comme lors de la comparaison des modèles de croissance douglas, il est indispensable de passer par une phase d'initialisation du peuplement avant d'entreprendre toute simulation. A partir des relevés terrains, nous devons établir un inventaire par classe de diamètre. C'est ce dernier qui sera converti en liste d'arbres et saisi dans le fichier inventaire.

Sur les dispositifs, une maille de 40 m par 40 m a été mise en place afin d'effectuer les relevés dendrométriques. Sur chaque point, tous les arbres dont la circonférence est supérieure à 20 cm sont relevés en tant que « TIGE » s'ils se trouvent dans un cercle de rayon 5m. Les arbres dont la circonférence est inférieure à 20 cm sont comptabilisés en tant que « REGE » s'ils se trouvent dans un rayon de 3m à partir du centre de la placette. Afin de traiter ces données au mieux, on calcule le poids de chaque type de placette et on obtient ainsi des valeurs à l'hectare.

Bien que cela puisse légèrement varier selon les sites, une douzaine de relevés est effectuée par dispositif. Cela correspond à une surface inventoriée de 942 m², ce qui est faible lorsque l'on sait que la surface d'un site est d'environ 2ha. Les placettes circulaires ainsi effectuées ne constituent pas un échantillonnage représentatif de la totalité du peuplement d'un dispositif. Elles ont été mises en place de cette façon afin de coïncider avec les prélèvements de sol effectués dans le cadre du réseau MOS. On ne cherche pas à calculer une erreur relative et une incertitude pour la détermination des variables dendrométriques. On assimile l'ensemble de ces placettes à un seul et même peuplement en plein : nous avons à notre disposition une liste exhaustive des arbres constituant notre peuplement. C'est cette liste qui est fournie à Capsis afin de démarrer les simulations de peuplement.

Lors de cette phase de simulation, il convient également de fournir au modèle de croissance un couple Âge/Hauteur dominante. C'est avec ce couple que le modèle applique la bonne fertilité, et donc le bon accroissement à l'ensemble du peuplement. Sur le terrain, cela s'est traduit par des mesures de hauteur sur chaque point d'échantillonnage. En effet, la hauteur des trois plus grosses tiges par placettes est relevée sur le terrain. Il a été choisi que la hauteur dominante du peuplement serait la moyenne arithmétique de toutes les hauteurs mesurées.

Enfin, la localisation est également renseignée sur le fichier inventaire lorsqu'il s'agit d'un peuplement de hêtre. En effet, il existe deux faisceaux de fertilité, Nord-Ouest et Nord-Est, (Bontemps et al.), influant sur les accroissements. Dans Capsis cette différence de fertilité selon la localisation a été implémentée, c'est pourquoi il convient de la renseigner.

ii. Evolution des peuplements

Lors de mon rapport d'activité 2017, le fonctionnement de *Fagacées* et de *Sydy* avait été évoqué. Dans un premier temps, nous avions travaillé sur *Fagacées* avant de passer sur *Sydy*. C'est sur ce dernier modèle que les simulations de l'ensemble des dispositifs ont été effectuées car la sylviculture automatique est un avantage indéniable.

Dès que l'initialisation des peuplements est réalisée, nous pouvons commencer à travailler sur la sylviculture appliquée. Dans le cadre du projet RESPIRE, il a été décidé de se baser sur une sylviculture de référence et ce pour l'ensemble des dispositifs. Les guides de sylviculture incarnent cette sylviculture « conventionnelle » et réaliste à mettre en œuvre lors de nos simulations. Les peuplements étant différents en essence et en localisation, nous nous sommes appuyés sur les guides de sylviculture suivants :

- Hêtraies continentales, Sardin et al., 2011.
- Hêtraie Nord-Atlantique, Pilard-Landeau et al., 2008.
- Chênaies continentales, Sardin, 2008.
- Chênaie atlantique, Jarret, 2004.
- Douglasaies françaises, Angelier, 2007. (Correctif de 2012, Sardin)

Pour chaque guide de sylviculture, l'itinéraire retenu est celui correspondant à la fertilité du peuplement. Cet itinéraire est reproduit sur *Sydy* avec l'aide d'un fichier adapté, cf. notice de fonctionnement. On cherche néanmoins à respecter le bon sens sylvicole lors des simulations. En effet, il est fréquent de devoir appliquer une sylviculture de rattrapage sur certains peuplements. Auquel cas, on ne rattrape pas tout le retard en une seule intervention. Il a été choisi de limiter le prélèvement à 25% du capital par intervention car un prélèvement plus intense aurait pour effet de déstabiliser le peuplement en conditions réelles.

Toute la puissance de *Sydy* se révèle dans cette phase d'évolution des différents peuplements. Adapter un itinéraire sylvicole à chaque dispositif ne s'avère pas être aussi fluide qu'il y parait. Procéder par tâtonnement induit de nombreuses simulations. De même, après chaque réunion de projet, il n'est pas rare de modifier un itinéraire afin d'augmenter la durée de rotation ou d'abaisser légèrement le prélèvement. Avec *Sydy*, il suffit de modifier brièvement le fichier itinéraire et de relancer la simulation. Cette manipulation prend quelques secondes alors qu'il faudrait près d'une heure avec un modèle tel que *Fagacées*.

iii. Extraction de données

Pour mémoire, nous simulons l'évolution des peuplements afin de quantifier biomasse et minéralomasse, (Wernsdörfer et al.), contenues dans les arbres au fil du temps. Ces estimations ne sont pas réalisées sur Capsis mais par l'intermédiaire d'un script R développé par Jean-Pierre Renaud, chargé de recherche au pôle RDI de Nancy. Afin d'alimenter ce script, nous devons fournir des données

tige par tige. Philippe Dreyfus, développeur de *Sydy*, a intégré dans son modèle un extracteur fournissant les données tige par tige. Nous avons extrait ces données « Tous les arbres » après chaque simulation. De même, une extraction « table des peuplements » a été effectuée, (densité, surface terrière, hauteur dominante, etc.)

c. Résultats des simulations

Sur Capsis, il est possible de visualiser directement les variables dendrométriques. Toutefois cette option n'est pas très ergonomique, c'est pourquoi les données ont été extraites avant d'être retraitées. Même si le projet RESPIRE tourne autour de la biomasse et de la minéralomasse, il convient de veiller à ce que les données servant de base aux calculs soient correctement estimées. Nous regarderons donc dans un premier temps l'évolution des peuplements de chaque dispositif.

i. Hêtre

Les peuplements de hêtre sont ceux qui ont été simulés en premier. Sur le tableau 2, nous pouvons observer que les dispositifs couvrent une large gamme de fertilité et des guides de sylviculture différents. Bien que la plupart des peuplements soient réellement au stade de la première éclaircie, ils subissent tous une sylviculture de rattrapage afin de combler le retard par rapport à leur guide de référence.

Tableau 2: Situation dispositifs MOS, Hêtre

Forêt	Origine	Age INV	H0 (m)	Guide de sylviculture	Fertilité	Stade Guide (n° éclaircie)	Stade réel (n° éclaircie)	Sylviculture de rattrapage
FD de la Verrière du Grosbois (25)	Régé. nat	50 ans	21,8	Hêtraies Continentales	Forte	Entre 3e et 4e	4e	Oui
FD Compiègne (60)	Plantation	40 ans	20	Hêtraie Nord-Atlantique	F2	3e	1ère	Oui
FD Ban d'Harol (88)	Régé. nat	35 ans	15,7	Hêtraies Continentales	Forte	1ère	1ère	Oui
FD Darney (88)	Régé. nat	35 ans	17,9	Hêtraies Continentales	Forte	2e	1ère	Oui
FD Saint-Quirin	Régé. nat	32 ans	16	Hêtraies Continentales	Forte	1ère	1ère	Oui
Gaillefontaine (76)	Plantation	40 ans	25	Hêtraie Nord-Atlantique	F2	5e		Oui

La sylviculture de rattrapage se voit nettement sur la figure 16. En effet la surface terrière tend à diminuer au fur et à mesure des éclaircies. Cela se voit très nettement sur la forêt de Saint-Quirin. Lorsque l'itinéraire sylvicole n'est pas dans une logique de rattrapage, il doit ressembler davantage à la courbe de Compiègne. C'est-à-dire le maintien d'un niveau de capital entre 15 et 20 m²/ha de surface terrière afin de maximiser l'accroissement par tige. De plus, ce capital augmente progressivement jusqu'à l'abord des coupes définitives.

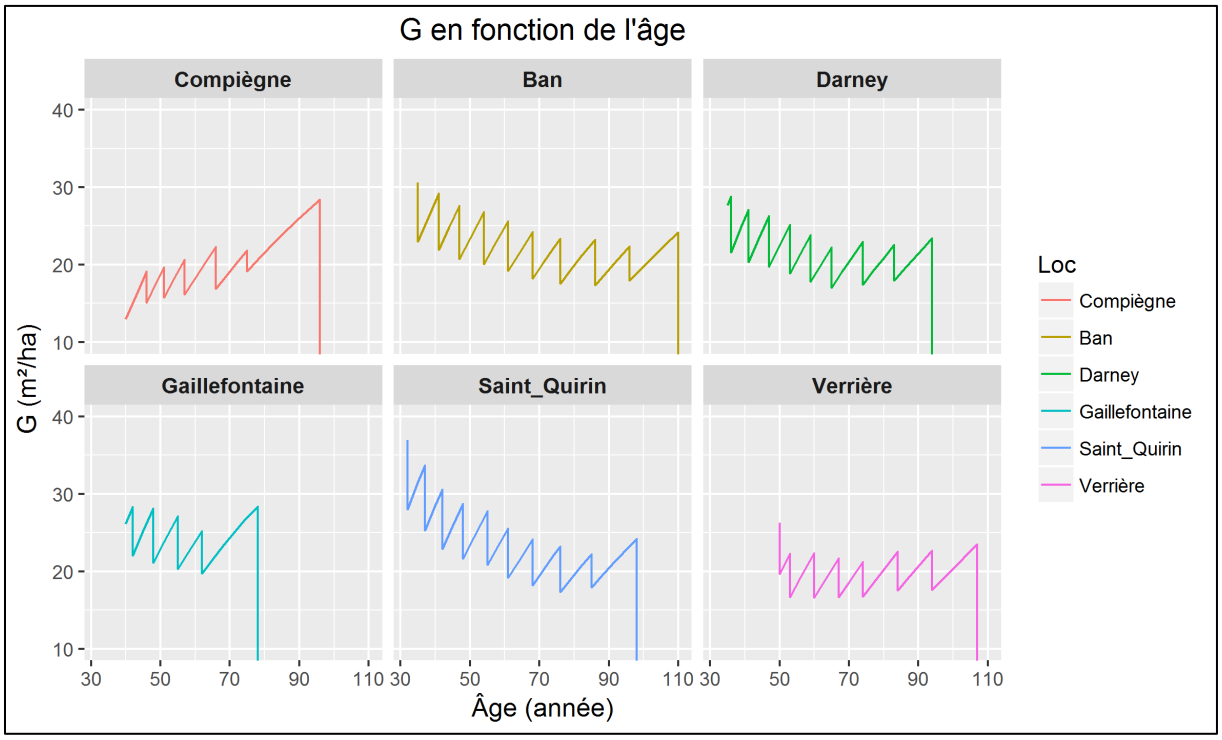


Figure 16: Evolution surface terrière dispositifs MOS, Hêtre

ii. Chêne

Comme pour le hêtre, nous avons simulé l'évolution des 6 peuplements de chêne constituant le réseau MOS. Cette fois encore, nous couvrons une large gamme de fertilité répartie entre deux guides de sylviculture. Une autre similitude réside dans la situation de rattrapage qui est commune à l'ensemble des sites.

Tableau 3: Situation dispositifs MOS, Chêne

Forêt	Origine	Age INV	H0 (m)	Guide de sylviculture	Fertilité	Stade Guide (n° éclaircie)	Stade réel (n° éclaircie)	Sylviculture de rattrapage
FC de Reichshoffen (67)	Régé. nat	42 ans	16,5	Chênaies Continentales	F2	2e	1ère	Oui
FD Tronçais (03)	Régé. nat	50 ans	17,2	Chênaie Atlantique	F2	2e	1ère	Oui
FD Prieurés Grosbois (03)	Régé. nat	37 ans	16,4	Chênaie Atlantique	F1	Entre 1ère et 2e	1ère	Oui
FD Compiègne (60)	Plantation	30 ans	13	Chênaie Atlantique	F2	1ère	1ère	Oui
FD Fontainebleau (77)	Régé. Nat	42 ans	12	Chênaie Atlantique	F3	1ère	1ère	Oui
FD Champenoux (54)	Régé. nat	40 ans	16,4	Chênaies Continentales	F1	2e	1ère	Non

Dans un premier temps, on voit nettement la sylviculture de rattrapage mise en place sur chaque dispositif. Après cette phase de décapitalisation, les itinéraires suivent les progressions habituelles. Lorsque l'on regarde la figure 17, on n'identifie pas de simulations aberrantes. Les valeurs estimées des peuplements sont proches des guides, il convient de rappeler que les guides ont été réalisés avec *Fagacées*, donc le même moteur de croissance que *Sydy*. On valide ainsi les résultats extraits des simulations.

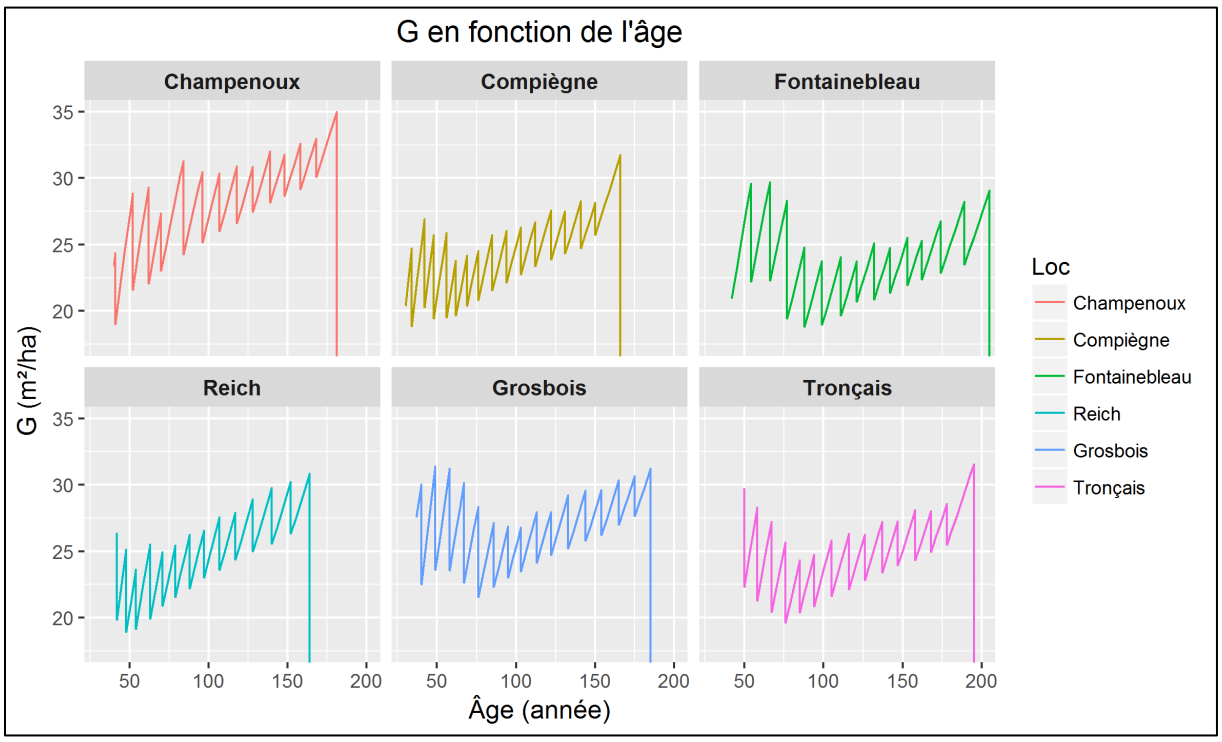


Figure 17: Evolution surface terrière dispositifs MOS, Chêne

2. Bilan minéral des itinéraires sylvicoles

Dans le cadre du projet RESPIRE, les simulations avec un modèle de croissance ne constituent pas une finalité mais un moyen de répondre aux problématiques soulevées. En effet, on ne peut pas obtenir des résultats relatifs à toute une révolution uniquement par l'expérimentation. Nous venons de montrer que les itinéraires simulés étaient réalistes et respectaient les règles de bon sens sylvicole. Désormais, les résultats extraits à la suite des simulations servent de base à notre étude.

a. Méthodologie de calcul

i. Calcul du volume

Lors de chaque simulation, les variables dendrométriques et une liste d'arbres retraçant tout l'itinéraire sont systématiquement extraites. Dans cette liste mise au point par Philipe Dreyfus, on trouve les informations suivantes pour chaque date :

- Identifiant de la tige (défini à l'initiation du peuplement)
- Espèce
- Diamètre à 1,3 m
- Hauteur totale
- Hauteur de base de houppier
- Statut de l'arbre (En vie ou coupé)

Avant et après chaque intervention, nous avons calculé le volume individuel de toutes les tiges. Nous avons également calculé la répartition du volume au sein des différents compartiments de

l'arbre. Ces derniers sont délimités par le diamètre de la tige ou des branches sur écorce et l'on en dénombre 4 :

- 0 à 4 cm
- 4 à 7 cm
- 7 à 22 cm
- Plus de 22 cm

L'union des compartiments 0-4 cm et 4-7 cm, donc de tous les bois de 0 à 7 cm de diamètre, forme ce que l'on appelle l'ensemble des menus bois. Par opposition, les bois dont le diamètre est supérieur à 7 cm est appelé bois fort. Cette compartimentation très fine est appliquée lors du calcul de volume car elle est de rigueur dans les modèles de biomasse et de minéralomasse. Afin de calculer l'ensemble de ces volumes, nous avons utilisé les tarifs de cubage EMERGE, Deleuze et al. 2014.

ii. Calcul de biomasse

La biomasse est calculée à partir du volume et de l'infradensité pour chaque compartiment établi lors du calcul du volume.

$$Biomasse = Volume \times infradensité$$

Faute de références, nous faisons l'hypothèse que la densité du bois dépend de l'espèce et non du compartiment. C'est pourquoi nous retenons un coefficient une densité indépendante du compartiment, 0.55 pour le chêne et le hêtre, (métaanalyse de J.L. Dupouey pour Carbofor, 2000, mis à jour par F. Longuetaud, projet Emerge, à publier).

iii. Calcul de minéralomasse

Pour le hêtre, les calculs de minéralomasse par kilogramme de matière ligneuse ont été initialement effectués en s'appuyant sur les modèles de Holger Wernsdörfer, (Wernsdörfer et al., 2014). Quel que soit l'élément minéral étudié, le modèle se présente sous une équation de la forme suivante :

$$Mineralo.bois = A + B \times e^{C \times \emptyset_{moy}} + D \times \emptyset_{moy}$$

A, B, C et D sont des constantes qui dépendent de l'élément minéral étudié, $\emptyset_{moy}$ correspond au diamètre moyen du compartiment étudié. C'est parce que nous souhaitions avoir des résultats plus précis que nous avons créé des compartiments plus fins que les menus bois et les bois forts. Cette équation est valable pour le bois mais également pour l'écorce. Auquel cas les coefficients A, B C et D sont remplacés par des coefficients E, F, G et H. A terme, nous utiliserons des modèles génériques développés pour toutes les essences dans le cadre du projet GERBOISE. Les résultats obtenus pour le hêtre seront remplacés par ceux du modèle générique.

Dans les compartiments des arbres, on trouve une grande majorité de bois mais une part non négligeable d'écorce. Si l'on souhaite obtenir la minéralomasse exact d'un compartiment, il convient de tenir compte de cette part d'écorce.

$$Mineralomasse = Biomasse \times (\%.bois \times Mineralo.bois + \%.ecorce \times Mineralo.écorce)$$

Après cette dernière étape, on obtient la minéralomasse pour chaque tige et par compartiment. Si l'on choisit de sommer les résultats par compartiment, cela revient à calculer ces grandeurs pour l'ensemble du peuplement.

Toutes ces étapes de calculs, allant du volume par compartiment à la minéralomasse ont été compilées dans un script R par Jean-Pierre Renaud. Une fois que le script a été mis au point pour un peuplement, il est aisé de reproduire la méthode de travail pour les autres.

b. Résultats et analyses

i. Biomasse

La méthode de calcul que nous venons de détailler offre des résultats particulièrement riches et exhaustifs. C'est pourquoi nous présentons ici uniquement les résultats relatifs au site de Ban d'Harol.

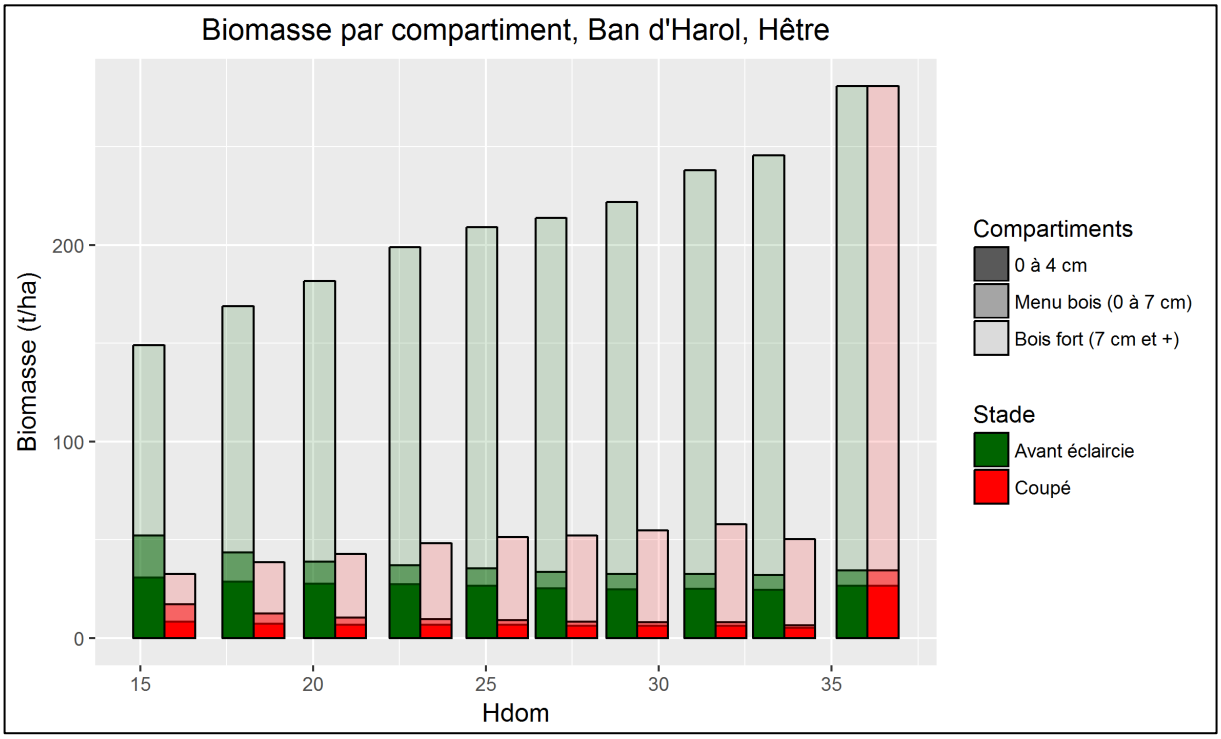


Figure 18: Répartition de la biomasse lors de chaque intervention

Sur la figure 18, on visualise la biomasse disponible avant éclaircie et la biomasse prélevée lors des coupes pour toutes les interventions de l'itinéraire. Chaque couple d'histogramme vert et rouge correspond à une éclaircie réalisée sur le simulateur de croissance. Sur le premier histogramme de chaque couple, en vert, on observe la biomasse de tout le peuplement répartie selon les compartiments. A côté, en rouge, on observe la biomasse qui est prélevée lors des interventions successives. Juste après, la coupe, on se retrouve dans une situation équivalente à vert moins rouge, mais elle n'est pas représentée ici.

On observe que la part relative des menus bois dans le peuplement est maximale lors des premières interventions. Ensuite, la quantité de menus bois tend à rester stable mais sa proportion

diminue car la biomasse de bois fort augmente systématiquement entre deux éclaircies. Dans le projet RESPIRE, on cherche à quantifier l'impact de la récolte de ces menus bois sur la fertilité du peuplement. Toutefois, cette question se pose aujourd'hui car il y a un réel intérêt à récolter les menus bois lors des interventions sylvicoles, surtout lors de la première ou deuxième éclaircie. A ce stade, les menus bois représentent la moitié de la biomasse et sont dispersés entre le houppier et la tige. En autorisant les exploitations d'arbres entiers, incluant les menus bois, on double la quantité de matière ligneuse et on augmente grandement nos chances de rentabiliser l'exploitation. A l'inverse, si l'on souhaite faire du billonnage sur des toutes petites tiges, on fait exploser les coûts d'exploitation.

Pour les interventions en milieu d'itinéraire, l'enjeu autour des menus bois est beaucoup moins important et il est beaucoup plus aisé d'exploiter par billon. Les menus bois ne représentent qu'une proportion relativement faible de la matière prélevée. De plus, leur valeur commerciale est très faible comparativement à celle de la grume. Enfin, leur exploitation est plus délicate que dans de jeunes individus car les menus bois sont répartis dans le houppier et il n'est pas possible de les débarder en une seule manipulation.

Lors des coupes d'ensemencement et de la récolte définitive du peuplement, condensées en une seule intervention pour les simulations, la récolte des menus bois présente un certain enjeu. Elle permet de débarrasser le sol des houppiers très encombrants à cause du développement avancé des arbres. Cette préparation du terrain, couplée à des revenus supplémentaires rend très attractive la récolte des menus bois.

ii. Minéralomasse

De la même façon que pour la biomasse, nous avons étudié la répartition dans les compartiments, des cinq éléments minéraux suivants :

- Azote
- Phosphore
- Potassium
- Calcium
- Magnésium

Dans un premier temps, on s'intéresse à l'azote, (cf. figure 19). On remarque immédiatement que la proportion d'azote contenue dans les menus bois est très importante. Au stade de la première éclaircie, il y a plus de la moitié de l'azote du peuplement qui est contenue dans les menus bois alors que ce compartiment ne représente qu'un tiers de la biomasse. L'azote se trouve majoritairement dans les menus bois, cette tendance communément admise est confirmée par le croisement entre la répartition de la biomasse et de l'azote.

Cette surconcentration en azote dans les menus bois n'est pas sans conséquence. Lorsque l'on prélève du bois il y a indéniablement des prélèvements en azote. Toutefois, une récolte des menus bois entraine un surcoût en azote par rapport à une récolte de bois fort. C'est-à-dire que pour un même volume de bois prélevé, on exportera plus d'azote en sortant des menus bois.

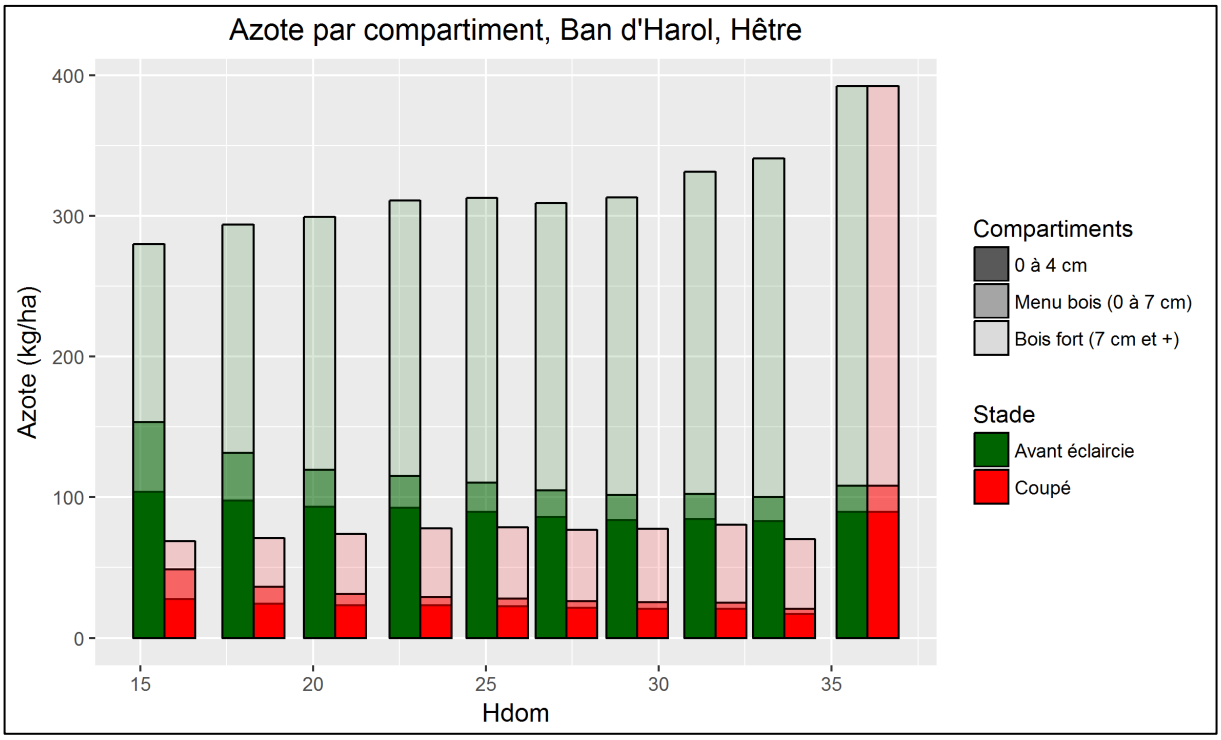


Figure 19 : Répartition de l'azote lors de chaque intervention

Le phosphore suit globalement la même tendance que l'azote. On peut donc tirer les mêmes conclusions. En revanche, le comportement pour le potassium et le magnésium non représentés ici mais équivalent au calcium, est complètement différent. C'est ce que l'on peut voir sur la figure 20. Le calcium contenu dans les menus bois représente une plus faible proportion que pour les autres minéraux. En effet ces minéraux se trouvent principalement dans les écorces, (Ponette et al.).

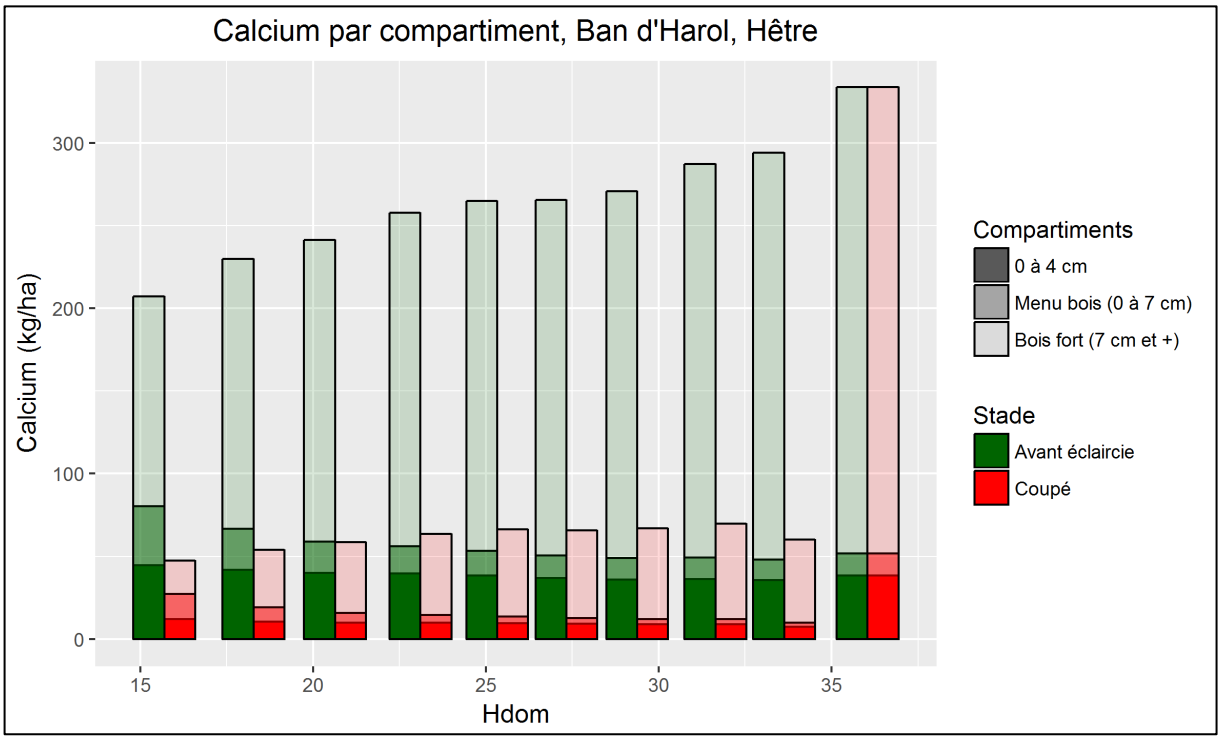


Figure 20 : Répartition du calcium lors de chaque intervention

Le graphique qui présente la concentration en calcium au fil des différentes interventions est davantage similaire à celui de la biomasse qu'à celui de l'azote. Ainsi, lorsque l'on exploite les menus bois, le surcoût en calcium est moindre par rapport à celui en azote, (Ranger et al., 1995).

c. Scénarios de prélèvement et compensation

Les récoltes de menus bois entrainent une augmentation de la ressource commercialisable mais engendre un surcoût en exportation de minéraux. Cette pratique peut entrainer une diminution de la fertilité si elle est réalisée trop fréquemment. Des préconisations à suivre sont recensées dans le guide ADEME de 2006, (Cacot et al.). On y trouve la fréquence de récolte conseillée selon la sensibilité chimique des sols. Des compensations par amendement sont même envisagées dans les cas les plus critiques. Les indicateurs de sensibilité des sols forestiers aux exportations ont été très récemment revus et affinés dans le projet INSENSE, financé par l'ADEME (2013-2017). Dans le cadre du projet RESPIRE, on cherche à quantifier plus finement les exportations de chaque élément minéral selon des scénarios de prélèvement bien distinct. Le projet comporte également un volet sur les amendements par apport de cendres. C'est pourquoi, il convient d'établir des bilans d'exportation minérale précis pour chaque scénario.

i. Scénario *de prélèvement*

Lors de chaque intervention sylvicole, le forestier peut faire le choix de prélever les menus bois afin de commercialiser davantage de matière. Le nombre de combinaisons de scénarios possibles est particulièrement élevé. Pour cause de contraintes temporelles, nous avons fait le choix d'étudier précisément 3 scénarios de récolte théoriques :

- 1 : Récolte des menus bois à chaque intervention
- 2 : Pas de récolte des menus bois
- 3 : Récolte des menus bois à la première et dernière intervention

Le premier scénario est un peu extrême dans la réalisation, cependant il correspond à la récolte maximale que l'on peut réaliser au sein d'un peuplement forestier. En cas de développement très intense de la filière bois énergie en France, c'est le scénario qui serait le plus apte à fournir les chaufferies tout en conservant une production de bois d'œuvre de qualité. Il s'agit du scénario expérimental testé sur les sites du réseau MOS.

Le second scénario est l'opposé du premier. C'est notre scénario de référence. Bien que les exportations de minéraux ne soient pas nulles car on exploite le bois fort, aucun menu bois n'est prélevé afin de préserver au maximum la richesse chimique du sol.

Enfin, le troisième scénario est certainement le compromis de récolte qui répond au mieux aux besoins du forestier. En effet, la première éclaircie est assez difficile à commercialiser. Elle est généralement retardée, faute de bois trop petits. Par conséquent, on pénalise l'itinéraire sylvicole à cause d'un retard pris dès le début, ou bien on réalise une intervention sous forme de travaux, ce qui diminue la performance économique du peuplement forestier. Réaliser une concession sur l'exportation des menus bois augmente les chances de commercialiser cette première éclaircie sans prendre de retard sur l'itinéraire, ni réduire la performance économique de ce dernier. De même,

exporter les menus bois lors de la dernière intervention est un compromis intéressant pour le forestier. Lorsque l'on entame la régénération du peuplement, les tiges sont bien développées et ont un houppier encombrant. Lorsque les arbres sont abattus, les houppiers occupent beaucoup de place au sol s'ils ne sont pas désossés correctement par des cessionnaires ou affouagistes. Le cas échéant, les houppiers gênent l'installation des semis. En exploitant les menus bois lors de la dernière intervention, le forestier libère de l'espace au niveau du sol et maximise ses chances de réussir la régénération.

ii. Bilan minéralogique

Toujours sur le site de Ban d'Harol, nous avons sommé les exportations de biomasse et de minéralomasse pour toutes les interventions. Le tableau 4, fait office de bilan pour les trois scénarios présentés précédemment. Le bilan sur le scénario 2 correspond uniquement aux exportations des grumes. Les valeurs de ce dernier sont incompressibles si l'on souhaite affecter une fonction de production à la forêt. Bien évidemment, les valeurs des scénarios 1 et 3 sont supérieures car on prélève également des menus bois.

Tableau 4 : Bilan des exportations minérales, Ban d'Harol

Scénario	Biomasse (tonne/ha)	Azote (kg/ha)	Phosphore (kg/ha)	Potassium (kg/ha)	Calcium (kg/ha)	Magnesium (kg/ha)
1	709	1067	102	1355	886	163
2	586	689	69	1136	698	131
3	637	845	83	1227	777	145

Toutefois, ces résultats bruts ne sont pas facilement exploitables. D'une part, nous ne connaissons pas l'incertitude sur les estimations fournies par le modèle de minéralomasse. D'autre part, il est particulièrement compliqué de visualiser l'incidence des résultats à partir du tableau 4. C'est pourquoi, nous avons choisi de travailler en relatif. Nous nous basons sur le scénario 2 comme scénario de référence car aucun menu bois n'y est prélevé. Pour un gain en biomasse sur toute la durée de l'itinéraire, nous regardons le surcoût en éléments minéraux. Les tendances observées précédemment sont confirmées : le surcoût en azote et en phosphore est très important, il parait moindre pour le potassium, le calcium et le magnésium. Toutefois 20-25 % d'exportation en plus pour ces minéraux ne sont pas négligeables car de nombreux sols forestiers sont déjà carencés pour ces éléments.

Tableau 5 : Exportations minérales relatives par rapport à un scenario de référence, Ban d'Harol

Scénario	Biomasse	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnesium
1	21,1%	54,8%	47,4%	19,3%	27,0%	24,3%
3	8,8%	22,7%	19,6%	8,0%	11,3%	10,1%

iii. Compensation par apports de cendres

Nous venons d'approcher les exportations de minéralomasse supplémentaires si nous décidons de commercialiser les menus bois. Nous admettons que les minéraux exportés peuvent avoir une incidence sur la fertilité du site, (Bonneau 1995). Bien que l'amendement ne soit pas fréquent en écosystème forestier, cette option est envisagée en tant que remédiation. Dans le cadre du projet RESPIRE, un volet traite des amendements compensatoires post-prélèvement de menus bois. Ce dernier est particulier, au lieu d'avoir recours aux intrants agricoles communs ou à des amendements calco-magnésiens classiques, on envisage d'épandre des cendres issues de chaufferies bois. Encore une fois, le scénario 2 fait office de référence, (cf. tableau 6). Il n'y a pas d'amendement avec cette hypothèse de prélèvement car il n'y a aucune exportation de menus bois à compenser.

Tableau 6 : Compensation des exportations de menus bois par apport de cendres

Scénario	Biomasse (tonne/ha)	Phosphore (kg/ha)	Potassium (kg/ha)	Calcium (kg/ha)	Magnesium (kg/ha)
1	124	33	219	188	32
3	52	14	91	79	13

Claudine Richter, directrice adjointe du département RDI et basée à Fontainebleau, apporte son expertise sur les cendres. Elle se base sur les calculs d'amendements compensatoires nets, calculés avec l'aide de nos résultats. Elle étudie également la faisabilité d'une économie circulaire entre forêts et chaufferies bois.

3. Analyse de sensibilité aux variations de fertilité

Lors des bilans de minéralomasse, nous avons calculé des quantités de minéraux sortants du système si nous décidons d'intensifier les prélèvements en forêts. Bien que nous ne sommes pas capables d'établir une corrélation entre la fertilité et la quantité d'éléments minéraux dans le sol, nous admettons qu'un appauvrissement du sol entraine une diminution de la fertilité. Nous faisons donc ici, une analyse de sensibilité aux variations de fertilité.

a. Variation de fertilité

Ce travail a été effectué sur tous les peuplements de hêtre et de chêne. Nous allons présenter plus précisément le site de Ban d'Harol, car c'est sur ce dernier que les exportations minérales ont été quantifiées.

La fertilité d'une station forestière correspond à la capacité d'un terrain à favoriser le développement d'une essence donnée. Elle est généralement le fruit des conditions pédoclimatiques. Pour une majorité des essences communes en France, telles que le hêtre, on caractérise la fertilité d'une station par la hauteur dominante du peuplement à l'âge de 100 ans. De nombreux modèles délimitent des faisceaux de fertilité en fonction de zones géographiques. Nous nous sommes basés sur ceux de Jean-Daniel Bontemps, 2006.

Afin de faire varier la fertilité sur une gamme allant de -10% à +10%, nous avons suivi le processus énoncé sur la figure 21. On choisit de garder la même distribution d'inventaire. La distribution est plus fortement corrélée à la hauteur dominante. C'est pourquoi nous avons souhaité garder cette hauteur

dominante proche de la hauteur initiale et c'est au niveau de l'âge que nous avons appliqué les plus grandes variations.

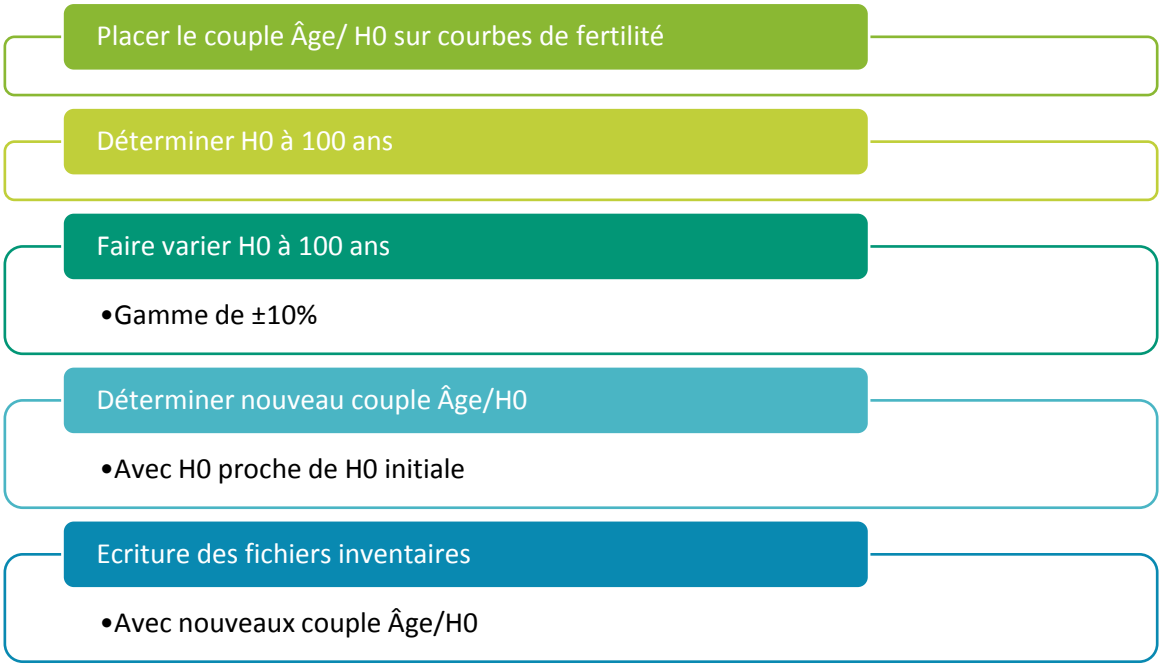


Figure 22: Processus de variation de fertilité

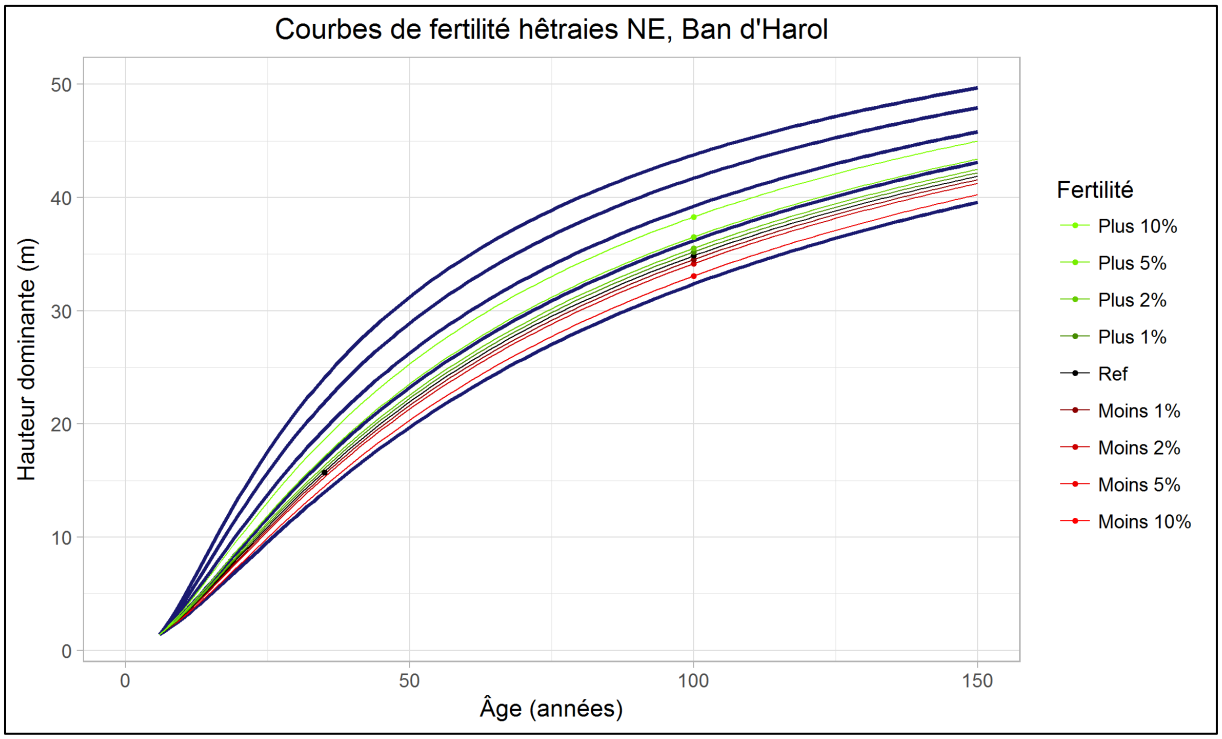


Figure 21 : Courbe de fertilité hêtre, Nord-est

Sur la figure 22, on voit comment les variations de fertilité se matérialisent. La courbe de référence, en noire, correspond au couple Age/H0 qui est mesuré sur le terrain. Les variations de la fertilité ont pour effet de déplacer cette courbe vers le haut ou vers le bas. Même si la courbe « Moins 10% » apparait dans la légende, cette dernière n'a pas pu être déterminée car elle renvoyait une hauteur à 100 ans plus faible que la fertilité minimale.

b. Résultats et analyses

Pour chaque inventaire correspondant à une fertilité modifiée, nous avons simulé l'itinéraire avec la même méthodologie que celle appliquée aux sites MOS. Nous avons également gardé le même itinéraire sylvicole que pour la simulation sans variation de fertilité. Les interventions se déclenchent en fonction de la hauteur dominante, la pertinence de ces dernières n'est pas remise en cause par les variations de fertilité. Les durées de rotation sont légèrement raccourcies ou augmentées selon la fertilité effective. On voit sur la figure 23, qu'une variation de 5 % de la fertilité peut augmenter ou réduire la durée de la révolution de près de 10 ans. Evidemment, une telle variation de fertilité est surestimée si l'on enlève quelques rémanents lors de l'exploitation. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que les écosystèmes forestiers sont dépendants des cycles géochimiques et qu'un dérèglement trop important de ces cycles peut avoir un effet néfaste.

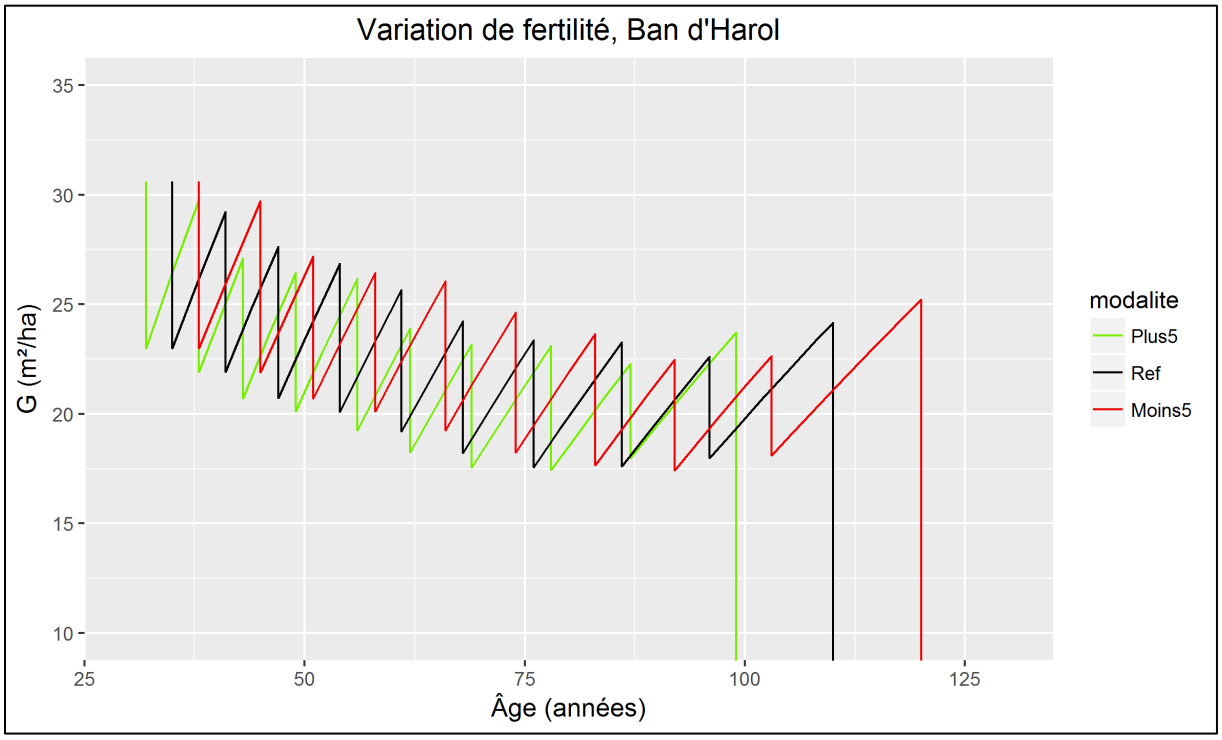


Figure 23: Variation de la production selon la fertilité, Ban d'Harol

Le projet RESPIRE ne s'arrête pas aux simulations de peuplements forestiers. Le calcul des exportations de minéralomasse et des compensations par apport de cendres aboutira à tout un volet de faisabilité technique et économique. Les simulations avec variation de fertilité connaîtront également une suite. Les données issues de ces dernières sont transmises à Hanitra Rakatoarison, membre du pôle RDI de Fontainebleau. Elles serviront de base pour des analyses économiques.

Toutes ces simulations sur le réseau MOS ont permis de générer de nombreuses données alimentant différents volets du projet RESPIRE. Les différents modèles utilisés permettent d'estimer les exportations de minéraux sur toute une révolution. Les premières mesures recueillies sur le terrain ont été analysées par Emila Akroume et confirme l'ordre de grandeur des valeurs estimées. A terme tout ce travail permettra d'avoir du recul sur les questions d'exportation des menus bois en forêt et

les amendements par apport de cendres. Ce retour d'expérience sera cristallisé par un certain nombre de modification du guide Ademe, Récolte raisonnée des rémanents en forêts, (Cacot et al., 2006).

Enfin tout le travail réalisé dans le cadre du projet RESPIRE nous a doté d'un nouvel outil grâce à l'enchainement d'un modèle de croissance avec un modèle de minéralomasse. Cet outil peut être repris dans le cadre d'autres travaux tels que des analyses multicritères sur toute une gamme d'itinéraires sylvicoles.

III. Une utilisation théorique : Réalisation d'une gamme d'itinéraires sylvicoles douglas

Le guide de sylviculture, douglasaies françaises, (Angelier et al., 2007), a été construit avec l'aide du modèle de croissance *Simcop* en 2007 puis modifié avec le modèle *FCBA Pseudotsuga menziesii en 2012*. A cette époque, les travaux de recherche sur les exportations minérales et le carbone n'étaient pas autant avancés. C'est pourquoi, le guide de sylviculture reposait principalement sur une optimisation économique mêlée aux contraintes sylvicoles du moment.

Lorsque le guide a été rédigé, les forestiers cherchaient à diminuer au maximum les investissements liés à la plantation. Le premier facteur impacté par cette tendance est la densité de plantation. Le guide préconisait d'abaisser cette densité de plantation de 1600 tiges par hectare à 1200 tiges par hectare. De plus, le douglas est une essence dont la croissance est particulièrement forte. Si le suivi n'est pas rigoureux aux abords de la première éclaircie, on risque de prendre du retard très rapidement. Afin de s'adapter aux peuplements que l'on observe sur le terrain, le guide propose des itinéraires correspondant à des entrées en sylviculture pour des hauteurs dominantes différentes.

Le contexte de l'époque justifie les choix qui ont été réalisés lors de la rédaction du guide. Aujourd'hui, on commence à renouveler un certain nombre de peuplements, car ils sont arrivés à terme de leur première révolution. La régénération naturelle offre la possibilité d'avoir des peuplements de départs plus denses que ceux issus de plantation. De plus, l'autécologie du douglas est désormais mieux connue du gestionnaire qui n'est plus surpris par sa forte croissance comme dans le passé. En parallèle, le sylviculteur a pris conscience de l'importance de préserver les sols forestiers, (Cacot et al., 2006), et le grand public fait preuve d'une grande défiance à l'égard des coupes de régénération suivies de plantation.

Avec un modèle de croissance, on simule l'évolution d'un peuplement de façon bien plus flexible qu'avec des tables de production. De plus, il est aisé d'extraire des données à l'issu des simulations. Ces dernières peuvent alors servir de base à une analyse économique ou minéralogique. Le contexte changeant et les méthodes d'analyse évoluant, nous proposons d'établir une gamme d'itinéraires sylvicoles.

1. Création de nouveaux itinéraires sylvicoles

On cherche à créer des itinéraires sylvicoles variés et étudier s'ils répondent correctement aux problématiques actuelles. Il convient dans un premier temps d'identifier les variables qui vont orienter la stratégie de l'itinéraire. Dès lors, nous devrons établir des peuplements initiaux pour nos simulations. Ces derniers devront être réalistes. Enfin, on simulera différentes sylvicultures avec un regard technique critique.

a. Identification des variables stratégiques

Un itinéraire sylvicole dépend du peuplement que l'on a au départ et de nos objectifs. A l'Office National des Forêts, l'objectif principal d'une forêt de douglas est la production de bois d'œuvre de qualité, entrainant une balance économique positive. Le sylviculteur devra composer avec un certain nombre de variables qui impacteront fortement l'orientation de l'itinéraire. Nous avons réalisé un atelier de réflexions afin d'identifier les variables les plus influentes, (cf. figure 24).

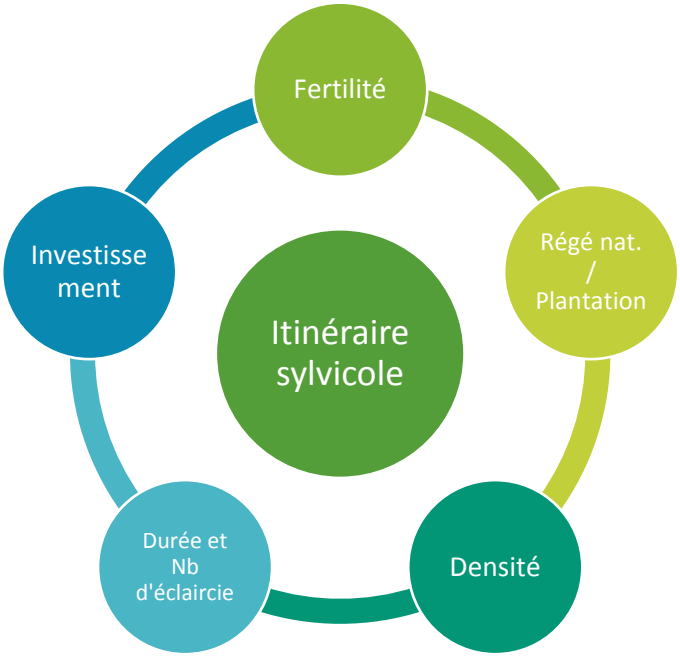


Figure 24 : Variables influant sur un itinéraire sylvicole

La fertilité est un élément sur lequel le sylviculteur ne peut pas agir. Une fois que ce dernier a réalisé le diagnostic stationnel et pris la décision d'implanter du douglas, il devra composer avec la fertilité de son terrain. Nous avons choisi de fixer ce critère car il est davantage subi que contrôlé. Afin de nous placer dans la configuration la plus standard, la fertilité retenue pour nos simulations est la fertilité 2.

Sur les peuplements de seconde révolution, le sylviculteur a le choix sur la méthode de régénération. Il peut opter pour une plantation, auquel cas il réalise souvent un travail du sol et une sélection de provenance. La seconde option est de réaliser un dépressage des semis qui se seraient installés sous le couvert. Nous avons choisi de favoriser cette option dans le cadre de nos itinéraires. En effet, lorsque les semenciers sont de bonne qualité et les semis bien installés, il est préférable de valoriser la régénération acquise. On simulera donc des peuplements issus de régénération naturelle.

La densité est fortement dépendante de la méthode de régénération. Lorsque l'on choisit la plantation, le guide préconisait 1200 plants/ha. L'élément le plus restrictif est le prix de l'opération, on peut néanmoins planter à 1600 plants/ha. En cas de seconde révolution et de régénération naturelle réussie, on peut atteindre 5000-6000 semis/ha. Par une opération de dépressage, on contrôle la densité de départ de notre itinéraire. N'ayant plus à payer la fourniture des plants et la plantation, il peut être intéressant de partir sur une densité de départ plus haute que par régénération artificielle. La densité de départ va fortement influer sur la suite de l'itinéraire et l'opportunité de régénérer naturellement les peuplements de douglas est un sujet d'actualité. Dans le cadre de notre gamme d'itinéraires sylvicoles, nous allons faire varier ce facteur.

La fréquence des interventions est un autre élément très influant sur un itinéraire sylvicole. On peut choisir de s'orienter sur des itinéraires très dynamiques, plutôt courts et avec un minimum d'interventions et prélevant à chaque fois un gros volume. A l'opposé, on peut envisager de faire des itinéraires plutôt longs. Auquel cas, on prélève peu de tiges lors de chaque intervention. Il convient toutefois d'exploiter des volumes suffisamment importants pour que la coupe soit commercialisable. En plus de la densité, nous avons choisi de faire varier la durée et le nombre d'interventions sur notre gamme d'itinéraires sylvicoles.

Enfin, il est envisageable de réaliser des investissements en cours d'itinéraire. Par exemple, on peut choisir d'élaguer des tiges à fort potentiel et espérer mieux valoriser le bois produit par ces individus. A ce jour, nous ne sommes pas capables de simuler la gestion de la qualité avec les modèles de croissance. De plus, l'élagage est un facteur qui influe particulièrement sur la performance économique d'un itinéraire mais ne bouleversera pas les fréquences de rotation. Nous avons choisi de ne pas faire varier ce facteur pour établir notre gamme d'itinéraires. Toutefois, il serait intéressant de regarder la rentabilité d'une opération d'élagage sur les itinéraires les plus longs.

b. Créations des peuplements initiaux

Les itinéraires que nous avons créés l'ont été avec l'aide du modèle de croissance *Gymnos* importé dans *Sydy*. De nombreuses simulations ont été effectuées avant d'aboutir aux itinéraires sylvicoles qui seront présentés par la suite. Cependant, il convient d'avoir à notre disposition des peuplements initiaux avant de commencer toute simulation. Dans le cadre de notre étude, nous avions besoin de peuplements virtuels sur des stations de fertilité 2 et pour trois densités différentes, 1100 tiges/ha, 1600 tiges/ha et 2000 tiges/ha.

Il est très délicat de créer un peuplement virtuel de douglas. De plus, s'il est aisé d'observer des peuplements de 1100 tiges/ha ou 1600 tiges/ha, les peuplements avec une densité de 2000 tiges/ha sont particulièrement rares. Le travail de création de peuplement virtuel a déjà été réalisé dans le cadre de projets analysant les performances économiques de plantations résineuses, (Rakatoarison et al.). Nous avons repris les mêmes peuplements de départ pour une fertilité 2, (cf. tableau 7 et figure 25).

Pour chacun de ces peuplements en plein, nous créons aléatoirement des tiges tout en respectant la répartition des effectifs par classe de diamètre. A ces informations, nous ajoutons le couple âge = 35ans / hauteur dominante = 26m. Les simulations à venir ont lieu à partir de ces trois peuplements.

Tableau 7 : Inventaires en plein peuplements virtuels

Densité (tiges/ha)	Classe de diamètre (cm)					
	5	10	15	20	25	30
1100	8	159	516	354	60	3
1600	30	428	863	267	12	0
2000	61	761	1019	156	3	0

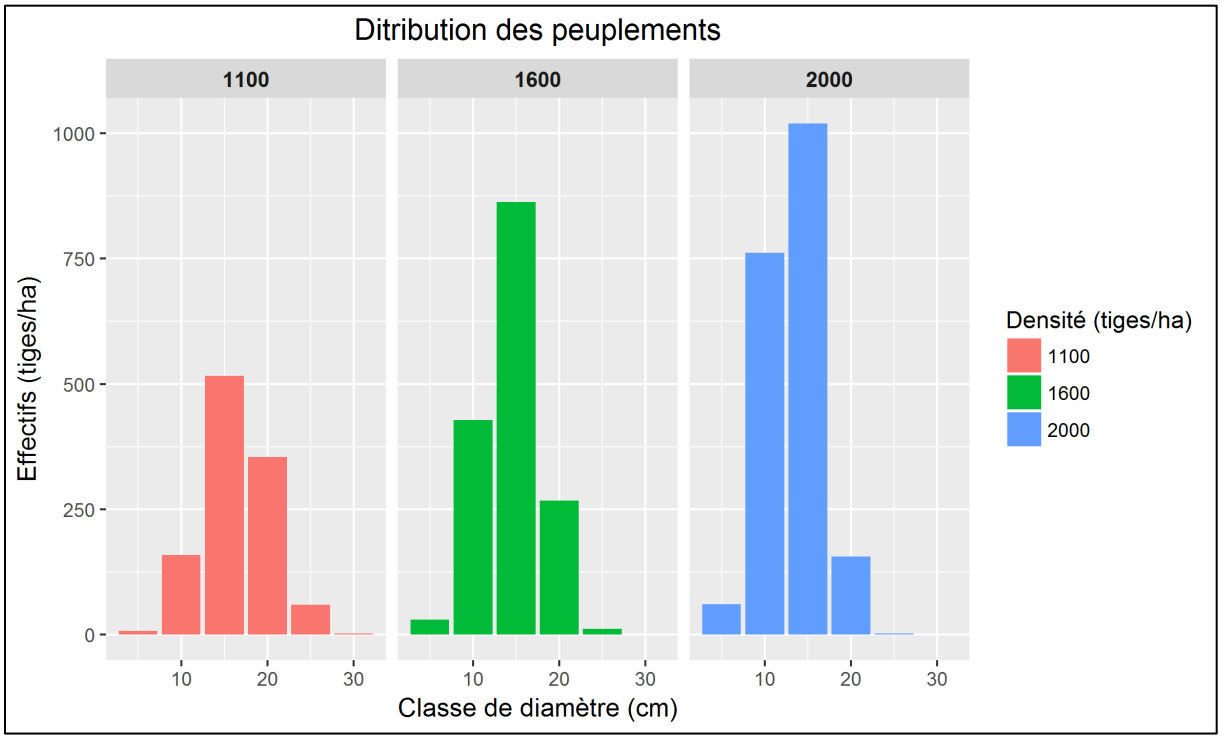


Figure 25: Distribution des peuplements initiaux

c. Choix des itinéraires sylvicoles

Nous avons passé en revue les différents critères influents sur les orientations sylvicoles. Nous avons choisi principalement de faire varier la densité de départ ainsi que la durée des révolutions pour une fertilité 2. Finalement, nous avons retenu 5 itinéraires différents.

Le premier itinéraire est notre référence, présent dans le guide de sylviculture douglasaies françaises, pour une entrée en sylviculture à 17-18m. La densité de départ est de 1100 tiges/ha. Cela correspond à une plantation à 1200 plants/ha avec une mortalité réaliste et raisonnable. Si la densité de base de base est plus importante il est tout à fait possible de rattraper cet itinéraire dès la première ou la deuxième intervention. On maintient un niveau de capital inférieur à 40 m²/ha, et l'itinéraire s'étale sur 70 ans.

Ensuite, nous avons créé deux itinéraires longs. Cette fois ci, la densité de base est respectivement de 1600 tiges/ha et 2000 tiges/ha, (cf. figure 26). Ces itinéraires suivent globalement le même raisonnement sylvicole. Lors des trois premières éclaircies, la hauteur dominante du peuplement est inférieure à 25m. On s'autorise alors à prélever 30-35 % du capital sur pied afin de ne pas contraindre la croissance des tiges lors des premiers stades. Ensuite, la production des peuplements s'intensifie et on laisse capitaliser en ne prélevant que 6 à 7 m²/ha de surface terrière

lors de chaque intervention. On essaie de ne pas dépasser 45m²/ha de surface terrière tout en maintenant le même niveau de prélèvement, (cf. figure 27). Ces contraintes fixent finalement la rotation entre deux coupes à 7 ans. C'est une durée plutôt courte mais il est difficile de l'augmenter sur une essence à croissance aussi forte que le douglas. Finalement, l'itinéraire à 1600 tiges/ha s'étale sur 85 ans, celui à 2000 tiges/ha dure de 93 ans.

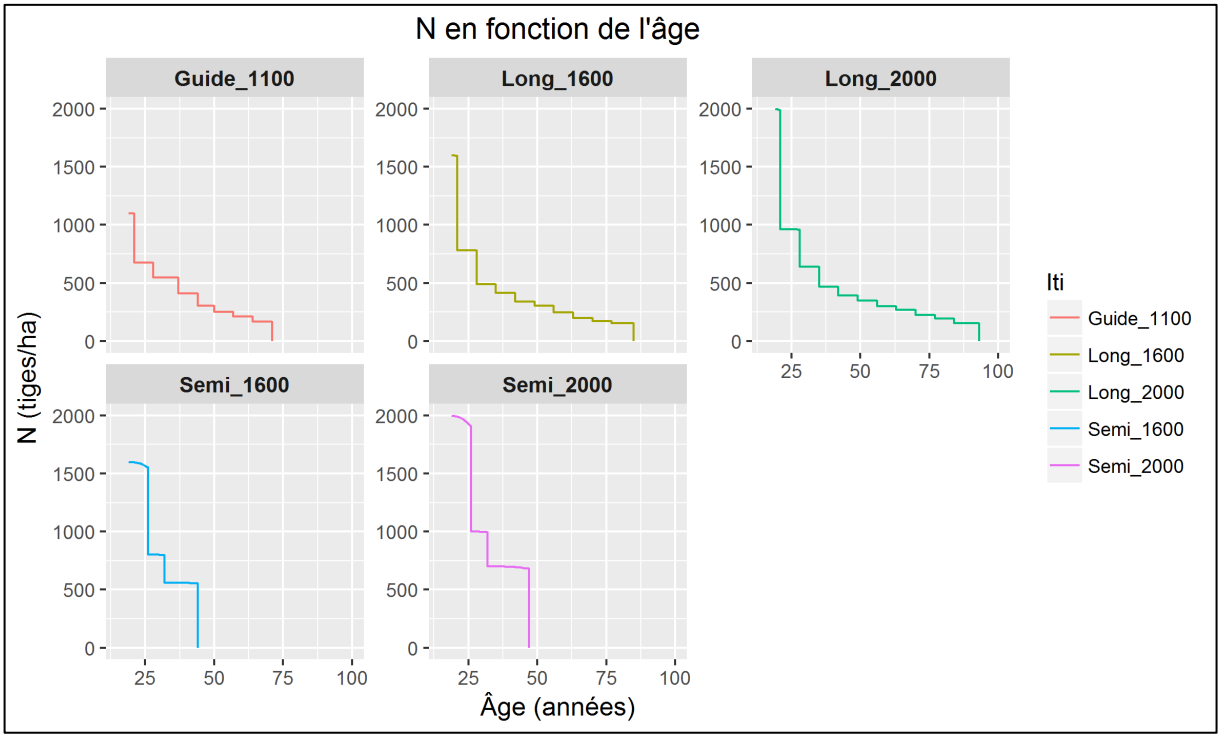


Figure 27 : Nombre de tiges par hectare, itinéraires sylvicoles douglas

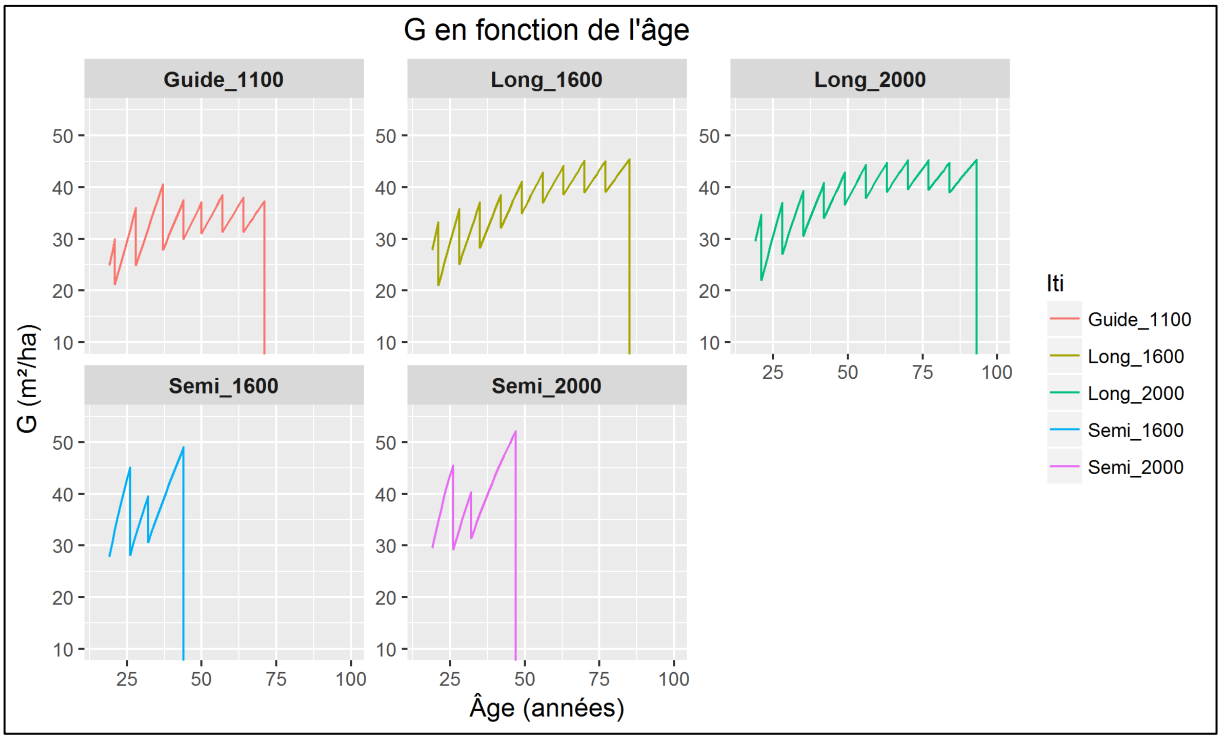


Figure 26: Surface terrière par hectare, itinéraire sylvicole douglas

En opposition aux itinéraires longs, nous avons simulé l'évolution de deux itinéraires semi-dédiés à la production de biomasse. Ces deux itinéraires ont également des densités de départ de 1600 tiges/ha et 2000 tiges/ha. Dans un premier temps, ils subissent deux interventions très intenses, la première pour une hauteur dominante de 20m et la seconde pour une hauteur dominante de 24m. Ensuite, on attend que le diamètre dominant atteigne 45 cm avant de réaliser la coupe définitive.

L'indice de densité relative (RDI), nous indique si la densité de nos peuplements est trop forte. On peut visualiser la position de nos simulations par rapport à des droites d'auto-éclaircie. Si nous sommes au-delà d'une de ces droites, il y a probablement de la mortalité au sein de nos peuplements (Bailly et al., 1997). Il existe de nombreuses équations pour les droites d'auto-éclaircies, nous en avons retenus deux, (cf. figure 28). Pour l'intégralité de nos simulations, nous sommes en dessous de ces droites d'auto-éclaircie. Cela ne garantit pas une absence totale de mortalité mais cette dernière ne sera pas due à une densité trop importante au sein de nos peuplements. De plus, ces résultats nous indiquent que nous sommes dans une gamme de densités plausibles dans la gamme de fiabilité des modèles de croissance.

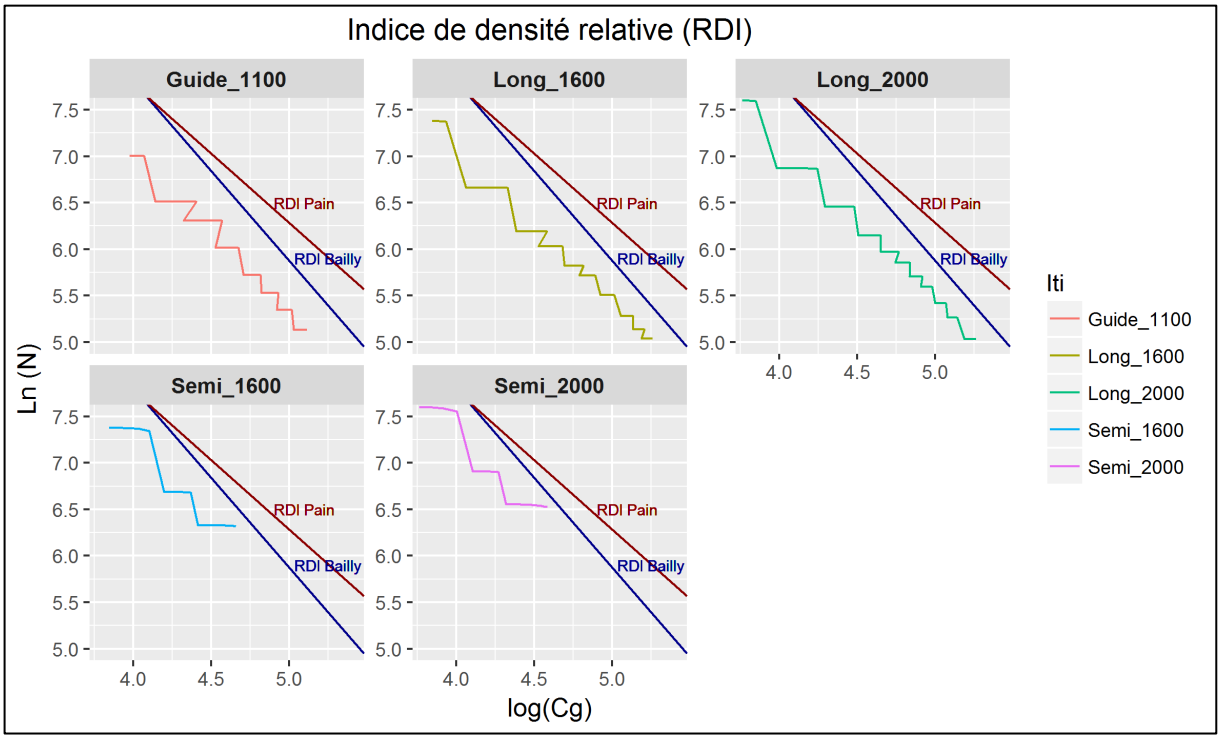


Figure 28 : Droites auto-éclaircies, itinéraires douglas

2. Analyse multicritère des itinéraires

Sur Capsis, nous avons appliqué les itinéraires sylvicoles fraichement créés à nos peuplements virtuels initiaux. Point fort des modèles de croissance, nous pouvons exporter les données dendrométriques relatives à nos simulations. A partir de ces nombreuses métriques, nous pouvons étudier la production, calculer la rentabilité économique, effectuer des bilans de minéralomasse et calculer la séquestration de carbone.

a. Rentabilité économique

Dans un premier temps, nous regardons la rentabilité économique des itinéraires que nous avons simulés. En effet, c'est un des critères de choix le plus important pour un itinéraire sylvicole. Afin de mener à bien cette tâche, nous utilisons le module *Economics* de la plateforme *Capsis*. Ce module a un fonctionnement particulièrement simple. D'un côté, on importe un fichier « dendrofile ». Ce fichier regroupe les données relatives à toutes les éclaircies qui ont lieu au cours de la vie du peuplement. C'est-à-dire année d'intervention, volume prélevé et volume unitaire moyen. D'un autre côté, on importe un fichier « IncomeCosts ». Ce fichier regroupe toutes les dépenses réalisées au fil du cycle, ainsi qu'une mercuriale de prix. N'ayant pas le temps de calculer une mercuriale en fonction du marché actuel, nous avons repris les courbes de prix établies dans le cadre du projet ICIF, (Rakatoarison et al., 2015). Cette dernière correspondait à l'équation suivante :

$$Pu = 57.79 \times (1 - e^{-1.31 \times Vu - 0.08})$$

Cette équation est à l'origine de la courbe sur la figure 29, on observe très bien l'asymptote de prix. En effet, pour le douglas, il existe un seuil après lequel le prix unitaire cesse de croître lorsque le volume unitaire augmente. C'est la conséquence des besoins de la première transformation qui préfère des bois de plus faible diamètre, rentrant dans les lignes de sciage de type canter, (Chopard et al., 2016). Dans le cadre de nos simulations, cela induit que les gros bois et les très gros bois ne sont pas mieux valorisés que les bois moyens et que le gain en valeur des tiges est principalement dû au gain en volume.

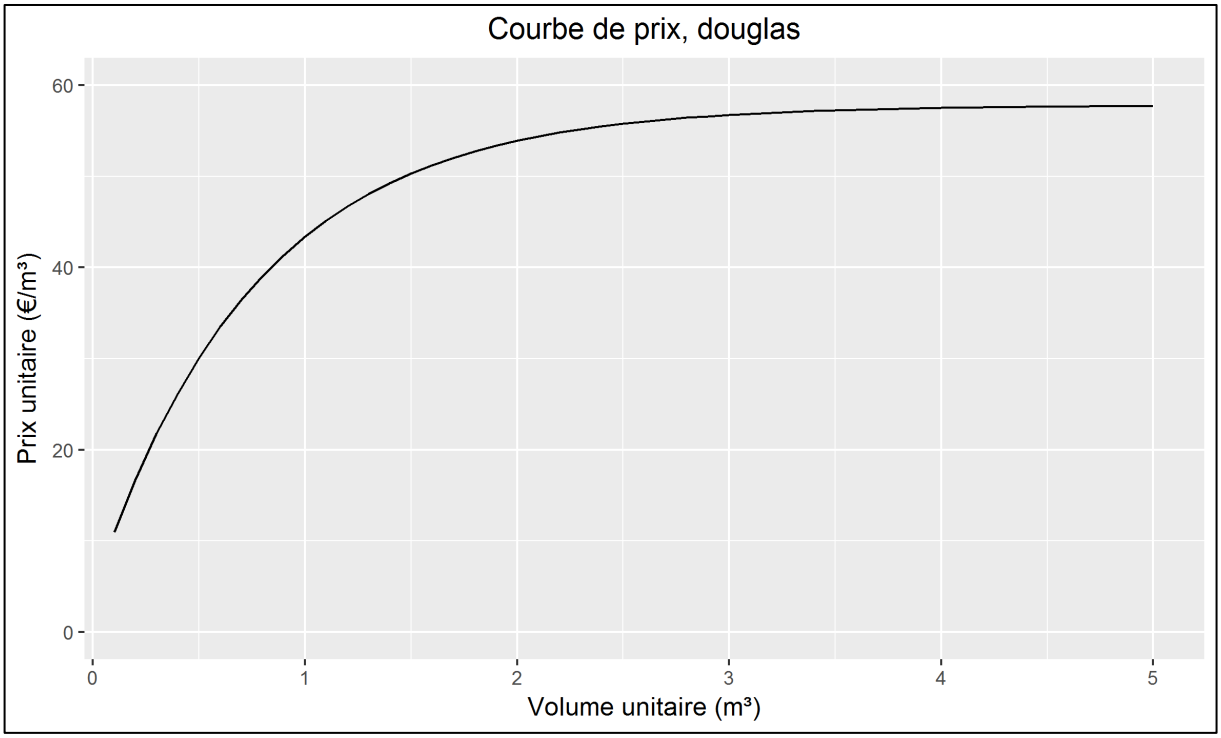


Figure 29 : Courbe de prix, douglas

Le module *Economics* réalise une actualisation des recettes et des dépenses de chaque itinéraire sylvicole. En actualisant recettes et dépense, on obtient un bénéfice actualisé en séquence infinie, BASI0 et un taux de rentabilité interne, TIR. Ces deux indicateurs objectifs nous permettent d'appréhender la performance économique de chaque itinéraire, (cf. tableau 8). L'itinéraire du guide

a été décliné en deux modalités différentes, plantation et régénération naturelle. Dans la première modalité, les dépenses initiales sont liées au travail du sol, à la fourniture des plants, leur mise en place, ainsi que plusieurs dégagements lors des premières années. Dans la seconde modalité, sur régénération naturelle acquise, il y a uniquement un dépressage ainsi que l'ouverture des cloisonnements sylvicoles lors des premières années, (cf. tableau 9). En comparant uniquement ces deux modalités, on met en évidence que la performance économique de la régénération naturelle, est nettement meilleure que celle de la plantation car les investissements sont moindres les premières années.

Tableau 8 : Performance économique, itinéraire douglas

Itinéraire sylvicole	BASI (€)	TIR (%)
Guide_1100_Plantation	6708	5,0%
Guide_1100_RN	8730	7,0%
Long_1600_RN	8089	6,5%
Long_2000_RN	7364	6,1%
Semi_1600_RN	7478	7,0%
Semi_2000_RN	6937	6,6%

Tableau 9 : Dépenses liées aux travaux de régénération

Plantation			Régénération naturelle		
Année	**Description**	**Dépense**	**Année**	**Description**	**Dépense**
0	Préparation terrain	400	0	Broyage cloisonnement	300
0	Fourniture des plants	660	9	Dépressage	1200
0	Mise en place des plants	770			
1	Dégagement	720			
3	Dégagement	360			
6	Nettoiement	436			
Total actualisé		**3 224 €**	**Total actualisé**		**1 220 €**

Un tel constat a été anticipé, c'est pourquoi nous avons favorisé la régénération naturelle à la plantation. De plus, l'étape de dépressage est indispensable en cas de régénération naturelle, néanmoins il n'est pas indispensable d'abaisser la densité à 1100 tiges par hectare lors de cette opération. C'est pourquoi, nous avions décidé de tester des densités plus importantes que celles pratiquées lors des plantations traditionnelles.

Désormais, on s'intéresse uniquement à la performance économique des itinéraires avec une régénération naturelle. Si l'on se réfère au taux de rentabilité interne, il en ressort que l'itinéraire préconisé par le guide de sylviculture, ainsi que l'itinéraire semi-dédié, sont les plus performants. Globalement les itinéraires sont classés dans l'ordre suivant, guide, semi-dédiés puis long. Si l'on se réfère au BASI0, l'itinéraire préconisé par le guide est toujours le plus performant. En revanche, les itinéraires longs présentent un BASI0 équivalent ou plus élevé que les itinéraires semis-dédiés. L'itinéraire suivant le guide de sylviculture est donc indiscutablement l'itinéraire le plus performant si l'on regarde uniquement l'aspect économique. En revanche, il est difficile de trancher entre les itinéraires longs et semi-dédiés.

L'étude économique met en évidence un dernier point intéressant. La performance économique, BASI plus taux de rentabilité interne, est meilleur lorsque la densité est de 1600 tiges par hectare au lieu de 2000 tiges par hectare. Ce résultat nous permet de tirer la conclusion suivante. Il n'est pas nécessaire de maximiser la densité après l'opération de dépressage car cela ne se traduit pas par une amélioration de la performance économique du système.

Les résultats économiques paraissent très performants. En effet, les modèles de croissance reposent sur des placettes parfaitement pleines. En conditions réelles, il convient d'employer des coefficients de 0.85 ou 0.9 afin de prendre en compte les trouées et effets de bordure.

b. Production

En décembre 2014, l'Office national des forêts, en tant que membre de France Bois Forêt, s'est engagé dans le contrat de filière bois. Dans ce document, l'utilité publique de la mobilisation de bois est mentionnée et les signataires s'engagent à sécuriser les approvisionnements en matière ligneuse. Dans le cadre de cet engagement, il est tout à fait légitime de privilégier un itinéraire produisant davantage de bois si ce dernier maintient une performance économique raisonnable. Nous venons d'étudier la performance économique pour toute notre gamme d'itinéraires sylvicoles. Bien qu'il y ait quelques écarts, ces derniers sont tout à fait acceptables. Désormais, nous cherchons à qualifier la capacité des itinéraires à alimenter correctement les filières de transformation de la matière ligneuse.

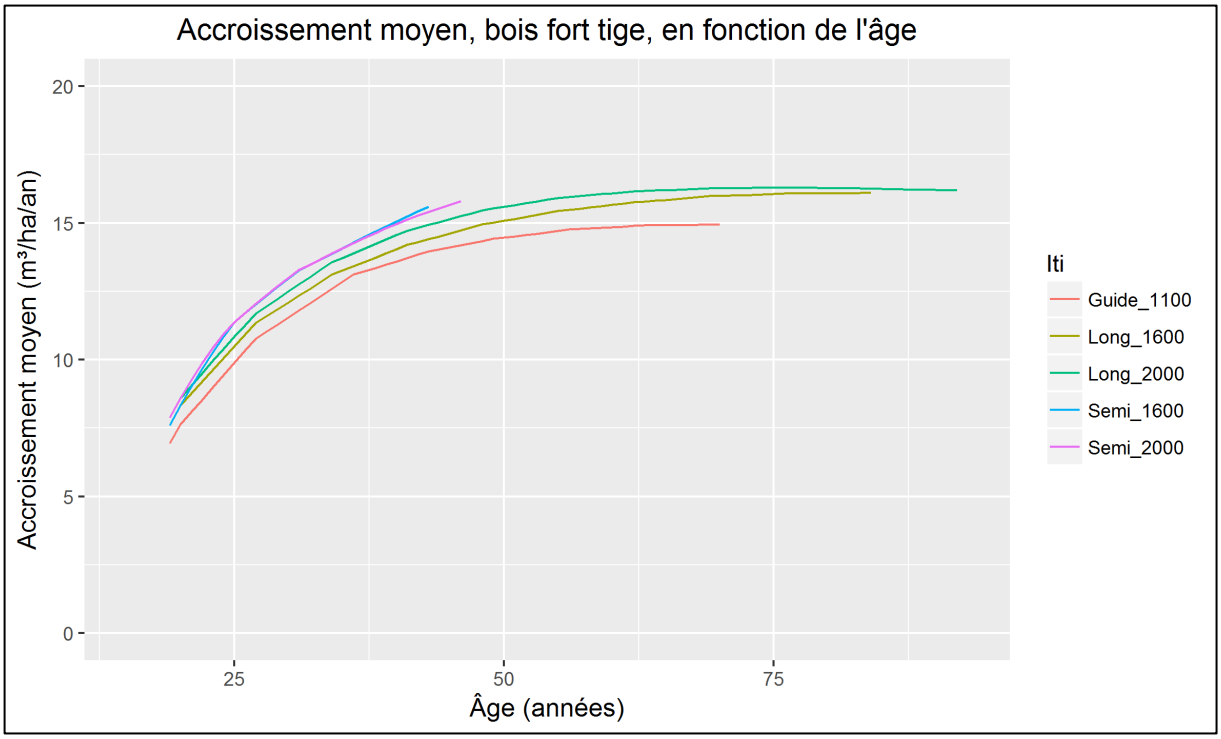


Figure 30: Accroissement moyen par itinéraire sylvicole

L'accroissement moyen est la variable dendrométrique qui caractérise au mieux la capacité d'un itinéraire à approvisionner la filière bois, (cf. figure 30). L'accroissement moyen correspond au nombre de mètres cubes produits en moyenne chaque année par le peuplement. L'intérêt de la filière bois est que sa valeur soit maximale. C'est le cas pour les itinéraires longs et semis dédiés. En effet, à la fin du cycle, tous ces itinéraires ont des valeurs d'accroissement moyen aux alentours de 16m³/ha/an de bois

fort tige. Celui préconisé par le guide a une valeur d'accroissement moyen un peu plus faible de 15m³/ha/an. Ces résultats sont obtenus en prenant en compte uniquement le bois fort tige. C'est-à-dire le bois contenu dans la tige avec un diamètre de découpe supérieur à 7 cm. Cette fois encore, les résultats obtenus peuvent paraitre élevés par rapport à des observations *in situ*. Nous rappelons que les modèles de croissances sont calibrés avec des placettes expérimentales sans trouées ni effet de bordure. Dans des conditions plus classiques, il est fréquent d'observer des valeurs de production moindres de 10 à 15%.

La valeur de l'accroissement moyen donne une indication sur la capacité des itinéraires à produire de la matière ligneuse. Cependant on ne connait pas la qualité des produits ainsi que leur utilisation en bois d'œuvre, bois d'industrie ou bien bois énergie. En s'intéressant au diamètre quadratique moyen du peuplement, (cf. figure 31), nous pouvons avoir une vague idée des débouchés du bois exploité.

Nous n'avons pas à notre disposition des modèles de qualité de bois. Il serait intéressant d'avoir des chiffres précis sur la répartition BO/BI/BE lors des exploitations en fonction de la sylviculture menée sur le terrain. A défaut de modèle précis, on peut s'attendre à avoir une majorité de BI/BE dans les lots de bois des itinéraires semis dédiés. Cela induit que la part de bois d'œuvre est plutôt faible pour ces itinéraires.

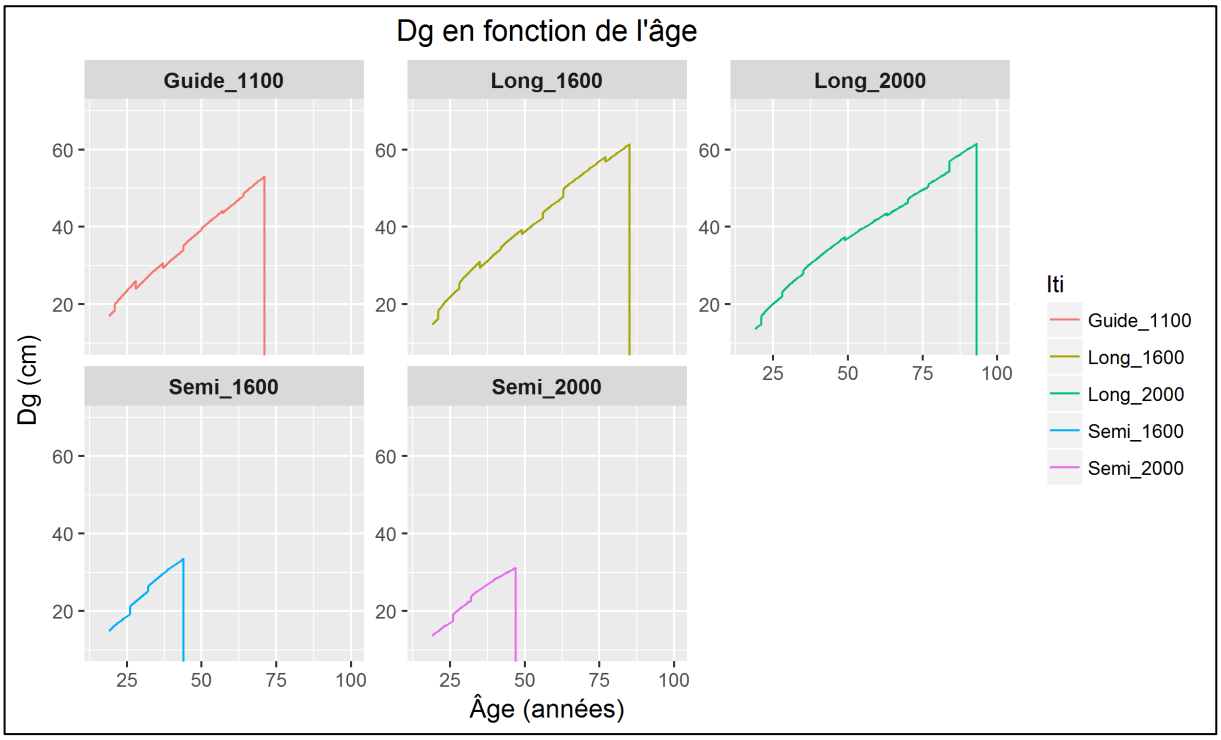


Figure 31 : Diamètre quadratique moyen des peuplements selon les itinéraires sylvicoles

Sur l'itinéraire préconisé par le guide de sylviculture, comme pour les itinéraires longs, on a une majorité de BI/BE lors des premières interventions. Au fur et à mesure des éclaircies, la part de bois d'œuvre augmente au sein des lots exploités. Ces itinéraires ont le mérite d'assurer une production de bois plus diversifiée que les itinéraires semis dédiés. Toutefois, on peut émettre des réserves pour les itinéraires les plus longs. Lors des dernières interventions le diamètre quadratique moyen s'approche de 60 cm. Il y a donc une proportion de tige non négligeable dont le diamètre est supérieur à cette

valeur. A ce jour, les bois avec de tels diamètres ne sont pas prisés par les scieurs, (Chopard et al., 2016), car ils sont trop gros pour les lignes de sciage de type canter. On peut légitiment s'interroger sur la pertinence de produire des bois de gros diamètre alors qu'ils sont difficilement assimilables par la filière à ce jour. Toutefois les besoins de cette dernière continueront d'évoluer au fil des années.

c. Biomasse et minéralomasse

Le travail réalisé dans le cadre des projets RESPIRE et GERBOISE nous ont apporté les moyens techniques de calculer les quantités de minéraux exportés sur toute la durée d'une révolution. Ces nouveaux outils permettent d'intégrer la minéralomasse à notre analyse multicritère. Dans le cadre de notre étude, nous avons envisagé uniquement un seul scénario de récolte, celui ou aucun menus bois n'est récolté lors des différentes interventions. D'une part, c'est le mode de récolte le plus répandu pour du douglas. D'autre part, les volumes de menus bois sont plutôt faibles pour cette essence et une récolte de ces derniers ne constitueraient pas un gain économique conséquent.

i. Coûts de la biomasse

Dans un premier temps, on a calculé le coût minéralogique de la biomasse. Nous savons que plus le compartiment de bois est petit, plus il est concentré en élément minéraux. Etant donné que les produits bois fabriqués selon les différents itinéraires sont très variés, on peut s'attendre à des écarts sur les concentrations en minéraux. Afin de comparer au mieux les itinéraires entre eux, on a calculé le coût par tonne de biomasse récoltée par ha pour chaque itinéraire, (cf. tableau 10).

Tableau 10: Exportations minérales absolues de la biomasse selon itinéraire

Itinéraire	Azote (kg/tonne de biomasse)	Phosphore (kg/tonne de biomasse)	Potassium (kg/tonne de biomasse)	Calcium (kg/tonne de biomasse)	Magnesium (kg/tonne de biomasse)
Guide_1100	1,61	0,11	1,59	2,47	0,32
Long_1600	1,60	0,11	1,59	2,47	0,31
Long_2000	1,60	0,11	1,59	2,47	0,32
Semi_1600	1,67	0,12	1,60	2,50	0,35
Semi_2000	1,68	0,12	1,60	2,50	0,36

En regardant les résultats en valeur absolu, il est difficile de mettre en évidence des différences significatives selon les itinéraires. Néanmoins, ils nous confirment que nous sommes dans une fourchette plausible, (Ponette et al.). Nous proposons de regarder les résultats en relatif par rapport à notre référence, le guide sylviculture, (cf. tableau 11).

Tableau 11 : Coût minéralogique relatif selon les itinéraires

Itinéraire	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnesium
Guide_1100	0%	0%	0%	0%	0%
Long_1600	-1%	-2%	0%	0%	-2%
Long_2000	0%	-1%	0%	0%	-2%
Semi_1600	4%	9%	1%	1%	9%
Semi_2000	4%	11%	1%	1%	11%

Sous cette forme, nous avons davantage de visibilité afin de comparer les itinéraires entre eux. Il en ressort que les itinéraires semis dédiés induisent un surcoût en azote, en phosphore et en magnésium. Ce surcoût est non négligeable, une tonne de biomasse produite avec un itinéraire semi dédié consomme 10% de phosphore en plus qu'une tonne de biomasse produite avec l'itinéraire préconisé par le guide. En ce qui concerne les résultats pour les itinéraires longs, ils sont homogènes avec l'itinéraire du guide voir même légèrement meilleures.

ii. Flux annuels

Nous venons de discuter le coût minéralogique d'une tonne de biomasse. Si aucun itinéraire ne se distingue positivement, les itinéraire semis dédiés affichent un surcoût non négligeable. Cependant, il y avait des différences dans la production moyenne des peuplements. Désormais, nous nous intéressons aux exportations annuelles selon les itinéraires. L'objectif est d'identifier les itinéraires qui sollicitent le plus la richesse chimique des sols.

Tableau 12 : Coûts annuels de la biomasse en minéralomasse selon les itinéraires

Itinéraire	Biomasse (tonnes/ha/an	Azote (kg/ha/an)	Phosphore (kg/ha/an)	Potassium (kg/ha/an)	Calcium (kg/ha/an)	Magnesium (kg/ha/an)
Guide_1100	6,55	10,56	0,74	10,42	16,19	2,10
Long_1600	7,05	11,29	0,78	11,21	17,41	2,21
Long_2000	7,09	11,38	0,79	11,28	17,52	2,23
Semi_1600	6,83	11,42	0,84	10,94	17,04	2,40
Semi_2000	6,91	11,63	0,86	11,09	17,29	2,46

Sur le tableau 12, on peut lire les flux annuels de biomasse et de minéralomasse. Si les itinéraires longs produisent annuellement plus de biomasse que l'itinéraire préconisé par le guide, ils induisent des exportations annuelles en minéraux supérieures à celles du guide. C'est ce dernier itinéraire qui a l'impact le plus faible sur les sols forestiers en termes d'exportation minérale. Toutefois, si les autres itinéraires prélèvent annuellement plus de biomasse, on se demande si le gain en production de biomasse compense le surplus d'exportation de minéralomasse. Encore une fois, nous allons comparer relativement les itinéraires avec celui préconisé par le guide de sylviculture, (cf. tableau 13).

Tableau 13 : Flux annuels relatifs de biomasse et minéralomasse selon les itinéraires

Itinéraire	Biomasse	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnesium
Guide_1100	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Long_1600	8%	7%	6%	8%	8%	5%
Long_2000	8%	8%	7%	8%	8%	6%
Semi_1600	4%	8%	14%	5%	5%	14%
Semi_2000	6%	10%	17%	6%	7%	17%

Ces résultats font résonnance avec ceux relatifs à la production, ainsi que ceux relatifs au coût minéralogique de la biomasse. Les itinéraires longs produisent annuellement plus de biomasse que l'itinéraire préconisé par le guide de sylviculture. Toutefois, on voit sur le tableau 12, que le surcoût annuel en minéralomasse est équivalent au gain en biomasse, c'est-à-dire environ 8%. Ce résultat est expliqué par l'absence de différence significative entre les itinéraires longs et l'itinéraire guide en ce qui concerne le coût minéralogique de la biomasse.

Pour les itinéraires semis dédiés, le constat est plus contrasté. Il y a effectivement une production annuelle de biomasses plus importante sur ces itinéraires. Toutefois elle est insuffisante pour compenser le surplus d'exportations minérales annuelles. De plus, sur un tel itinéraire, on a tendance à exporter les menus bois afin de maximiser la production de biomasse. Ce prélèvement de biomasse supplémentaire entraine un surcoût très important en minéraux car ces derniers sont particulièrement concentrés dans ce compartiment.

d. Séquestration de carbone

Le dernier point que nous allons regarder dans le cadre de notre analyse multicritère est la séquestration de carbone. En effet, la forêt représente un réservoir de carbone important donc la taille peut varier selon la sylviculture mise en œuvre. Nous avons calculé annuellement le carbone retenu au sein de nos peuplements avec l'aide de l'équation suivante, (Loustau et al., 2004) :

$$Carbone = 0.475 \times Biomasse$$

A partir de toutes les valeurs de carbone retenu, nous pouvons calculer une valeur moyenne pour chaque itinéraire. A l'échelle d'un hectare, cette valeur de séquestration moyenne a peu de sens car si le peuplement est jeune, il retiendra moins de carbone et s'il est âgé il en retiendra davantage. Cependant, cet indicateur prend beaucoup de sens à l'échelle d'un massif. Si ce dernier est géré en futaie régulière équilibrée, c'est-à-dire qu'il y a autant de surfaces pour chaque stade de peuplement, on atteindra la séquestration moyenne pour l'ensemble du massif.

Sur la figure 33, on observe que les itinéraires longs séquestrent significativement plus de carbone que les autres itinéraires plus courts tel que celui préconisé par le guide et les itinéraires semis dédiés. Avec ces derniers, la différence est même du simple au double. Si le propriétaire du terrain est particulièrement sensible à la séquestration de carbone cela peut grandement influencer ses choix.

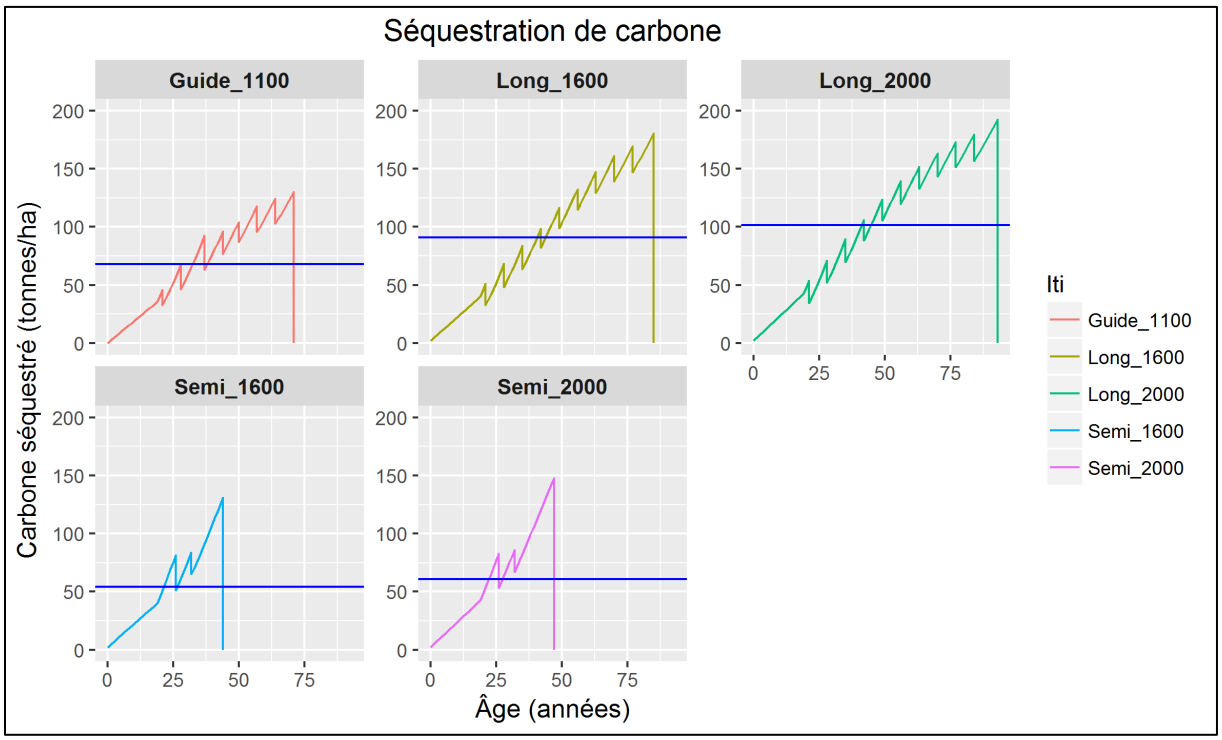


Figure 32: Séquestration de carbone par itinéraire

Dans le cadre de notre analyse multicritère, nous n'irons pas plus loin dans le raisonnement. Toutefois, la problématique du carbone ne se résume pas uniquement à de la séquestration en forêt. Lorsqu'une mobilisation de bois a lieu, le carbone n'est plus séquestré sur le terrain mais il peut s'y retrouver ailleurs et participer à un stockage de carbone dans les produits bois. C'est le cas du bois d'œuvre qui est employé en construction. De même, le bois mobilisé peut intervenir en tant que substitution à une énergie fossile. C'est le cas du bois énergie.

3. Bilan de l'analyse multicritère

Nous venons de présenter les résultats critère par critère. Cependant, lorsque l'on choisit de partir sur un itinéraire sylvicole, on doit être conscient des forces et faiblesses de ce dernier. L'analyse multicritère consiste à intégrer l'ensemble de ces critères afin de choisir le meilleur compromis. De nombreuses méthodes existent afin d'aider le décisionnaire à réaliser son choix. C'est notamment le cas de la méthode ELECTRE, (Roy 1978). Cela consiste à affecter un barème homogène et un poids pour chaque critère. Le barème reste stable tandis que le poids peut être modifié selon la sensibilité du décisionnaire. Dans notre cas, ce dernier peut choisir de privilégier au maximum la rentabilité économique de l'itinéraire et n'apporter que très peu d'importance à la production moyenne. Au contraire, il peut choisir de privilégier la séquestration de carbone même si cela se fait au détriment de la rentabilité économique. Nous n'avons pas suffisamment de temps à notre disposition pour affecter un barème à chaque paramètre. Notre discussion restera qualitative, ce sera plutôt une analyse multivariable, mais nous prendrons en compte les différentes sensibilités dans notre raisonnement.

Nous avons des résultats pour quatre critères différents et ces derniers ne sont pas toujours allés dans le même sens. Sur le plan économique, le guide était le plus performant, ensuite on trouvait les itinéraires semis dédiés. Enfin, les itinéraires longs étaient les moins rentables. Néanmoins, les résultats étaient peu contrastés et donc pas rédhibitoires. Sur le plan de la production, les itinéraires se valaient globalement. Seul celui préconisé par le guide de sylviculture produisait 1m³/ha/an de moins. En revanche, la répartition de produits BO/BI/BE était bonne pour les itinéraires longs et celui du guide. Ce dernier avait également le mérite de ne pas trop fabriquer de gros bois, ce qui n'était pas le cas des itinéraires longs. L'analyse des exportations de minéralomasse a mis en évidence que les itinéraires semis dédiés sollicitent fortement la richesse chimique des sols sans augmenter significativement la production de biomasse. Sur le dernier point, la séquestration de carbone, il y a un très net avantage pour les itinéraires les plus longs. A l'opposé, les itinéraires semis dédiés sont peu performants en séquestration de carbone. L'itinéraire préconisé par le guide, présente des résultats intermédiaires.

En intégrant tous les résultats présentés jusqu'ici, (cf. tableau 14), nous arrivons aux conclusions suivantes : L'itinéraire préconisé par le guide de sylviculture, douglasaies françaises est un très bon compromis. Il offre la meilleure rentabilité économique, c'est un point très important pour le sylviculteur qui fait de la production de bois un objectif principal. Bien que la production annuelle soit légèrement inférieure aux autres itinéraires, cet écart n'est pas problématique. Sur le plan de la minéralomasse, c'est la solution qui sollicite le moins la richesse chimique des sols, cela va dans le sens d'une gestion durable, (Van der Heijden et al., 2011). Enfin sur le plan de la séquestration de carbone, les résultats sont raisonnables mêmes s'ils sont nettement inférieurs à ceux des itinéraires longs. C'est

sur ce dernier point que le choix d'itinéraire peut basculer. Si le propriétaire est particulièrement sensible à la séquestration de carbone, il peut opter pour un itinéraire plus long. La performance économique de son peuplement sera un petit peu plus faible, mais le carbone retenu sur l'ensemble de sa forêt atteindra un niveau maximal. Il doit toutefois garder à l'esprit, qu'en gardant plus de capital sur pied, il s'expose à davantage de perte en cas de tempête. En ce qui concerne la densité, 1600 tiges par hectare sont suffisantes car le surplus de densité n'apporte pas de plus-value significative sur la performance économique et la séquestration de carbone. De plus, il est plus aisé d'obtenir 1600 tiges par hectare à l'issue de la régénération naturelle.

Tableau 14 : Synthèse analyse multicritère

Itinéraire	Rentabilité économique	Production	Exportations minérales	Séquestration de carbone
Guide_1100	++	+	+	+
Long_1600	+	++	++	++
Long_2000	-	++	++	++
Semi_1600	++	+	-	-
Semi_2000	+	+	-	-

Les itinéraires semis dédiés sont un peu en retrait après analyse des résultats. En effet, ils ne présentent pas de points forts particuliers sur le plan de la rentabilité ou de la production. Au contraire, les itinéraires semis dédiés sont fortement handicapés si l'on regarde les exportations de minéralomasse et la séquestration de carbone. Enfin, le fort niveau de capital juste avant la mise en régénération laisse dubitatif sur la capacité de l'itinéraire à être répété dans le temps.

L'étude réalisée met en exergue deux itinéraires, celui préconisé par le guide et l'itinéraire long avec une densité de départ de 1600 tiges par hectare.

Conclusion :

Les modèles de croissances présentent une grande richesse. Pendant des années, ils ont été utilisés principalement par des chercheurs car leur complexité peut s'avérer repoussante. De nos jours, les ingénieurs sont communément formés à utiliser des outils informatiques et ne sont pas réticents à travailler avec des modèles de croissance. Il convient toutefois pour ces derniers de présenter un fonctionnement pragmatique et accessible à un utilisateur occasionnel. Le département, recherche développement et innovation de l'Office nationale des forêts est le pivot idéal pour démocratiser l'utilisation de modèles de croissance dans les opérations de gestion forestière. Dans un premier temps, la RDI teste la performance des modèles. C'est ce que nous avons fait lors de notre comparaison de modèle douglas. Ces tests sont également l'occasion d'avoir un regard critique sur la prise en main des modèles. Il est alors possible d'échanger avec les développeurs afin de rendre ces outils plus fonctionnels.

L'amélioration des fonctionnalités profitera à terme dans la gestion, mais elle profite immédiatement aux membres de la RDI qui travaillent avec des modèles de croissance. Ces derniers ont été utilisés dans le cadre du projet RESPIRE. L'un des objectifs de ce projet était la quantification des exportations de minéralomasse sur toute une révolution. Il n'est pas possible de répondre à une telle question par l'expérimentation. Avec les modèles, nous avons créé une grande quantité de données standardisées qui sont venues alimenter nos modèles de biomasse et de minéralomasse. Les modèles de croissances sont alors une porte d'entrée pour de nouveau projets. En garantissant un bon fonctionnement, ils peuvent à terme se substituer, dans certains cas, aux expérimentations, avec le mérite de fournir des résultats quasiment immédiatement.

A partir d'un unique point de départ, on peut explorer une gamme d'évolutions possibles d'un même peuplement. Cette fonctionnalité a été mise en œuvre lors de notre analyse multicritère d'itinéraires sylvicoles. Cette dernière a été réalisée à partir de peuplements virtuels mais il est tout à fait envisageable de simuler l'évolution à partir de relevés sur le terrain. Le cas échéant, les modèles de croissance sont une solution alternative aux tables de production, avec une meilleure capacité d'adaptation aux réalités du terrain que ces dernières. De tels outils trouveraient des débouchés lors des rédactions d'aménagements.

Les perspectives futures sont nombreuses pour les modèles de croissance. La RDI s'est emparée de l'outil et l'utilise de plus en plus fréquemment mais il reste encore une grande marge de progression à réaliser dans les années à venir. Il convient de maintenir l'échange entre développeurs et utilisateurs afin que l'outil soit en adéquation avec les besoins de ces derniers. Dans le même temps, les modèles vont continuer à progresser et élargir leur gamme de fonctionnement. A ce jour la plupart des modèles simulent l'évolution de peuplements monospécifiques en futaie régulière. Demain, ils devront être capables de simuler l'évolution de peuplements mélangés en futaie irrégulière.

Bibliographie :

Achat D., Augusto L., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J., Analyse bibliographique des impacts du prélèvement des rémanents forestiers sur la fertilité des sols et la croissance des peuplements, Porjet RESOBIO, Gestion des rémanents forestiers : Preservation des sols et de la biodiversité, 2014

Akroume E., Zeller B., Buée M., Saint-André L., Reichard A., Gehin C., Bach C., Le réseau MOS, un dispositif de suivi des effets des prélèvements de biomasse sur les sols et les peuplements forestiers, Rendez-Vous Techniques, ONF, n54, p 9-22, 2017.

Angelier A., Guide des sylvicultures, Douglasaies françaises, 2007

Bailly A., Bigot M., Un modèle de croissance pour les plantations équiennes de Douglas, 1997

Bonneau M., La fertilisation des forêts dans les climats tempérés. Théories, base du diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales, ENGREF Ed, 1995

Bontemps, J.-D., Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (Fagus sylvatica) et de chêne sessile (Quercus petraea) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle, 2006

Bouchon J., Les tables de production et les modèles de croissance : un outil de diagnostic sylvicole, 1988

Cacot E., Eisner N., Charnet F., Leon P., Rantien C., Ranger J., Récolte raisonnée des rémanents en forêt, 2006.

Chopard B., Riou-Nivert P., François D., Deleuze C., Gestion des résineux et demande industrielle : Le regard de la R&D, Revue Forestière Française, 2016

Deleuze C., Rivoire M., Hervé J-C, Vallet P., Estimer le volume total d'un arbre quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station, Rendez-Vous Techniques, ONF, n44, p 22-32, 2014.

Deleuze C., Rivoire M., Hervé J-C., Estimation harmonisée du volume de tige à différentes découpes, Rendez-Vous Techniques, ONF, n44, p 33-42, 2014.

Dhôte J.-F., Le Moguédec G., Reference of the Fagacées growth simulator, 2004.

Dufour-Kowalski S., *Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C.,* de Coligny F., Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. Annals of Forest Science 69 : 221–233, 2012

Jarret P., Guide des sylvicultures Chênaie atlantique, 2004

Lousteau D., Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation et impacts de différents scénarios climatique et sylvicoles, 2004

Loustau D., Moreaux V., Bosc A., Trichet P., Kumari J., Rabemanantsoa T., Balesdent J., Jolivet C., Medlyn B.E., Cavaignac S., Nguyen-The N. A climate sensitive model of carbon transfer through atmosphere, vegetation and soil in managed forest ecosystems. Presented at the AGU Fall Meeting, San Francisco, 2012

Nathaniel O., Doug M., David H., The Organon model by Nathaniel Osborne, Doug Maguire, David Hann, Oregon State University (USA), 2014

Ottorini J-M., Simulation et sylviculture du Douglas. Revue forestière française, vol. XLVII, n°spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", pp. 97-105, 1995

Perin J., Claessens H., Lejeune P., Brostaux., Herbert J., Distance-independent tree basal area growth models for Norway spruce, Douglas-fir and Japanese larch in Southern Belgium, 2016

Pilard-Landeau B., Simon E., Guide des sylvicultures La hêtraie Nord-Atlantique, 2008

Ponette Q., Ranger J., Biomasses et minéralomasses aériennes de cinq peuplements de douglas du réseau RENECOFOR : Quantification et implications sylvicoles, Revue Forestière Française, 2000

Rakatoarison H., Cailly P., Deleuze C., Richter C., Berthelot A., Plantation résineuses en conditions forestières : Analyse économique des itinéraires dédiés et semi-dédiés pour augmenter la production de bois, 2015

Ranger J., Colin-Berlagrand M., Nys C., Le cycle biogéochimique des éléments majeurs dans les écosystèmes forestiers, 1995

Roy B., ELECTRE III: Un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples, Cahiers du CERO, 20(1), pp. 3-24, 1978

Saint-André L., Wernsdörfer H., Deleuze C., Modèle de biomasse et de minéralomasse. Quelles avancées de la recherche ? Pour quels usages à terme en gestion ?, Rendez-Vous Techniques, ONF, n44, p 43-56, 2014

Sardin T., Guide des sylvicultures Chênaies continentales, 2008

Sardin T., Legay M., Bock J., Conrard F., Guide des sylvicultures Hêtraie continentales, 2011

Van der Heijden G., Legout A., Nicolas M., Ulrich E., Johnson D., Dambrine E., Long-term sustainability of forest ecosystems on sandstone in the Vosges Mountains (France) facing atmospheric deposition and sivicultural change, 2011

Wernsdörfer H., Genet A., Jonard M., Legout A., Nys C., Saint-André L., Ponette Q., An integrated approach to the modelling of nutrient concentrations in roundwood based on roundwood diameter and tissue proportion. Evidence for an additional site-age effect in the case of Fagus sylvatica, 2014