

Utilisation du modèle individu centré Samsara2 pour analyser les sylvicultures en peuplement irrégulier

Si la conception des sylvicultures de futaie régulière s'appuie souvent sur des modèles de simulation, ce n'est pas encore vraiment le cas pour la futaie irrégulière, dont les structures complexes rendent la modélisation bien plus difficile. Mais ça vient, avec par exemple le modèle Samsara2 développé par Irstea Grenoble pour l'étude des peuplements résineux de montagne à base de sapin, épicéa, hêtre. Cet article présente les principes du modèle, ce qui donne au passage une idée de la difficulté, puis il illustre sur un cas d'étude comment on peut l'utiliser pour stimuler la réflexion sylvicole... au bénéfice mutuel des modélisateurs et des sylviculteurs.

Les modèles de simulation sont de plus en plus utilisés pour la comparaison et la mise au point d'itinéraires sylvicoles. Plusieurs modèles existent en France et dans la plupart des pays forestiers pour la futaie régulière. Ils permettent d'analyser l'effet du rythme et de l'intensité des éclaircies sur la production totale et les produits récoltés, parfois jusqu'à des analyses économiques. Un certain nombre de ces modèles sont implémentés sur la plateforme CAPSIS (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012; Goreaud *et al.*, 2005) et mis à la disposition de la R&D de l'ONF. Intervenant en complément des expérimentations et des observations de terrain, les modèles permettent de réfléchir différemment aux effets de la sylviculture car ils permettent de multiplier les modalités expérimentales, de comparer les itinéraires sur toute la durée du cycle sylvicole, et de fixer tous les facteurs dont l'effet n'est pas étudié.

En futaie irrégulière, la modélisation est plus difficile à réaliser, car les peuplements ont une structure complexe, les différents proces-

sus démographiques agissent en même temps et les interventions sylvicoles combinent de nombreux leviers d'action. Plusieurs types de modèles permettent néanmoins de simuler la gestion de peuplements irréguliers, en particulier les modèles « individu-centrés » et « spatialement explicites » basés sur la représentation de chaque arbre dans le peuplement avec sa localisation. Le modèle Samsara2, développé à Irstea Grenoble (Courbaud *et al.*, 2015) pour étudier les peuplements résineux de montagne à base de sapin, épicéa et hêtre, relève de cette famille.

L'objectif de cet article est de présenter le modèle Samsara2 et ses principes de fonctionnement, puis d'illustrer par un exemple d'application comment ce type de modèle peut stimuler la réflexion en sylviculture des peuplements mélangés irréguliers. Pour ce faire, nous comparons les résultats de simulations représentatives de quatre stratégies sylvicoles contrastées, poursuivies pendant 200 ans à partir d'un même peuplement initial, jardiné à hêtre-sapin-épicéa riche en gros bois de

la forêt de Prénovel (Jura). Les simulations présentées n'ont pas ici pour but d'aboutir à des préconisations mais plutôt de montrer comment la représentation concrète des résultats d'une stratégie sylvicole permet de réfléchir à ses avantages et ses limites et permet d'identifier des leviers d'amélioration possibles.

Problématique

Un questionnement renouvelé en futaie irrégulière

La gestion irrégulière suscite un regain d'intérêt par rapport aux questions de rendement soutenu sur de petites surfaces, de résilience face aux perturbations, de conservation de la biodiversité, et de protection contre les risques naturels. Pour autant, les sylvicultures pratiquées sont remises en cause à la fois car elles conduisent à la récolte de très gros bois moins appréciés actuellement par l'industrie du bois (Chopard *et al.*, 2013; François *et al.*, 2013) et car les normes de jardinage classique sont trop rigides et la plupart du temps inapplicables (de Turkheim et Bruciamacchie, 2005; Schütz, 1997).

Il est donc nécessaire de faire évoluer les pratiques, tout en s'assurant qu'elles permettent un bon fonctionnement de l'écosystème sur le long terme. La durabilité d'un jardinage orienté vers des peuplements à plus faibles diamètres demande ainsi à être précisée. Par ailleurs, pour limiter les dégâts d'exploitation en conditions de pente forte et de manque de desserte, et pour maintenir les essences peu tolérantes à l'ombre, la sylviculture par petites trouées de quelques dizaines d'ares se développe dans les Alpes (Gauquelin et Courbaud, 2006). Cependant l'impact de cette stratégie sur le type de produits récoltés est encore mal évalué. De même, la conservation d'arbres porteurs de dendromicrohabitats et de gros bois morts est actuellement mise en avant pour favoriser la biodiversité (Emberger *et al.*, 2013; Larrieu et Gonin, 2008), mais se heurte à la crainte d'une perte en production qui, elle non plus, n'est pas bien appréhendée. Plus généralement, la sylviculture irrégulière se pratique désormais pour des essences plus variées qu'autrefois, avec en particulier un développement dans les feuillus ou avec de nouvelles essences comme le Douglas. Le changement climatique demande également de réfléchir aux adaptations de la sylviculture à de nouvelles conditions. Tous ces axes de réflexion renouvellent le besoin d'outils et de méthodes pour évaluer et mettre au point les itinéraires sylvicoles en futaie irrégulière.

Intérêt des modèles individuels centrés en irrégulier

Dans les modèles individuels centrés, la description explicite de chaque arbre avec ses particularités (espèce, diamètre, situation de compétition) permet de représenter n'importe quelle structure de peuplement et de simuler des actions de gestion de manière très libre. Ces potentialités sont encore accrues dans les modèles « spatialement explicites », où chaque arbre est localisé dans le peuplement. Le suivi individuel des arbres permet également de simuler

fidèlement l'ensemble de leur cycle de vie (régénération, croissance et mort) et la manière dont ils sont en compétition pour les ressources. Un modèle de ce type a été développé à Irstea pour pouvoir étudier en détail l'effet de la sylviculture sur la dynamique des peuplements irréguliers.

Nos outils de simulation

Le modèle Samsara2

Dans le modèle Samsara2, schématisé figure 1, un peuplement est représenté par une liste d'arbres et une liste de semis localisés sur une placette de terrain. Celle-ci est découpée en cellules de sol qui servent de supports aux arbres. Chaque arbre est caractérisé par un identifiant, ses coordonnées spatiales (x, y, z), son espèce, son diamètre à hauteur de poitrine (DHP), trois variables décrivant le houppier (hauteur totale, hauteur de la base et rayon du houppier) et éventuellement des variables supplémentaires telles que la présence de dendromicrohabitats. Chaque semis est caractérisé plus simplement par un identifiant, ses coordonnées, son espèce et sa hauteur. La forme des houppiers des arbres est reconstruite en trois dimensions à partir des trois variables qui les décrivent et qui sont calculées par allométrie à partir du diamètre. Des rayons lumineux provenant de la voûte céleste et visant le centre de chaque cellule

de sol sont utilisés pour calculer la lumière interceptée par chaque arbre et la lumière résiduelle arrivant sur chaque cellule de sol durant une saison de végétation (Courbaud *et al.*, 2003). L'accroissement en surface terrière d'un arbre au cours d'une saison de végétation dépend de la lumière interceptée et intègre un effet ontogénique (l'interception dépend de la taille de l'arbre) et un effet compétition (la lumière incidente dépend des voisins). La mortalité naturelle d'un arbre est le résultat d'un tirage aléatoire avec une probabilité fonction du diamètre de l'arbre et de la compétition qu'il subit : elle est relativement élevée pour les petits arbres subissant une forte compétition, faible pour les arbres de diamètres intermédiaires et élevée à nouveau pour les gros arbres plus sensibles aux chablis et/ou sénescents. La production de graines dépend de la surface terrière des arbres et d'une pluie de graines provenant des peuplements environnants. La survie d'un semis est le résultat d'un tirage aléatoire avec une probabilité fonction de l'éclairement de la cellule de sol qui le porte. Cette fonction simule une augmentation des chances de survie quand l'éclairement passe de faible à intermédiaire, suivie d'une diminution à fort éclairement. Cette diminution représente des effets indirects tels que l'apparition de la végétation

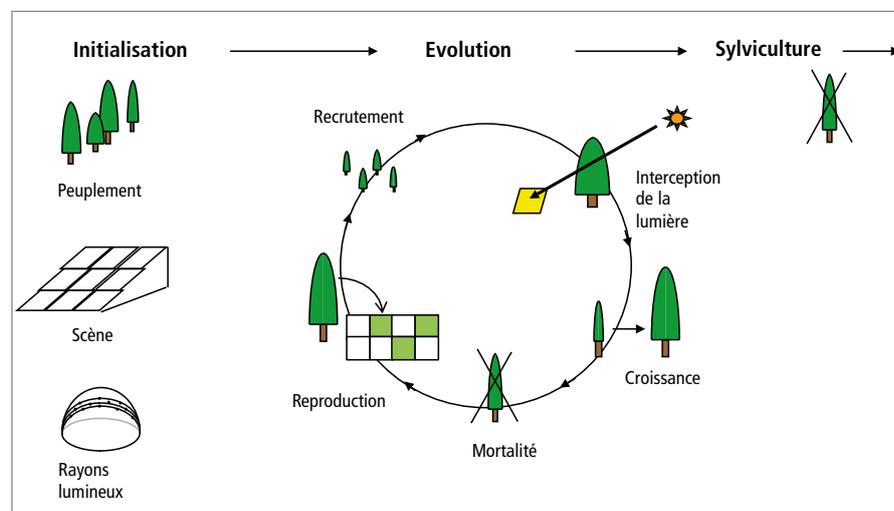


Fig. 1 : illustration des différents processus simulés par le modèle Samsara2

concurrente et de l'abroustissement dans les trouées. La croissance des semis dépend de l'éclairement de la cellule de sol et quand un semis atteint la hauteur seuil de recrutement correspondant au diamètre de précomptage, il est transformé en arbre adulte en lui rajoutant un diamètre et un houppier. Différentes versions du modèle et des exemples d'application ont été décrits dans plusieurs publications (Courbaud *et al.*, 2003); Courbaud *et al.*, 2015; (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012; Gauquelin *et al.*, 2008; Cordonnier *et al.*, 2008; Goreaud *et al.*, 2006; Goreaud *et al.*, 2005).

Samsara2 est implémenté sur la plateforme de modélisation Capsis 4 (de Coligny, 2016; de Coligny *et al.*, 2003; Dufour-Kowalski *et al.*, 2012). Cette plateforme permet de réaliser des simulations de manière interactive ou automatisée et de visualiser la dynamique du peuplement à travers de nombreux graphiques et cartes (figure 2). La surface des peuplements simulés est typiquement comprise entre 1 et 4 ha pour éviter des temps de calcul trop longs et celle des cellules de sol de 25 à 100 m² (5x5 m à 10x10 m). Les processus démographiques (croissance, mortalité, régénération) sont calculés avec un pas de temps annuel mais l'interception de la lumière, qui nécessite un temps de calcul de plusieurs secondes, n'est

généralement calculée qu'au pas quinquennal. Pour une surface d'un hectare, quelques minutes sont requises pour une simulation de 50 ans.

La génération du peuplement initial

Le peuplement initial, c'est-à-dire la liste des arbres et des semis du peuplement avec leurs caractéristiques, peut être préparé soit à partir d'un relevé de terrain exhaustif soit à partir d'informations plus agrégées comme une distribution en diamètre. Dans ce second cas, des routines sont utilisées en amont pour créer une liste d'arbres correspondant à la distribution en diamètre et pour leur attribuer des coordonnées. Dans la plupart des peuplements jardinés, des coordonnées aléatoires pour les arbres donnent un résultat satisfaisant. On peut affiner le processus pour obtenir une distribution spatiale ayant les mêmes propriétés statistiques (fonctions de Ripley, (Goreaud *et al.*, 2007)) que celles d'un peuplement de référence cartographié sur le terrain. Les semis peuvent être quant à eux créés à partir de relevés des taches de régénération sur le terrain, ou créés de manière automatique pour être en équilibre avec le peuplement adulte. Dans ce cas, le sous-modèle de régénération est activé sur 100 itérations avec des sous-modèles de croissance et de mortalité des adultes désactivés,

de sorte qu'à l'issue du processus la distribution spatiale des semis obtenus est en accord avec la carte d'éclairement au sol.

La simulation des interventions sylvicoles

Les interventions sylvicoles peuvent être réalisées à la main sur une carte interactive, sur une distribution en diamètre interactive, ou de manière plus automatisée à l'aide d'algorithmes décrivant des stratégies sylvicoles de manière synthétique.

Un premier algorithme permet de reproduire une sylviculture passée (Lafond *et al.*, 2012), afin d'évaluer le modèle en comparant des simulations avec des données de terrain (Courbaud *et al.*, 2015) ou de comparer la sylviculture passée à d'autres sylvicultures possibles. L'algorithme utilise deux types d'information : d'une part le nombre d'arbres et le volume total coupé par espèce, consignés chaque année dans le sommier de la forêt (journal récapitulatif des interventions réalisées chaque année dans la forêt), et d'autre part la distribution par espèce et par classe de diamètre du peuplement initial inventorié sur le terrain à la date du début de la simulation. L'algorithme de coupe sélectionne des arbres dans les différentes catégories de diamètre de façon à atteindre simultanément le nombre de tiges et le volume coupés

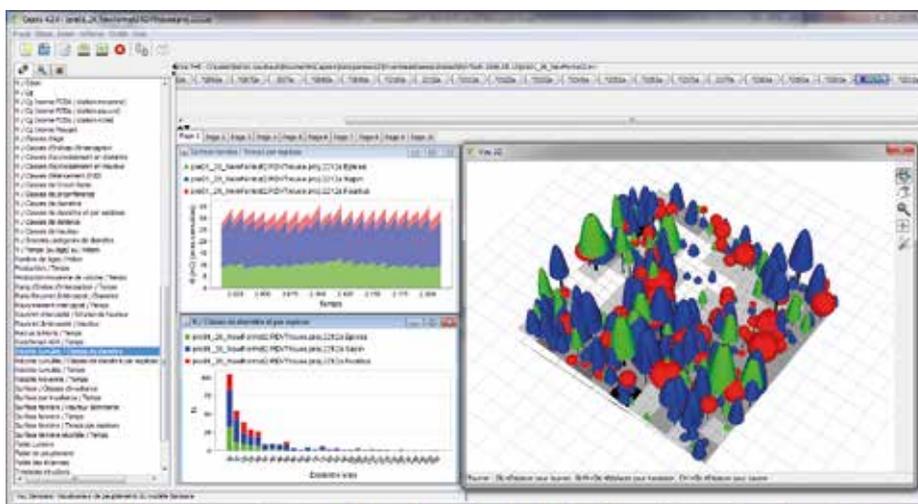


Fig. 2 : Interface utilisateur de Samsara2 sur la plateforme Capsis

La chaîne de rectangles du panneau supérieur représente les différentes étapes d'une simulation. L'étape sélectionnée pour les visualisations apparaît en violet. Dans le panneau inférieur droit, les épicéas sont représentés en vert, les sapins en bleu et les feuillus en rouge. Le niveau de gris des carrés au sol représente leur éclairement. Le graphique en dents de scie représente l'évolution de la surface terrière cumulée des trois essences au cours du temps. L'histogramme représente la distribution en diamètre cumulée des trois essences pour une étape sélectionnée. La liste apparaissant sur le panneau de gauche représente les graphiques disponibles pour observer l'évolution de différentes variables au cours de la simulation.

indiqués dans le sommier. Avec la connaissance de la distribution en diamètre du peuplement avant coupe, les contraintes sont telles que la distribution en diamètre des arbres coupés est estimée avec une faible incertitude (Lafond *et al.*, 2012). Le modèle fait évoluer la distribution en diamètre et l'algorithme peut être appliqué à nouveau lors des interventions successives consignées dans le sommier jusqu'à la date du dernier inventaire.

Un deuxième algorithme permet de reproduire le raisonnement du sylviculteur lorsqu'il décide d'une intervention (Lafond *et al.*, 2014). Cet algorithme permet de désigner les arbres à couper grâce à un tirage aléatoire contraint par une dizaine de paramètres de contrôle. Ces paramètres de contrôle sont par exemple : le diamètre d'exploitabilité de chaque espèce (la qualité des arbres n'étant pas modélisée, il n'y a pas de possibilité de fixer un diamètre d'exploitabilité par qualité pour le moment); une fourchette de prélèvement à chaque intervention (quantité minimale pour assurer une rentabilité économique, quantité standard correspondant à l'accroissement, et quantité maximale correspondant à une décapitalisation); la proportion maximale de prélèvement pour les arbres de diamètre supérieur (récolte) ou inférieur (amélioration) au diamètre d'exploitabilité; le seuil de surface terrière minimale sur pied requis après coupe; l'agrégation spatiale du prélèvement (depuis le pied à pied jusqu'à des trouées dont la surface maximale est choisie par l'utilisateur); la proportion de la surface terrière totale au-dessous de laquelle une essence minoritaire n'est pas récoltée afin de conserver un mélange; le nombre d'arbres conservés pour la biodiversité et la proportion de bois mort (dont les chablis) récolté. L'utilisation de cet algorithme permet de caractériser précisément une stratégie de coupe et donc de la reproduire et de la comparer avec d'autres stratégies.

Si une stratégie donne satisfaction, les valeurs des paramètres de contrôle peuvent être directement traduites en préconisations de gestion.

Les indicateurs de suivi du peuplement

De nombreux indicateurs de suivi du peuplement sont calculés à partir des caractéristiques individuelles des arbres à chaque pas de temps. On peut ainsi visualiser sous forme graphique ou sous forme de table l'évolution de la surface terrière pour différentes catégories d'arbres, des distributions en diamètre, des cartes de peuplement, etc. Une spécificité de Samsara2 est de fournir une carte de l'éclairement au sol à chaque pas de temps. La récolte cumulée au cours du temps et la distribution en diamètre des produits récoltés permettent d'analyser la fonction de production de la forêt. Plus récemment, des indicateurs de qualité d'habitat pour la biodiversité ont été intégrés. Un sous modèle de décomposition du bois mort (Lafond *et al.*, 2014) (Lafond *et al.*, 2015), adapté de Holeksa *et al.* (2008) permet par exemple de visualiser à chaque instant la quantité et la diversité des pièces de bois mort dans le peuplement. Un sous-modèle de diversité de la flore de sous-bois prédit les distributions de probabilité du nombre d'espèces présentes réparties en trois groupes (sciaphiles, intermédiaires et héliophiles) à partir de la structure du peuplement. Ce sous-modèle a été calibré sur les données de l'Inventaire Forestier National (Zilliox et Gosselin, 2014).

Un dernier sous-modèle fait apparaître des dendromicrohabitats sur les arbres selon une probabilité qui dépend du diamètre de l'arbre et de son essence (Courbaud *et al.*, soumis). Ce sous-modèle est actuellement en cours de perfectionnement et de calibration sur une base de données européenne de dendromicrohabitats.

Exemple d'application – Plan d'expérience de simulation

Pour notre exemple d'application, nous utilisons une placette d'un hectare construite à partir des données d'inventaire de la parcelle 26 de la forêt de Prénovel (Jura) en 2011 (figure 3). Le peuplement est relativement chargé avec une surface terrière de 35 m²/ha avant coupe. Il représente un mélange de sapin (64 % de la surface terrière), épicéa (29 %) et hêtre (7 %). La structure en diamètre est relativement jardinée mais contient des très gros bois (jusqu'à un diamètre de 90 cm) et manque de petits bois. On estime une présence de 17 dendromicrohabitats sur des arbres vivants de la placette en début de simulation : 5 cavités de tronc, 3 cavités de nutrition de pics, 2 dendrotelmes (micro-mare dans un creux d'arbre), 4 concavités racinaires (petits abris sous de grosses racines), 3 sporophores de champignons (sur des arbres différents). On estime le bois mort grossier à seulement 4 m³/ha en considérant que les chablis ont été récoltés. À court terme, la production du peuplement est estimée à environ 8 m³/ha/an et le flux de recrues de 7,5 cm de diamètre à environ 7 recrues/ha/an.

Les simulations présentées correspondent à quatre modalités délibérément très contrastées afin d'illustrer les potentialités du modèle. Nous utilisons l'algorithme de coupe qui contraint le choix des arbres prélevés par des paramètres de contrôle sylvicoles. Les différents scénarios sont décrits dans le tableau 1 (page 16), chaque scénario correspondant à une combinaison unique de valeurs des différents paramètres de contrôle. La même stratégie de coupe est appliquée tous les 10 ans sur une durée totale de 200 ans.

- La première modalité, appelée ici « classique » correspond relativement bien à la pratique actuelle en forêt de Prénovel, d'où est issue la placette. Elle est caractérisée par un diamètre d'exploitabilité fixé à 52,5 cm pour les résineux et 42,5 cm pour les feuillus.

La récolte des arbres supérieurs au diamètre d'exploitabilité est assurée en priorité, avec un complément éventuel en amélioration. Les prélèvements sont limités à une fourchette de surface terrière de 4 à 8 m²/ha à chaque intervention. Les coupes sont limitées pour maintenir le capital sur pied après coupe au-dessus de 27,5 m²/ha. Les chablis sont récoltés systématiquement.

- La deuxième modalité, appelée ici « sans régulation », est caractérisée par l'absence de contrainte sur le capital sur pied après coupe. Les coupes consistent en la récolte des gros bois résineux de plus de 52,5 cm de diamètre, jusqu'à atteindre le prélèvement total maximal (8 m²/ha) ou standard (6 m²/ha) suivant la quantité de gros bois présents. Aucun prélèvement n'est effectué dans les arbres vivants de diamètre inférieur au diamètre d'exploitabilité. Tous les chablis, quel que soit leur diamètre, sont récoltés. Les autres paramètres de contrôle sont identiques à la modalité « classique ».

Cette modalité est un peu caricaturale mais elle permet de regarder dans quelle mesure une récolte systématique des arbres dépassant le diamètre d'exploitabilité peut orienter progressivement la production vers des produits de dimensions en dessous de 55-60 cm, diamètre limite pour un passage dans les canters aujourd'hui.

- La troisième modalité, appelée « petites-trouées » est caractérisée par une récolte par trouées d'une surface maximale de 1500 m² assises prioritairement sur les zones de gros bois. Au sein d'une petite trouée, tous les arbres sont prélevés quelles que soient leur espèce et leur dimension. Les autres paramètres de contrôle sont identiques à la modalité « classique ». Cette modalité permet de regarder si les petites trouées peuvent favoriser la diversité des essences et assurer une récolte satisfaisante et la durabilité du peuplement.

- La quatrième modalité, appelée « conservation » est caractérisée

par la rétention active (non-prélèvement) des cinq arbres portant le plus de dendromicrohabitats et la rétention des chablis afin de garder une quantité importante de bois mort au sol. Les autres paramètres de contrôle sont identiques à la modalité « classique ». Cette modalité permet d'évaluer l'effet de la rétention d'éléments favorables à la biodiversité sur la qualité du peuplement comme habitat pour des espèces spécifiques du milieu forestier : en particulier espèces cavicoles liées aux arbres-habitats et espèces saproxyliques liées au bois mort.

Pour prendre en compte la stochasticité du modèle, c'est-à-dire le fait que les tirages aléatoires effectués par le modèle ne conduisent pas exactement à la coupe des mêmes arbres lors de deux simulations, cinq répétitions de chaque modalité ont été effectuées. Les résultats présentés sont les moyennes des variables de peuplement pour chaque modalité et l'intervalle de confiance à 95 % associé.

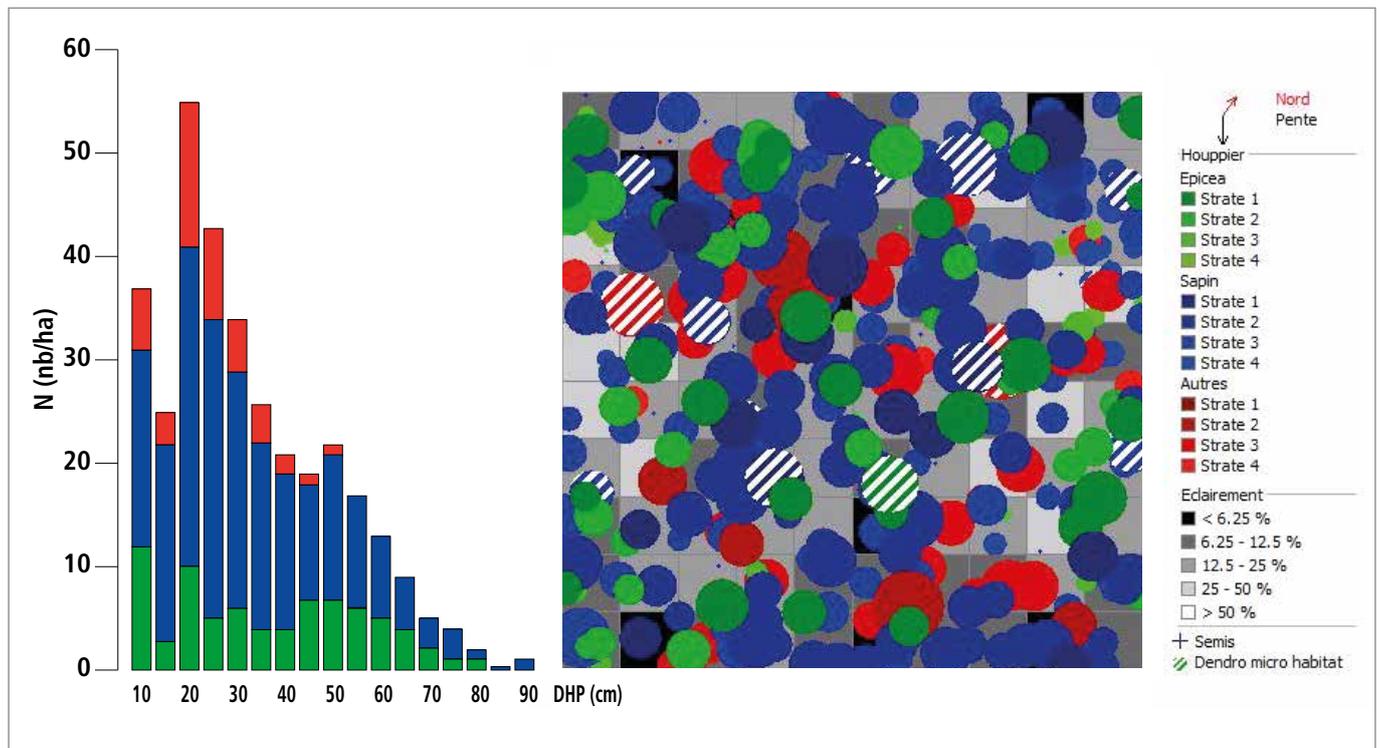


Fig. 3 : caractéristiques du peuplement en début de simulation; en vert l'épicéa, en bleu le sapin, en rouge le hêtre
 À gauche : Distribution en diamètre des arbres vivants dans le peuplement.
 À droite : Projection au sol des houppiers et éclairage au sol. Représentation d'1 ha avec des cellules de 10 m x 10 m. L'intensité de la couleur indique la strate de hauteur (couleur de plus en plus foncée de la strate la plus basse à la plus élevée). Le niveau de gris indique le niveau de lumière au sol. Les hachures indiquent les arbres porteurs de dendromicrohabitats. Les petites croix indiquent des semis.

Paramètres de contrôle sylvicole	Modalité			
	Classique	Sans régulation	Petites trouées	Conservation
Temps entre deux interventions (années)	10	10	10	10
Diamètre d'exploitabilité résineux (cm)	52,5	52,5	52,5	52,5
Diamètre d'exploitabilité feuillu (cm)	42,5	42,5	42,5	42,5
Diamètre minimum des arbres coupés en amélioration (cm) (= seuil d'amélioration)	27,5	27,5	27,5	27,5
Prélèvement minimum lors d'une intervention (m ² /ha)	4	4	4	4
Prélèvement standard lors d'une intervention (m ² /ha)	6	6	6	6
Prélèvement maximum lors d'une intervention (m ² /ha)	8	8	8	8
Proportion maximum de la surface terrière des arbres plus gros que le diamètre d'exploitabilité récoltée en une intervention	1	1	1	1
Proportion maximum de la surface terrière des arbres de diamètre compris entre le seuil d'amélioration et le diamètre d'exploitabilité, coupée en une intervention	0,33	0	0,33	0,33
Proportion minimum en surface terrière au-dessous de laquelle une essence n'est plus coupée	0,1	0,1	0,1	0,1
Surface terrière sur pied minimale après coupe (m ² /ha)	27,5	0	27,5	27,5
Surface maximale d'une trouée (m ²)	0	0	1 500	0
Nombre d'arbres conservés pour raison écologique (nb/ha)	0	0	0	5
Proportion des arbres morts qui sont récoltés	1	1	1	0

Tab. 1 : paramètres de contrôle de l'algorithme de coupe pour les quatre modalités expérimentales. Les cases grisées indiquent les valeurs de paramètres différentes de celles retenues dans la modalité « classique ».

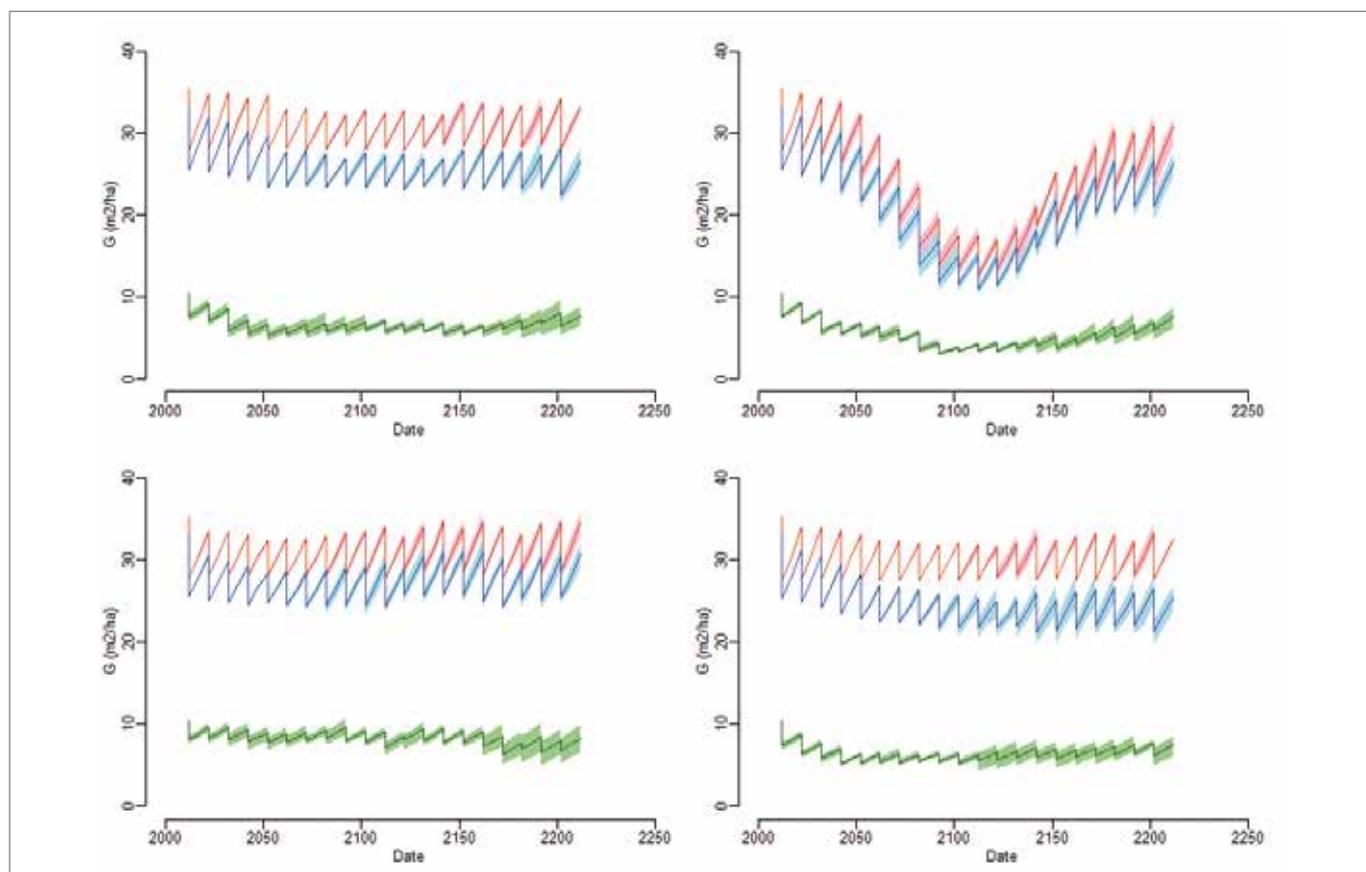


Fig. 4 : évolution de la surface terrière au cours du temps pour les quatre modalités testées ; en vert l'épicéa, en bleu le cumul de l'épicéa et du sapin, en rouge le cumul de l'épicéa, du sapin et du hêtre. Les lignes foncées représentent la moyenne de 5 simulations. Les surfaces de couleur claire représentent l'intervalle de prédiction à 95 % autour de la moyenne.

Exemple d'application – Résultats

Évolution de la surface terrière

L'évolution de la surface terrière des trois essences est représentée pour les quatre modalités en figure 4. La stabilité de la surface terrière au cours du temps dans la modalité « classique » indique que la fourchette de prélèvements choisie (4 à 8 m²/ha tous les dix ans) est bien adaptée à la production du peuplement : elle est suffisamment élevée pour que le matériel sur pied n'augmente jamais au-delà de 35 m²/ha et suffisamment modérée pour que les coupes puissent avoir lieu tous les dix ans sans interruption. La limitation des coupes par la contrainte d'une surface terrière minimale de 27,5 m²/ha après coupe explique leur modération malgré la présence de gros bois. La composition en espèces est assez stable mise à part une petite diminution du sapin et une petite augmentation du hêtre au cours du temps.

La modalité « sans régulation » conduit à une diminution du capital sur pied en dessous de 20 m²/ha pendant 70 ans, du fait de la récolte active des arbres dépassant le diamètre d'exploitabilité sans prise en compte du capital sur pied restant. Les gros bois, nombreux dans le peuplement initial, sont en partie remplacés au fur et à mesure de leur prélèvement par un flux d'arbres provenant des catégories de diamètres inférieurs mais ce recrutement est trop faible durant toute la première moitié de la simulation pour compenser les prélèvements. Après 110 ans, il n'y a plus de très gros bois et les prélèvements diminuent enfin. Le très faible capital sur pied permet une croissance rapide des semis qui se traduit par une augmentation sensible du recrutement et une recapitalisation progressive du peuplement. L'algorithme de coupe a réalisé une récolte tous les dix ans mais au prix d'une longue phase à très faible capital sur pied.

La modalité « petites-trouées » et la modalité « conservation » conduisent à une dynamique du capital sur pied assez proche de la modalité « classique ». La récolte est soutenue puisqu'une coupe est possible tous les dix ans et le capital sur pied est stable. Les petites trouées de 1500 m² n'ont pas permis une augmentation de la proportion d'épicéa malgré son caractère plus intolérant à l'ombre que le hêtre et le sapin. À travers la rétention d'arbres habitats, qui sont majoritairement des feuillus, la modalité « conservation » a par contre conduit à une légère augmentation de la proportion de hêtre.

Récolte cumulée

La récolte cumulée sur les 200 ans de simulation est représentée pour les quatre modalités en figure 5 (page 18). Le volume récolté dans la modalité « classique » est de 7,09 m³/ha/an [6,93-7,34] en moyenne. Les arbres récoltés, cumulés sur la durée de simulation, sont en grande majorité des arbres de diamètre supérieur au diamètre d'exploitabilité (52,5 cm pour les résineux et 42,5 cm pour les feuillus). La récolte des gros bois et très gros bois a duré sur l'ensemble de la simulation. Peu d'arbres inférieurs au diamètre d'exploitabilité ont été prélevés et plus de la moitié d'entre eux correspondent à la récolte de chablis.

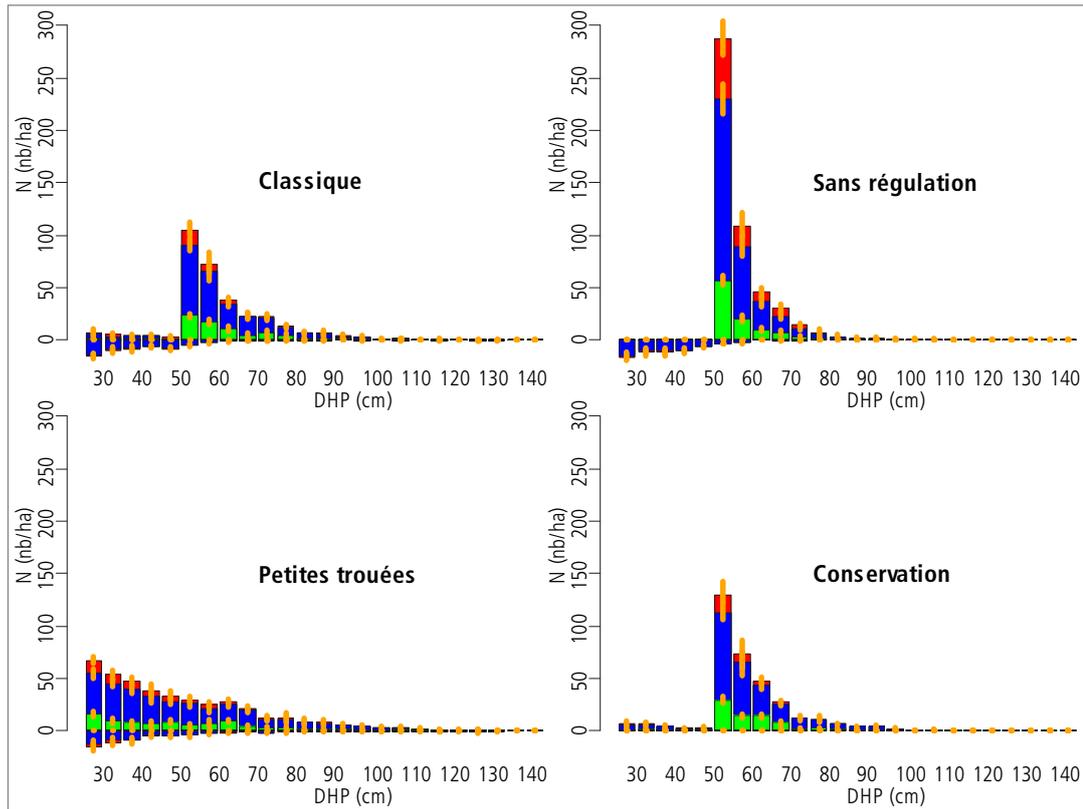
Le volume récolté dans la modalité « sans régulation » est en moyenne de 7,49 m³/ha/an [7,44-7,54], soit légèrement plus élevé que dans la modalité « classique ». La distribution en dimensions des produits est sensiblement différente avec un pic de récolte dans la classe 55 cm, correspondant au diamètre d'exploitabilité des résineux, et une récolte limitée d'arbres de diamètre supérieur, correspondant aux très gros bois présents dans le peuplement en début de simulation. La récolte d'arbres de diamètre plus faible que le diamètre d'exploitabilité correspond à la récolte de chablis.

Le volume récolté dans la modalité « petites trouées » est en moyenne de 6,95 m³/ha/an [6,80 – 7,14], soit proche de la modalité « classique ». La distribution en dimension des produits est par contre très différente avec la récolte d'un grand nombre de petits bois et de bois moyens. Ceci vient du fait que tous les arbres sont coupés au sein d'une trouée, quel que soit leur diamètre. Les trouées sont automatiquement localisées dans les zones les plus riches en gros bois, mais cela a finalement peu d'impact sur la nature des produits récoltés puisque les gros bois sont dispersés dans le peuplement. La distribution des produits récoltés reflète donc la diversité des dimensions des arbres présents dans le peuplement.

Le volume récolté dans la modalité « conservation » est en moyenne de 6,32 m³/ha/an [6,01-6,63]. Il est donc plus faible que pour les trois autres modalités. Cette différence provient de ce que le bois mort n'a pas été récolté et aussi de ce que les cinq arbres portant le plus de dendromicrohabitats, qui sont généralement des arbres de gros diamètre, ont été préservés. La distribution en dimensions des produits est proche de la modalité « classique », mise à part l'absence de récolte de bois mort.

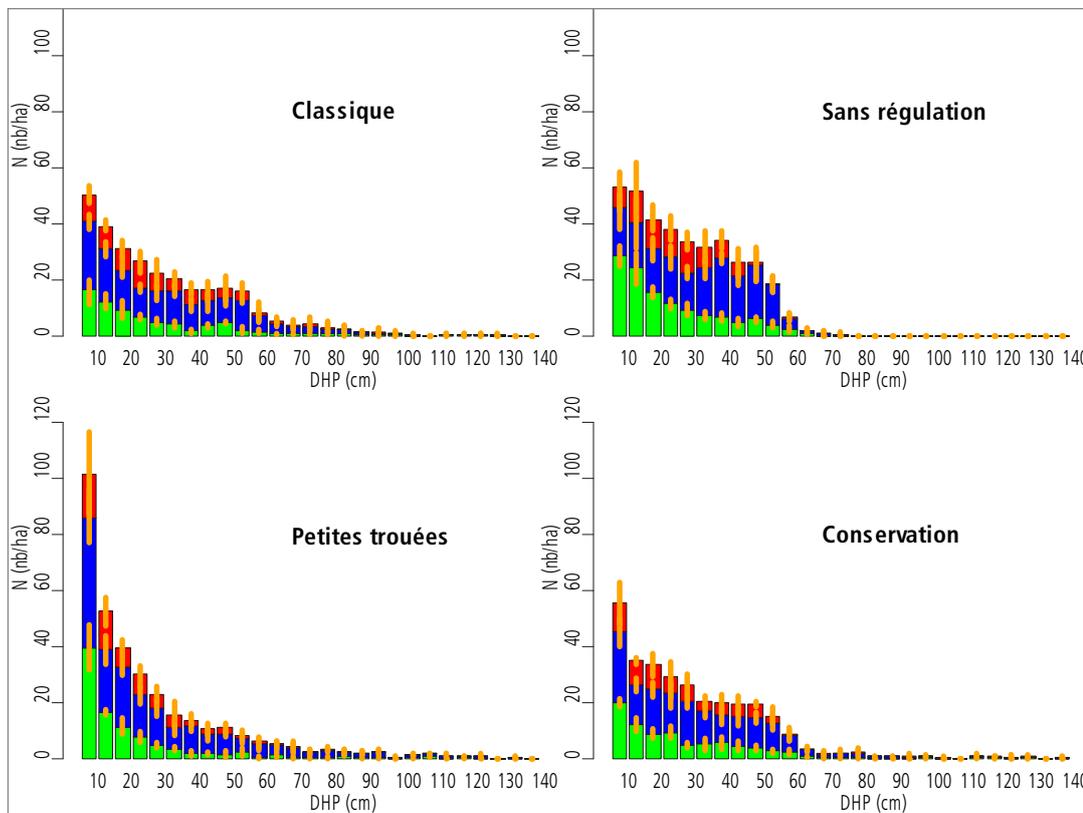


T. Sardin, ONF



Les valeurs positives représentent la récolte d'arbres vivants et les valeurs négatives la récolte d'arbres morts. Les barres pleines représentent la moyenne de 5 simulations. Les traits orange représentent l'intervalle de prédiction à 95 % autour de la moyenne.

Fig. 5 : Distribution en diamètre des produits récoltés pour les quatre modalités testées; en vert l'épicéa, en bleu le sapin, en rouge le hêtre



Les barres pleines représentent la moyenne de 5 simulations. Les traits orange représentent l'intervalle de prédiction à 95 % autour de la moyenne.

Fig. 6 : distribution en diamètre des arbres vivants dans le peuplement au bout de 200 ans (avant coupe) pour les quatre modalités testées; en vert l'épicéa, en bleu le sapin, en rouge le hêtre

Évolution de la structure du peuplement et de ses caractéristiques d'habitat

La modalité « classique » conduit, au bout de 200 ans, à un peuplement jardiné de structure relativement classique (distribution en diamètre figure 6). On observe cependant un décrochement au niveau du diamètre d'exploitabilité : la densité de très gros bois est réduite mais certains subsistent, parfois jusqu'à des diamètres très élevés. La distribution spatiale des arbres est aléatoire (carte du peuplement figure 7). L'éclaircissement moyen au sol est de 19 % [18,52-19,88] de l'éclaircissement incident au-dessus de la canopée. Les niveaux d'éclaircissement varient de 0 à 40 % suivant les cellules de sol. Le volume de bois mort grossier au sol

est de 11 m³/ha [6,53-19,78] et il y a 15 dendromicrohabitats/ha [12-18]. La modalité « sans régulation » conduit au bout de 200 ans à un peuplement ayant une densité beaucoup plus forte de petits bois et de bois moyens (figure 6). Le nombre d'arbres de plus 65 cm avant coupe est extrêmement réduit. À la différence de la modalité précédente, tous les arbres plus gros que le diamètre d'exploitabilité ont donc bien été récoltés à chaque intervention. La distribution spatiale des arbres est aléatoire (figure 7). L'éclaircissement sous la canopée est un peu plus faible que dans la modalité « classique » avec une moyenne à 15 % [13,76-16,58] et des niveaux variant de 0 à 40 % suivant les cellules de sol. Le volume de bois mort grossier au sol est de

14 m³/ha [10,46-16,73] au bout de 200 ans mais il est descendu temporairement à seulement 0,5 m³/ha à 100 ans. Les dendromicrohabitats présents sont au nombre de 14/ha [13-16] au bout de 200 ans, mais ils n'étaient que 2/ha à 100 ans.

La modalité « petites-trouées » conduit au bout de 200 ans à un peuplement jardiné avec une distribution en diamètre classique creusée en « J inversé » et un diamètre maximum très élevé. Les petits bois sont très présents avec un nombre de tiges de diamètre 10 cm près du double de la modalité « classique », exprimant un recrutement actif. Les petites trouées apparaissent sur la carte du peuplement et peuvent se rejoindre jusqu'à former des trouées d'une vingtaine d'ares. L'éclaircissement moyen sous la canopée est élevé, à 29 % [27,34-30,23], avec des niveaux variant de 5 à 65 % suivant les cellules de sol. Le volume de bois mort grossier au sol est de 30 m³/ha [20,11-41,59], nettement supérieur aux modalités « classique » et « sans régulation » car il est alimenté par les gros arbres isolés qui ne sont pas récoltés systématiquement. Les dendromicrohabitats présents sont au nombre de 15/ha [12-18] au bout de 200 ans, comme dans la modalité « classique ».

La modalité « conservation » conduit au bout de 200 ans à un peuplement jardiné avec une distribution en diamètre proche de la modalité classique. La distribution spatiale des arbres est aléatoire. L'éclaircissement moyen sous la canopée est de 18 % [17,41-19,14], avec des niveaux variant de 0 à 45 % suivant les cellules de sol. Le volume de bois mort grossier au sol est de 50 m³/ha [38,45-63,16], nettement supérieur à toutes les autres modalités puisqu'il n'a pas été récolté. Les dendromicrohabitats présents sont au nombre de 28/ha [25-32] au bout de 200 ans, soit près du double des autres modalités.

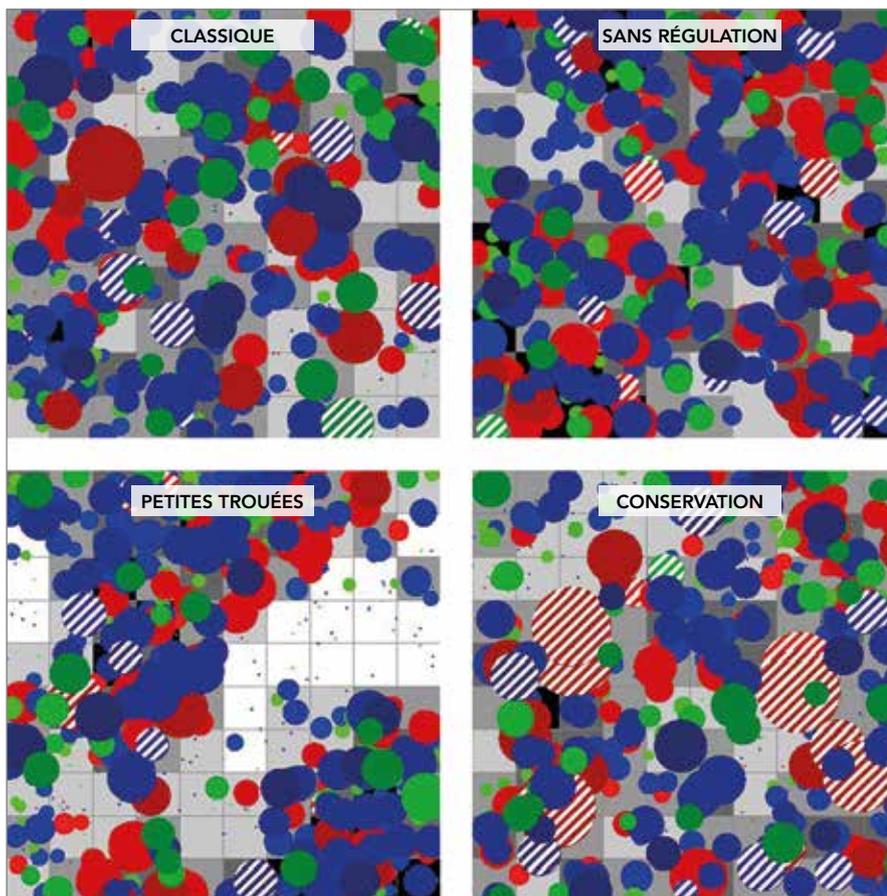


Fig. 7 : projection au sol des houppiers et éclaircissement au sol au bout de 200 ans pour les quatre modalités; en vert l'épicéa, en bleu le sapin, en rouge le hêtre

Chaque carte représente une réalisation parmi les 5 répétitions de la modalité. L'intensité de la couleur indique la strate de hauteur (strate supérieure en couleur foncée et inférieure en couleur claire). Le niveau de gris indique le niveau de lumière au sol. Les hachures indiquent les arbres porteurs de dendromicrohabitats. Les petites croix indiquent des semis.

Discussion

Synthèse des résultats

À partir de ce peuplement riche en gros bois de la forêt de Prénovel, les quatre modalités présentées ont permis de réaliser une récolte comprise entre 4 et 8 m²/ha tous les 10 ans.

Les trois modalités « classique », « petites trouées » et « conservation » dans lesquelles les prélèvements étaient limités par le maintien d'un capital sur pied après coupe au-dessus de 27,5 m²/ha ont permis également de stabiliser la structure du peuplement sur toute la durée de la simulation à l'échelle de l'hectare. Par contre, ce niveau de capital sur pied après coupe a empêché une récolte complète de tous les gros et très gros bois et a fortement limité les opérations d'amélioration. La qualité des produits n'a donc pas pu être optimisée sur le long terme par la sylviculture dans ces scénarios. Ce n'est pas le diamètre d'exploitabilité des résineux fixé à 52,5 cm qui a limité les quantités prélevées mais le seuil de surface terrière minimale après coupe. C'est donc en baissant la surface terrière objectif après coupe qu'on pourrait éventuellement accélérer la récolte des très gros bois et augmenter les prélèvements d'amélioration.

La modalité « sans régulation » illustre la situation opposée. Tous les arbres plus gros que le diamètre d'exploitabilité ont été récoltés systématiquement, mais ceci au prix d'une forte baisse du capital sur pied pendant 70 ans. Aucune amélioration n'a été effectuée dans ce scénario, c'est donc bien l'opération de récolte qui a produit cette décapitalisation, dans un contexte de peuplement riche en gros bois et de régénération relativement lente. À l'échelle de l'hectare, le maintien du capital et de la structure jardinée n'est donc pas assuré. De telles fluctuations peuvent néanmoins être compatibles avec la notion de traitement en futaie irrégulière si elles s'appliquent au

sein d'une forêt comportant une mosaïque de bouquets de stades de développement différents.

Par rapport à la modalité « classique », la récolte en volume a été augmentée de 6 % dans la modalité « sans régulation ». C'est cependant surtout au niveau de la dimension des produits récoltés que les différences sont sensibles. Dans la modalité « sans régulation », l'essentiel de la récolte concerne les produits de diamètres 55 et 60 cm, préférés par l'industrie par rapport à des bois de plus grandes dimensions. Cette modalité est donc celle qui permet le meilleur retour financier. Ces résultats sont cependant à nuancer par le fait que le scénario n'a pas inclus d'opération d'amélioration ni de coupes sanitaires d'arbres affaiblis ou porteurs de défauts. Ce scénario n'optimise donc pas la qualité des produits récoltés sur le long terme. Une stratégie plus fine consisterait à moduler le diamètre d'exploitabilité en fonction de la qualité des arbres, ce qui conduirait à une récolte dans des diamètres plus diversifiés.

La modalité « petites trouées » conduit à la récolte d'une quantité importante de petit bois. Cette modalité n'a pas permis de sélectionner les arbres coupés en fonction de leur taille même si les trouées sont assises préférentiellement sur les zones de gros bois. Cette modalité n'est donc pas adaptée à un peuplement dont la structure est bien jardinée et dans lequel les gros bois sont dispersés. Elle n'a pas non plus permis de diversifier les essences, les surfaces de trouées de 1500 m² n'étant pas suffisantes pour favoriser l'épicéa, plus héliophile et préféré par les industriels, par rapport au sapin et au hêtre.

La modalité « conservation » a permis de multiplier par cinq le volume de bois mort et de doubler le nombre de dendromicrohabitats par rapport à la modalité « classique ». Elle apparaît donc efficace pour augmenter la qua-

lité de l'habitat, en particulier pour les organismes saproxyliques forestiers et les cavicoles. Les produits récoltés sont proches de ceux de la modalité classique, mais le volume récolté est diminué de 11 %. L'impact financier de la rétention des chablis et de 5 arbres-habitats par hectare n'est donc pas négligeable. Ce résultat serait cependant à approfondir. D'une part, les chablis sont probablement sous-estimés dans cette simulation (les chablis représentent généralement de l'ordre de 30 % du volume récolté dans le Jura). D'autre part, la prise en compte de la qualité des produits modulerait également les résultats. La moindre valeur des arbres porteurs de carpophores de champignons et des arbres présentant des cavités à la base ou au milieu du tronc conduirait à une différence plus faible de production en valeur entre les deux scénarios. Remarquons aussi que la modalité « conservation » a favorisé une certaine augmentation du hêtre, plus riche en dendromicrohabitats que les résineux.

Intérêt et portée des résultats de simulation

Cet exemple d'application illustre comment la simulation permet de comparer facilement un ensemble d'itinéraires sylvicoles, de suivre l'évolution du peuplement pas à pas sur une longue durée, et d'analyser en détail comment les différentes variables caractérisant la structure du peuplement, les processus démographiques, la ressource lumineuse, et les produits récoltés évoluent les uns par rapport aux autres. La simulation est donc à la fois un outil de prédiction et un outil d'aide à la compréhension.

Le modèle représente nécessairement une vision simplifiée des processus de la dynamique forestière : de nombreux facteurs ne sont pas modélisés explicitement dans le modèle (qualité du bois, impact des ongulés, compétition du sous-étage, travaux, hétérogénéité du sol, perturbations, variations climatiques, etc.).



J.F. Cerf, ONF 2013

Un aperçu de la parcelle 26 de la forêt communale de Prénovel, qui a servi de base à la simulation

Les résultats du modèle fournissent donc des indications intéressantes, mais le gestionnaire doit réfléchir plus largement en prenant en compte l'ensemble des spécificités de sa forêt. Le modèle a par ailleurs été calibré sur des données de gestion retraçant les cinquante dernières années, il reflète donc les conditions de climat, de dégâts d'ongulés, et de travaux caractéristiques de cette période.

Nous avons fait un effort important d'évaluation du modèle, initialement ajusté sur des données alpines, en testant sa capacité à reproduire la dynamique observée sur les différentes parcelles de la forêt de Queige en Savoie (Courbaud *et al.*, 2015). Dans ce cas précis, le modèle avait un comportement qualitativement satisfaisant mais présentait un biais moyen de 7 % sur les surfaces terrières prédites au bout de 50 ans. Des biais relativement conséquents apparaissaient également sur les prédictions du nombre de petits bois au bout de 50 ans dans certains peuplements. Même dans les conditions pour lesquelles il a directement été calibré, le modèle présente donc

un certain nombre de limites. Le modèle a depuis été re-calibré pour les parcelles de Prénovel dans le Jura (Lagarrigues *et al.*, 2014). Dans les simulations réalisées pour cet article, il semble cependant que la mortalité naturelle soit sous-estimée car dans la modalité « conservation » où les chablis ne sont pas récoltés, la perte de récolte est de seulement 11 % alors que les chablis représentent en général plutôt 30 % des récoltes dans le Jura. Par ailleurs, le scénario « sans régulation » s'écarte fortement des conditions de calibration du modèle. Les données disponibles ne présentent pas en effet de situations avec un niveau de surface terrière aussi faible que dans la simulation. Il est donc possible en particulier que le modèle sous-estime la dynamique du hêtre et de l'épicéa dans les modalités « petites trouées » et « sans régulation ».

Le modèle Samsara2 présente enfin une composante stochastique (des tirages aléatoires sont réalisés au niveau de nombreux processus à l'échelle de l'individu) et deux simulations ne donnent jamais exactement

le même résultat. Une démarche appropriée est donc de faire des simulations sur des placettes suffisamment grandes (la variabilité entre simulations des prédictions de valeurs moyennes de peuplements diminue avec la taille de la placette), de réaliser plusieurs répétitions de chaque simulation et d'analyser plutôt des trajectoires moyennes avec l'incertitude associée, comme nous l'avons fait dans l'exemple ci-dessus basé sur 5 répétitions de chaque simulation.

Conclusion et perspectives d'amélioration

Plus qu'un rôle prescriptif, le modèle a surtout un intérêt en tant qu'outil d'aide à la formalisation des stratégies sylvicoles, de réflexion et d'échanges. La réalisation des simulations présentées dans cet article a ainsi donné lieu à de vifs débats entre les auteurs. Il a fallu tout d'abord s'entendre sur le choix d'un peuplement initial, sur le type de stratégies sylvicoles pertinentes dans ce peuplement et sur la durée de simulation pertinente pour comparer les différents scénarios. Le choix des paramètres de l'algorithme de coupe a ensuite permis de réfléchir sur le poids relatif des facteurs sylvicoles pris en compte dans le raisonnement du forestier. Les limites imposées par l'absence de prise en compte de la qualité du bois et de la vigueur des arbres nous sont ainsi apparues progressivement et appellent à une évolution de l'algorithme de coupe et du modèle lui-même. La diversité des variables de sortie du modèle nous a également conduits à une réflexion sur la multifonctionnalité des scénarios proposés : le contraste entre les scénarios concernant la production en volume, le type de produits obtenus, la dynamique du capital sur pied et la qualité de l'habitat pour la biodiversité montre que les arbitrages entre ces différents aspects sont à réfléchir avec soin. Dans cette optique, même des scénarios peu réalistes peuvent être intéressants s'ils permettent d'identifier les limites d'une stratégie

et de la perfectionner : c'est dans cet esprit que nous avons présenté le scénario « sans régulation » bien qu'il soit peu probable qu'un tel scénario soit effectivement mis en œuvre sur le terrain.

Le modèle Samsara2 est en continue évolution avec la volonté d'augmenter sa robustesse et de l'étendre à des essences et des conditions environnementales plus variées. L'intégration de nouveaux processus tels la compétition avec le sous étage, la prise en compte des dégâts d'ongulés, le bilan économique des itinéraires sylvicoles ou une modélisation plus complète de la dynamique des dendromicrohabitats est prévue. Un couplage avec d'autres modèles est également en travail, en particulier en ce qui concerne l'effet de la structure du peuplement sur la protection contre les chutes de rochers en forêt (Dorren et Berger, 2012). Enfin, la manière d'utiliser les modèles de simulation évolue avec le développement d'expériences de simulation structurées et l'utilisation de techniques d'optimisation. Des méthodes telles que l'analyse des fronts de Pareto, peuvent par exemple être mobilisées pour étudier les discordances de réponses de différents indicateurs de services écosystémiques aux facteurs sylvicoles et élaborer des compromis de gestion (Lafond *et al.*, 2015; Lafond *et al.*, 2014). Sur toutes ces questions, les retours d'utilisateurs sur des cas concrets sont précieux pour améliorer le modèle et en faire un outil utile, stimulant la réflexion autour de la dynamique et de la gestion des forêts.

Benoît COURBAUD⁽¹⁾
Thierry SARDIN⁽²⁾
François DE COLIGNY⁽³⁾
Thomas CORDONNIER⁽¹⁾
Christine DELEUZE⁽⁴⁾
Didier FRANÇOIS⁽⁴⁾
Catherine RIOND⁽⁵⁾
Valentine LAFOND^(1,6)
Guillaume LAGARRIGUES⁽¹⁾

Remerciements

La rédaction de cet article et les développements les plus récents du modèle Samsara2 ont été rendus possibles par de nombreux projets, en particulier par la convention de recherche pluriannuelle de recherche ONF-Irstea, le projet GEFORHET (No. E23/2010) financé par le ministère de l'Agriculture dans le cadre du programme Biodiversité, Gestion forestière et Politiques publiques 2010-2014 et le projet Européen FP7 ARANGE (No. 289437). Nous remercions les collègues ayant participé à ces développements grâce à leurs données de terrain, en particulier l'UT de Saint-Laurent en Grandvaux qui gère la forêt de Prénovel et les collègues ayant participé à l'atelier de formation Samsara en 2015 pour leurs retours sur le modèle. *L'UR EMGR d'Irstea est membre du Labex OSUG@2020 (ANR10 LABX56). La thèse de Guillaume Lagarrigues a été cofinancée par l'ADEME et l'ONF.*

Bibliographie

Chopard B., Deleuze C., François D., Collet R., Boudey A., Moureau, T., Fenart P., Lanvin J. D., 2013. Comprendre et objectiver les attentes des scieurs résineux industriels. *Rendez-Vous Techniques de l'ONF* n° 39-40 pp. 13-21

Cordonnier T., Courbaud B., Berger F., Franc A., 2008. Permanence of resilience and protection efficiency in mountain Norway spruce forest stands: a simulation study. *Forest Ecology and Management*, vol. 256 pp. 347-354

Courbaud B., de Coligny F., Cordonnier T., 2003. Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 116: pp. 1-18

Courbaud B., Lafond V., Lagarrigues G., Vieilledent G., Cordonnier T., Jabot, F., De Coligny F., 2015. Applying ecological model evaluation: lessons learned with the forest dynamics model Samsara2. *Ecological Modelling*, vol. 314 pp. 1-14

Courbaud B., Pupin C., Letort A., Cabanettes A., Larrieu, L. (soumis). Adapting time-to-event analysis methods to the modelling of the formation of microhabitats on trees using cross sectional data. *Methods in Ecology and Evolution*.

de Coligny F., Ancelin P., Cornu G., Courbaud B., Dreyfus P., Goreaud F., Gourlet-Fleury S., Meredieu C., Saint-André L., 2003. CAPSIS : Computer-Aided Projection for Strategies in Silviculture: advantages of a shared forest modelling platform. In *Modelling forest systems*, 319-323 (Eds A. Amaro, D. Reed and P. Soares). Wallingford, UK: CABI publishing.

de Coligny F., 2016. http://capsis.cirad.fr/capsis/presentation#croissance_d_arbres_en_peuplement_avec_simulation_d_itinéraires_sylvicoles_fr

de Turkheim, B., Bruciamacchie M., 2005. La futaie irrégulière. Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature. Edisud, 288 p.

(1) Université Grenoble Alpes, Irstea Grenoble, UR Écosystèmes montagnards

(2) ONF, Direction Forêts et risques naturels

(3) INRA Montpellier – UMR AMAP

(4) ONF, Département RDI, Pôle de Dole

(5) ONF, Département RDI, Pôle de Chambéry

(6) ETH Zürich (CH), Chair of Forest Ecology

Dorren L. K. A., Berger F., 2012. Rockyfor3D (v5.1) à cœur ouvert – Description complète du modèle 3D de chutes de blocs. Publication d'ecorisQ (www.ecorisq.org). 32 p.

Dufour-Kowalski S., Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C., de Coligny F., 2012. Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science* vol. 69 (2) pp. 221-233

Emberger C., Larrieu L., Gonin P., 2013. Dix facteurs clés pour la diversité des espèces en forêt. Comprendre l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP), document technique. Institut pour le développement forestier

François D., Chopard B., Deleuze C., Lanvin J. D., Fenart P., 2013. Comprendre l'évolution de la demande de bois résineux en France pour mieux l'intégrer dans la gestion forestière. Premiers enseignements pour le sylviculteur de résineux et perspectives pour la R&D. *Rendez-Vous Techniques de l'ONF* n° 39-40, pp. 21-29

Gauquelin X., Courbaud B. (Eds). 2006. Guide de sylviculture des forêts de montagne – Alpes du Nord françaises. Cemagref – CRPF Rhône-Alpes – Office National des Forêts.

Gauquelin, X., Courbaud, B., Fay, J., Berger, F. & Mermin, E. (2008). Conduite de peuplements mélangés en forêt de montagne : exemple d'un transfert chercheurs-gestionnaires. *Revue Forestière Française* LX(2) : 207-214.

Goreaud F., Alvarez I., Courbaud B., Coligny (de) F., 2006. Long-term influence of the spatial structure of an initial state on the dynamics of a forest growth model: A simulation study using the Capsis platform. *Simulation*, vol. 82(7), pp. 475-495

Goreaud F., Coligny (de) F., Courbaud B., Dhôte J. F., Dreyfus P., Pérot T.,

2005. La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. *VertigO*, vol. 6(2) pp. 1-12

Goreaud F., Régis A., Courbaud B., Ngo Bieng M.-A., Pérot T., Piroche J.-N., 2007. Simuler des peuplements de structures variées pour faciliter l'utilisation des modèles « arbre » spatialisés. *Revue Forestière Française* vol. 59(2) pp.137-161

Holeksa J., Zielonka T., Zywiec M., 2008. Modeling the decay of coarse woody debris in a subalpine Norway spruce forest of the West Carpathians, Poland. *Canadian Journal of Forest Research* vol. 38(3) pp. 415-428

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

Lafond V., Cordonnier T., Courbaud B., 2015. Reconciling biodiversity conservation and timber production in uneven-aged mountain forests: identification of ecological intensification pathways. *Environmental Management* vol. 56 pp. 1118-1133

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

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

Lagarrigues G., Jabot F., Courbaud B., 2014. Approximate Bayesian Computation to recalibrate individual-based models with population data: illustration with a forest simulation model. *Ecological Modelling*, vol. 306 pp. 278-286

Larrieu L., Gonin P., 2008. L'indice de diversité potentielle (IBP) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, vol. 60(6) pp. 727-748

Schütz J. P., 1997. Sylviculture 2. La gestion des forêts irrégulières et mélangées. Lauzane : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

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



T. Sardin, ONF