Quels modèles de croissance pour les peuplements mélangés ? Exemple du mélange chêne sessile-pin sylvestre

Thomas Perot, F. Goreaud, Christian Ginisty

▶ **To cite this version:**

Thomas Perot, F. Goreaud, Christian Ginisty. Quels modèles de croissance pour les peuplements mélangés ? Exemple du mélange chêne sessile-pin sylvestre. Revue forestière française, 2008, 60 (2), p. 215 - p. 232. hal-00454478

HAL Id: hal-00454478
https://hal.science/hal-00454478

Submitted on 8 Feb 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Revue Forestière Française [Rev. For. Fr.], ISSN 0035-2829, 2008, Vol. 60, N° 2, p. 215-232

http://hdl.handle.net/2042/18145

Quels modèles de croissance pour les peuplements mélangés ? Exemple du mélange chêne sessile – pin sylvestre.

Thomas PEROT, Cemagref Nogent-sur-Vernisson *, François GOREAUD, Cemagref Clermont-Ferrand, Christian GINISTY, Cemagref Nogent-sur-Vernisson

*** Unité de recherche Ecosystèmes Forestiers**
Domaine des Barres, 45 290 Nogent-sur-Vernisson
Tel 02 38 95 09 65, FAX 02 38 95 03 46 Mél : thomas.perot@cemagref.fr

Summary

Mixed forests currently account for 50% of the French forest cover. Nonetheless, there are very few management aid tools in France relating to these stands. Growth model describe the development of stands over time and are able to simulate forestry practices – in this respect, they are very useful tools for planning operations and harvesting, or as aids in producing silvicultural guidelines. The purpose of this article is to present a specific issue raised by these models: the choice of the level of detail for a growth model. This choice can indeed have significant implications for the use of the model. So as to choose the level of detail, we propose building and comparing a series of simplified models. This method is applied to the growth of sessile oak / Scots pine stands in the context of a partnership between the French Forestry Board (ONF) and Cemagref. We sampled 101 oaks and 116 pines distributed in four experimental plots in the Orleans state forest for the purpose of studying radial increment. With this data, we built a first model – a distance-dependent tree model. With this model, we were able to specify the interaction between and within species. One finding was that pines surrounded by pines are at a disadvantage compared to those surrounded by oak. The model was integrated in a module of the Capsis forest simulation system. Starting from an actual stand, we conducted simulations that enabled us to quantify the production of the mixture and furthermore to provide information or input as to the future development of that combination. We also showed the relevance of the distant-dependent tree model for testing marking strategies on the scale of the individual tree. This work is a first step in building a family of models for sessile oak / Scots pine stands at various levels of detail. In the longer term, by comparing the various models in the family, we hope to identify the appropriate scale for one or several management issues. We will then be able to supplement this model by bringing regeneration into the equation so as to develop a comprehensive management aid tool for these mixtures.

Resumé

Les peuplements mélangés couvrent actuellement 50% de la surface forestière française. Pour autant il existe en France très peu d'outils d'aide à la gestion de ces peuplements. Les modèles de croissance décrivent l'évolution d'un peuplement au cours du temps et sont capables de simuler des interventions sylvicoles : ils sont, à ce titre, des outils très intéressants pour la planification des travaux et des récoltes ou pour l'aide à la production de guides sylvicoles.

L'objectif de cet article est de présenter une question spécifique posée par ces modèles : le choix du niveau de détail d'un modèle de croissance. En effet, ce choix peut avoir des implications importantes par rapport à l'utilisation du modèle.

Pour choisir ce niveau de détail nous proposons de construire et de comparer une série de modèles simplifiés. Cette méthode est appliquée à la croissance des peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre dans le cadre d'un partenariat entre l'ONF et le Cemagref. Pour étudier la croissance radiale, nous avons effectué des sondages dans 101 chênes et 116 pins répartis dans 4 dispositifs de la forêt domaniale d'Orléans.

Nous avons utilisé ces données pour construire un premier modèle : un modèle arbre dépendant des distances. Ce modèle nous a permis de préciser les interactions intra et interspécifiques. Il ressort notamment que les pins entourés de pins sont plus défavorisés que les pins entourés de chênes. Le modèle a été intégré dans un module de la plateforme de simulation forestière Capsis. A partir d'un peuplement réel, nous avons réalisé des simulations qui nous ont permis de quantifier la production du mélange mais aussi d'apporter des éléments de réponses ou de réflexion sur le devenir du mélange. Nous avons également illustré l'intérêt du modèle arbre dépendant des distances pour tester des stratégies de martelage à l'échelle de l'arbre.

Ce travail est un premier pas vers la construction d'une famille de modèles des peuplements chêne sessile-pin sylvestre à différents niveaux de détail. A terme, la comparaison des différents modèles de cette famille nous permettra d'identifier l'échelle adéquate pour une ou plusieurs problématiques de gestion. Nous pourrons ensuite compléter ce modèle pour prendre en compte notamment la régénération et développer un outil complet d'aide à la gestion de ces peuplements mélangés.

Introduction

Les peuplements mélangés couvrent une fraction importante de la surface forestière française (Morneau *et al.*, ce numéro) et leur proportion semble encore augmenter (Ulrich *et al.*, 2006). Aujourd'hui, de nombreuses questions se posent sur l'avenir de ces peuplements. La plupart de ces questions peuvent être regroupées en une question générale : Comment gérer les peuplements mélangés de façon durable ? Cette question est d'autant plus difficile que nous sommes dans un contexte où certaines demandes de la société (ex : demande en bois énergie) peuvent entrer en conflit avec d'autres enjeux de la gestion durable des forêts : conservation de la biodiversité, conservation des ressources du sol. Face à ce genre de situations les gestionnaires ont besoin d'outils leur permettant de mieux décrire les peuplements forestiers mélangés, de mieux prédire leur croissance et de tester des scénarios de gestion variés. Les modèles de croissance et de dynamique forestière sont des outils très intéressants pour répondre à ce besoin (Goreaud *et al.*, 2005). En effet, parce qu'ils permettent de tester et comparer différentes stratégies sylvicoles, ils peuvent être utiles à la mise au point de guides de sylviculture et, au niveau des aménagements forestiers, pour définir les objectifs et prévoir les travaux et récoltes par unité de gestion. Beaucoup de travaux récents ou anciens ont déjà été réalisés sur la modélisation des peuplements mélangés. On peut citer le premier modèle construit par Botkin *et al.* en 1972 pour l'étude de la dynamique de peuplements mélangés ou celui de Wykoff en 1990 pour l'aide à la décision et largement repris par la suite. En Europe, on peut citer les travaux de Monserud et Sterba (1996) en Autriche, Pretzsch *et al.* (2002) en Allemagne, Andreassen et Tomter (2003) en Norvège, Trasobares *et al.* (2004) en Espagne, etc.

En France, jusqu'à maintenant l'effort de construction de modèles de croissance a surtout porté sur les peuplements réguliers (Perot et Ginisty, 2004). Concernant les peuplements mélangés, quatre mélanges différents ont été modélisés : le mélange hêtre, sapin et épicéa dans le Jura (Buongiorno *et al.*, 1995; Bruciamacchie *et al.*, 1991), le mélange sapin et épicéa dans les Alpes (Courbaud, 2004), le mélange frêne et hêtre dans le Nord-est (Ottorini et Le Goff, 2002), et le mélange hêtre, pin noir et sapin dans l'arrière-pays méditerranéen (Dreyfus, ce numéro). Ces travaux sont loin de couvrir l'ensemble des types de mélange que l'on peut rencontrer en France (Morneau *et al.*, ce numéro) et ne couvrent pas l'ensemble des régions géographiques. Il est donc nécessaire de poursuivre la construction de modèles pour mieux répondre aux demandes des gestionnaires ou des pouvoirs publics.

Lors de la construction d'un modèle de croissance, le concepteur doit faire des choix en fonction des spécificités du peuplement, des données disponibles et des objectifs du modèle. Dans cet article, nous abordons la question du choix du niveau de détail des modèles. Ce choix conditionne fortement l'utilisation des modèles et nous montrons comment nous souhaitons répondre à cette question dans le contexte des peuplements mélangés chêne sessile - pin sylvestre de la région Centre. Puis nous présentons un modèle construit dans le cadre de cette démarche et des exemples d'applications réalisées avec un outil de simulation permettant d'illustrer l'intérêt de ce modèle.

1 Quel niveau de détail choisir pour construire un modèle de croissance ?

1.1 Qu'appelle-t-on niveau de détail d'un modèle ?

Nous proposons d'utiliser l'expression "niveau de détail d'un modèle" pour caractériser la façon dont le peuplement est décrit dans le modèle (on peut aussi parler d'échelle de modélisation). Pour simplifier, nous avons choisi de retenir quatre grands types de modèle correspondant à quatre niveaux de détail différents[1] : (1) les modèles arbre moyen ou peuplement qui décrivent le peuplement par des variables moyennes (ex : diamètre moyen) ou globale (ex : surface terrière totale), (2) les modèles de distribution qui décrivent le peuplement par une distribution par classe de taille des arbres (ex : distribution par classe de diamètre), (3) les modèles arbre indépendant des distances (MAID) qui décrivent le peuplement par des caractéristiques sur tous les arbres du peuplements (ex : liste des diamètres individuels) et (4) les modèles arbre dépendant des distances (MADD) qui utilisent en plus la position spatiale de chaque arbre du peuplement.

1.2 Existe-t-il un niveau privilégié dans les travaux déjà réalisés ?

Nous avons voulu savoir si, dans les travaux déjà réalisés, un niveau de détail était privilégié pour modéliser la croissance des peuplements mélangés. Pour cela nous nous sommes basé sur une étude réalisée en 2002 (Porté et Bartelink, 2002) qui a recensé environ 130 modèles publiés entre 1947 et 2000 et portant sur des peuplements mélangés. La description de ces modèles, disponible dans cet article, nous a permis de les répartir par type de modèle et par année de parution (figure 1).

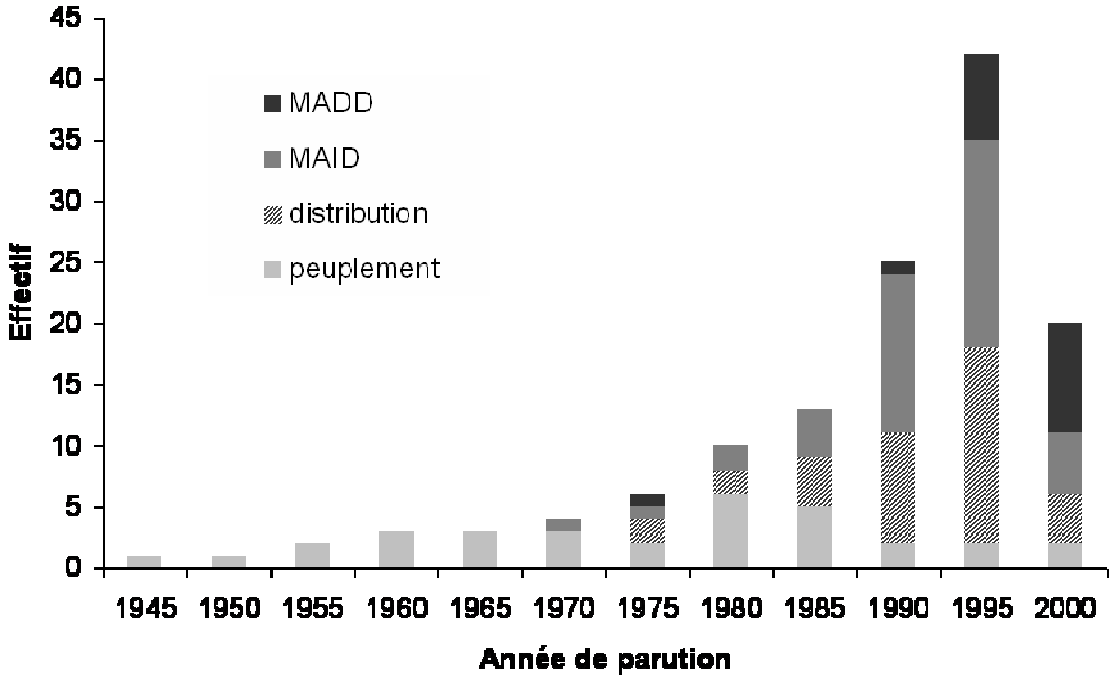


Figure 1 : Répartition des travaux de modélisation sur les peuplements mélangés par type de modèle et par année de parution d'après Porté et Bartelink (2002). Les années ont été regroupées par classe de 5 ans sauf pour la classe 2000 qui comprend 3 années (1998, 1999 et 2000).

[1] Voir Houllier *et al.* (1991) pour une typologie plus complète des modèles de croissance forestiers.

Les premiers modèles construits pour des peuplements mélangés étaient des modèles peuplement et, à partir des années 1970, sont apparus les autres types de modèle. L'émergence des modèles arbre dépendants des distances est récente, plutôt début des années 1990 ; ils deviennent majoritaires dans la dernière période 1998-2000. Il y a donc une tendance vers la construction de modèles de plus en plus détaillés. Si les questions posées par la société ont pu évoluer, le développement des connaissances mathématiques et surtout l'amélioration de l'informatique expliquent en partie cette évolution. Aujourd'hui, pour un objectif et des contraintes donnés, on peut donc supposer qu'il est possible de construire des modèles ayant des niveaux de détail différents. On peut alors légitimement se demander lequel de ces modèles est le plus pertinent pour la question posée.

Pour illustrer cette problématique, nous pouvons prendre deux types de modèles extrêmes, un modèle peuplement et un modèle arbre dépendant des distances, et comparer leurs avantages et leurs inconvénients. Le tableau 1 montre que chacun de ces deux modèles offre des avantages et des inconvénients. Par exemple, le modèle de type peuplement utilise des données facilement accessibles aux gestionnaires pour prédire la croissance et la production mais ne permet pas de tester des sylvicultures d'arbre. Le modèle de type arbre dépendant des distances, quant à lui, permet de prendre en compte de façon fine les interactions intra et interspécifiques mais nécessite des informations très précises sur le peuplement, difficiles à relever en routine par le gestionnaire. Cet exemple caricatural montre bien que le choix du niveau de détail d'un modèle n'est pas si évident et qu'il peut avoir des implications importantes en termes d'utilisation du modèle.

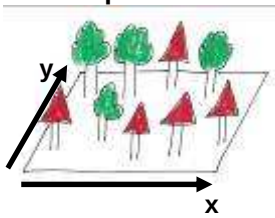
	Modèle peuplement	**Modèle arbre dépendant des distances**
		
Description du peuplement	Variables globales (nombre de tige, surface terrière totale, etc.) ou moyennes (diamètre quadratique moyen, hauteur moyenne, etc.)	Caractéristiques de chaque arbre du peuplement (essence, diamètre, hauteur, etc.) et position spatiale des arbres dans le peuplement.
Avantages	- Conception simple de l'outil ; - Données d'entrée facilement accessibles pour les gestionnaires.	- Réalisme : possibilité de prendre en compte de façon fine les interactions entre arbres et entre espèces ; - permet de simuler des sylvicultures très variées (notamment le détourage).
Inconvénients	- ne permet pas de tester des sylvicultures à l'échelle de l'arbre ; - ne permet pas de différencier des types de mélange différents (mélange pied à pied ou par bouquet).	- données d'entrée contraignantes comme la position spatiale des arbres ; - simulations limitées à de petits effectifs à cause du temps de calcul et de la taille mémoire.

Tableau 1 : Comparaison entre deux types de modèle ayant des niveaux de détail très différents.

1.3 Notre stratégie : comparer des modèles ayant différents niveaux de détail.

Au sein de l'unité Ecosystème Forestier du Cemagref de Nogent-sur-Vernisson, nous avons pour objectif de construire un modèle de croissance pour les peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre et, pour identifier le meilleur niveau de détail, nous avons choisi de construire une série de modèles simplifiés[2] à différents niveaux de détail. Afin de choisir le niveau pertinent, nous comparerons ensuite cet ensemble de modèles sur des critères de précision (calcul des biais associés aux modèles), de qualité statistique (évaluation de la robustesse[3] des modèles), des critères informatiques (le temps de calcul pour réaliser une simulation) mais également des critères liés à l'utilisation des modèles (capacité à répondre à un objectif de gestion). Ce dernier type de critère sera défini en collaboration avec les gestionnaires.

2 Un modèle de croissance spatialisé pour le mélange chêne – pin

Dans cette partie nous présentons le modèle "arbre dépendant des distances" que nous avons construit pour les peuplements mélangés chêne – pin de la forêt domaniale d'Orléans. Nous présentons tout d'abord l'origine et l'intérêt de ce mélange, puis nous présentons les données de croissance obtenues par sondage, et enfin, nous présentons les résultats obtenus avec le modèle ainsi que ses limites.

2.1 Le mélange chêne pin en forêt domaniale d'Orléans

Le pin sylvestre a été introduit de façon massive dans le massif d'Orléans à partir de la moitié du 19ème siècle. L'objectif principal de cette introduction était de constituer une ambiance forestière dans des zones de landes résultant de la surexploitation en bois du massif et du pâturage des animaux. Aujourd'hui, le mélange chêne sessile – pin sylvestre est très présent : par exemple sur le massif de Lorris (7774 ha), 25% des peuplements ne présentent pas d'essence prépondérante (ONF, 2004). De ce fait, ce mélange a acquis une valeur patrimoniale ; il est maintenant représentatif des paysages de nombreux massifs des régions Centre et Ile de France. De plus, il est souvent bien adapté aux stations très contraignantes fréquentes dans la région : terrains sableux avec une hydromorphie forte plus ou moins proche de la surface. Depuis plusieurs années, les gestionnaires forestiers se posent des questions sur la conduite du chêne sessile et du pin sylvestre en mélange. Lors du dernier aménagement du massif de Lorris, cela s'est traduit par la création d'une série irrégulière expérimentale de 340 ha visant à rechercher des modes de gestion adaptés au mélange chêne-pin sur stations pauvres. En 2003, le Cemagref et l'ONF ont construit un projet en partenariat sur l'étude du mélange chêne sessile – pin sylvestre. Ce projet comprend des études sur la structure des peuplements, sur la croissance et sur la régénération. L'étude sur la croissance que nous présentons ici a débuté en 2006.

[2] Le terme "modèles simplifiés" signifie que nous étudions dans ces modèles le processus de croissance et que les processus de mortalité et de régénération ne sont pas pris en compte.

[3] La robustesse du modèle est sa capacité à faire de bonne prédiction malgré la présence de données aberrantes.

2.2 Acquisition des données de croissance en surface terrière

Entre 2004 et 2007, 34 dispositifs d'environ 1ha ont été installés en forêt domaniale d'Orléans principalement dans le massif de Lorris. Dans ces 34 dispositifs tous les arbres ont été positionnés précisément ce qui a permis une étude fine de la structure spatiale du mélange (Ngo Bieng, 2007). Pour la construction du modèle arbre dépendant des distances nous avons utilisé quatre dispositifs (D02, D20, D42 et D49). Ces dispositifs ont été choisis dans des types de station très proches c'est-à-dire un plancher argileux entre 40 et 55 cm de profondeur et une hydromorphie moyenne à forte apparaissant entre 15 et 40 cm de profondeur (Brethes, 1993). Dans un premier temps nous souhaitions éviter au maximum la variabilité de la croissance due à des différences de fertilité. En revanche, nous avons choisi des types de structure spatiale contrastés avec deux dispositifs caractérisés par un "mélange par bouquet" et deux dispositifs caractérisés par un "mélange pied à pied". Nous souhaitions de cette façon disposer de conditions de compétition très variables aussi bien entre arbres d'une même espèce qu'entre arbres d'espèce différente. Au niveau des distributions en diamètre, la distribution des diamètres des chênes est en général plutôt irrégulière alors que celle des pins est plutôt régulière (figure 2).

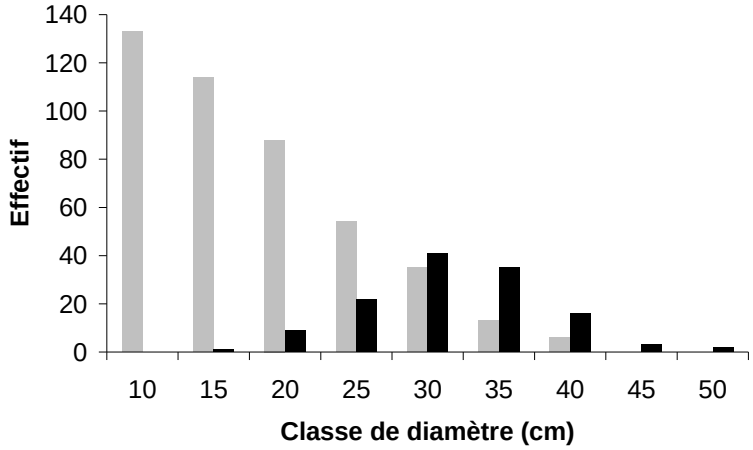


Figure 2 : répartition des tiges par classe de diamètre dans un des dispositifs (D49). En gris les chênes et en noir les pins.

Sur chacun de ces dispositifs, nous avons sélectionné 30 arbres par espèces selon leur taille et leur situation de compétition. Ces arbres ont été sondés en essayant d'atteindre le cœur. Les largeurs de cerne ont été mesurées à l'aide du logiciel Windendro (Regent, 2005). Au total, nous disposons de données de croissance sur 101 chênes et 116 pins. Ces données nous ont permis de connaître plus précisément l'âge des arbres. Il ressort d'une part que les arbres à l'intérieur d'une espèce ont tous à peu près le même âge et d'autre part qu'il peut exister un décalage plus ou moins important entre l'âge des chênes et l'âge des pins (figure 3). Pour la construction du modèle arbre dépendant des distances, nous avons utilisé la période de croissance 2000-2005, période pendant laquelle aucune intervention sylvicole n'a été réalisée sur ces dispositifs.

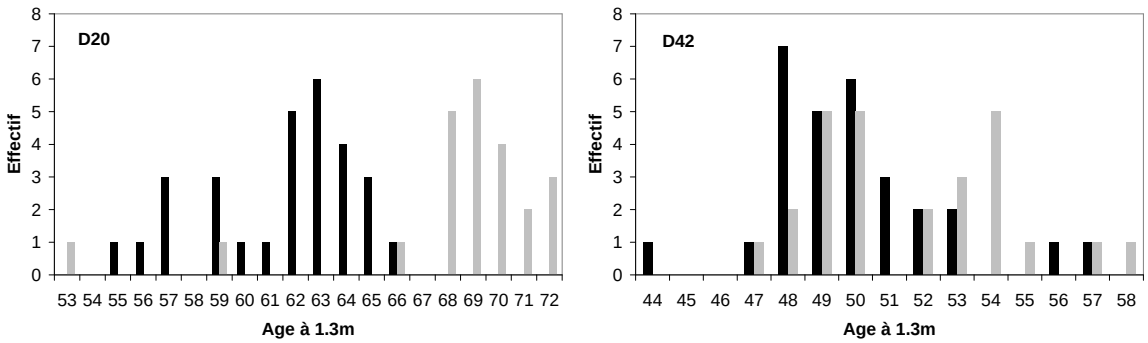


Figure 3 : Répartition des âges à 1,3m pour les arbres sondés dans deux dispositifs. En gris les chênes et en noir les pins. A gauche un dispositif où les pins ont environ 10 ans de moins que les chênes. A droite un dispositif où les chênes et les pins ont pratiquement le même âge.

2.3 Présentation du modèle et des résultats

2.3.1 Prise en compte des interactions intra et inter spécifique

Pour prendre en compte les interactions intra et interspécifiques, nous avons choisi d'utiliser un indice de compétition local[4] (Prévosto, 2005) sensé rendre compte de l'influence du voisinage local sur la croissance d'un arbre. Pour cela nous avons défini le voisinage d'un arbre par un disque de rayon r. Nous avons testé trois rayons de voisinage : 5, 10 et 15m. Nous avons également défini trois populations susceptibles d'influencer différemment la croissance d'un individu : (i) l'ensemble des arbres, (ii) uniquement les chênes du voisinage et (iii) uniquement les pins. Enfin, nous avons testé sept types d'indice de compétition (tableau 2), des indices symétriques traduisant plutôt une compétition pour les ressources du sol, et des indices asymétriques traduisant plutôt une compétition pour les ressources aériennes.

Indice calculé dans un disque de rayon r	Formule	Type
Nombre d'arbres voisins.	$\sum_{j \in v(i)} 1$	Symétrique
Surface terrière des arbres voisins.	$\sum_{j \in v(i)} g_j$	Symétrique
Somme des tailles des compétiteurs pondérées par la distance compétiteur et sujet.	$\sum_{j \in v(i)} \frac{d_j}{l_{ij}}$	Symétrique
Somme des rapports de taille entre compétiteurs et sujet pondérés par la distance compétiteur et sujet.	$\sum_{j \in v(i)} \frac{d_j}{d_i l_{ij}}$	Symétrique
La somme des angles α interceptant la largeur des troncs voisins à 1.3m (voir figure 4 pour une illustration)	$\sum_{j \in v(i)} \alpha_j$	Symétrique
Nombre d'arbres voisins plus gros que le sujet	$\sum_{\substack{j \in v(i) \\ d_j > d_i}} 1$	Asymétrique
Surface terrière des arbres voisins plus gros que le sujet	$\sum_{\substack{j \in v(i) \\ d_j > d_i}} g_j$	Asymétrique

[4] On parle d'indice de compétition mais en réalité ces indices peuvent traduire d'autres types d'interactions que la compétition en fonction de la façon de les introduire dans les modèles. Ils peuvent par exemple avoir un effet positif sur la croissance et mettre ainsi en évidence une relation de coopération entre essences.

Tableau 2 : Liste des indices de compétition testés. j = arbre appartenant au voisinage v(i) de l'arbre sujet i ; g_j = surface terrière d'un arbre voisin ; d_i = diamètre de l'arbre sujet ; d_j = diamètre d'un arbre voisin ; l_{ij} = distance entre un voisin et l'arbre sujet.

Au total nous avions donc 63 variables pour tester l'influence des interactions intra et interspécifiques sur la croissance.

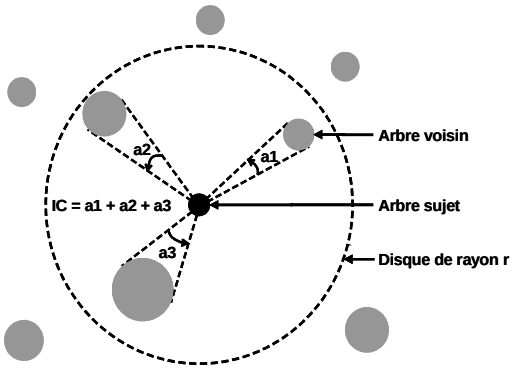


Figure 4 : représentation schématique de l'indice correspondant à la somme des angles interceptant la largeur des troncs voisins dans un disque de rayon r. Les disques pleins représentent les sections des troncs à 1,3m. IC = indice de compétition.

2.3.2 Forme du modèle spatialisé

Pour choisir la forme du modèle nous avons observé les accroissements en surface terrière (période 2000-2005) en fonction de la circonférence à 1,3m de l'année 1999 (figure 5).

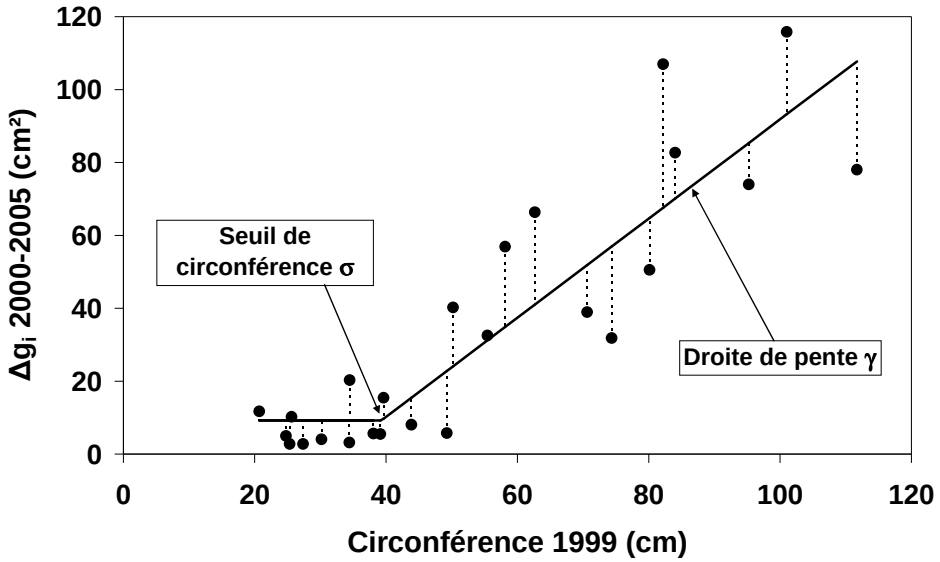


Figure 5 : Accroissements individuels en surface terrière (Δg_i) sur la période 2000-2005 en fonction de la circonférence 1999. Exemple du dispositif D02 pour le chêne. Le trait plein schématise la forme du modèle donnée par l'équation (1). Les barres verticales en pointillés représentent la partie non expliquée par le modèle.

Ceci nous a permis de mettre en évidence une relation forte entre ces deux variables, voisine de celle identifiée dans les peuplements purs de chêne (Dhôte *et al.*, 2000) ou de pin (Perot *et al.*, 2007). Nous avons repris la forme du modèle proposée par Dhôte *et al.* (2000) pour le chêne en peuplement régulier (équation 1) où g_i est la surface terrière, c_i la circonférence en cm, b, γ et σ les paramètres du modèle et ε_i la valeur résiduelle.

Si circonférence ≤ σ	Si circonférence > σ	
$\frac{\Delta g_i}{\Delta t} = b + \varepsilon_i$	$\frac{\Delta g_i}{\Delta t} = b + \gamma(c_i - \sigma) + \varepsilon_i$	(1)

Ce premier modèle est un modèle de croissance indépendant des distances. Or nous voyons sur la figure 5 qu'une partie de la variabilité de la croissance n'est pas expliquée par ce modèle ; une partie de cette variabilité résiduelle pourrait être expliquée par des interactions locales entre arbres et espèces. Nous avons donc intégré l'influence de ces interactions locale en ajoutant de manière additive l'indice de compétition local (équation 2) où IC_i est l'indice de compétition local. Ce nouveau modèle est donc un modèle dépendant des distances.

Si circonférence ≤ σ	Si circonférence > σ	
$\frac{\Delta g_i}{\Delta t} = \max[0, b + \alpha IC_i] + \varepsilon_i$	$\frac{\Delta g_i}{\Delta t} = \max[0, b + \gamma(c_i - \sigma) + \alpha IC_i] + \varepsilon_i$	(2)

Nous avons pris le même type de modèle pour le chêne et pour le pin. Il faut noter que pour le pin, il y a en général très peu d'observations pour la partie du modèle en dessous du seuil de circonférence σ.

2.3.3 Résultats et limites du modèle

Nous avons ajusté le modèle séparément pour le chêne et pour le pin. La figure 6 montre un exemple de résultat sur un dispositif. Pour sélectionner l'indice de compétition parmi les 63 possibilités présentées plus haut, nous avons classé les variables selon leur performance à expliquer la croissance et nous avons retenu la meilleure variable pour le chêne et pour le pin.

Les indices qui fournissent les meilleurs résultats sont ceux qui sont calculés dans un disque de rayon 10m. Pour le chêne il n'y a pas d'amélioration lorsque l'on distingue les essences dans le disque de voisinage. En revanche, pour le pin les indices les plus performants sont ceux pour lesquels le calcul prend en compte uniquement les pins du voisinage (tableau 3). Ceci signifie que, dans les peuplements étudiés, les pins entourés de pins subissent une compétition plus forte que les pins entourés de chênes.

	Rayon de voisinage	**Population prise compte pour le calcul de l'indice**	**Indice**
Chêne	10 m	L'ensemble des arbres dans le voisinage	La somme des angles interceptant la largeur des troncs à 1,3m
Pin	10 m	Les pins du voisinage	La somme des surfaces terrières

Tableau 3 : indices donnant les meilleurs résultats pour la croissance du chêne et du pin.

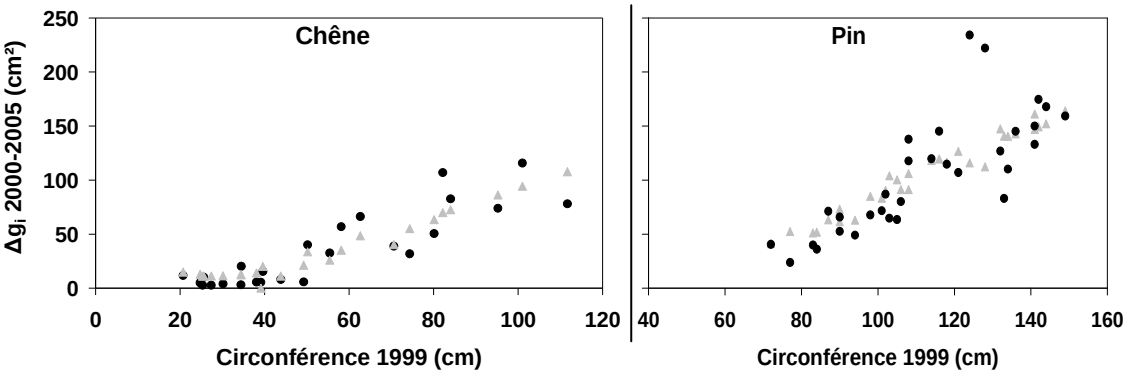


Figure 6 : Accroissements individuels en surface terrière (Δg_i) sur la période 2000-2005 en fonction de la circonférence 1999 : données observées et données prédites par le modèle arbre dépendant des distances sur le dispositif D20. Les points noirs sont les données observées et les triangles gris sont les données prédites.

Avec le modèle nous avons également testé s'il y avait une différence entre les dispositifs (tableau 4). Pour le chêne les résultats montrent un effet dispositif significatif qui joue sur la pente du modèle (paramètre γ) alors que pour le pin cet effet joue plutôt sur le seuil (paramètre σ). Etant donné le faible nombre de dispositifs il est difficile d'interpréter cet effet qui peut être dû à des différences de fertilité, mais également à des différences d'âge des arbres (les accroissements dans le jeune âge sont généralement plus importants).

Chêne		
Paramètre	Valeur	Ecart-type
γ D02	1,249	0,1647
γ D20	1,453	0,1819
γ D42	2,722	0,2704
γ D49	1,585	0,1354
σ	38,41	3,158
b	27,48	9,176
α	-12,28	5,673

Pin		
Paramètre	Valeur	Ecart-type
γ	1,719	0,1456
σ D02	36,292	8,313
σ D20	27,76	9,484
σ D42	22,02	7,569
σ D49	37,85	8,941
α	-0,00314	0,001305

Tableau 4 : Valeur des paramètres du modèle pour le chêne et pour le pin. Les paramètres sont tous significatif au seuil de 5%.

Ces résultats sont à relativiser d'une part parce que les indices de compétition locale retenus expliquent une faible part de la variabilité de la croissance observée (entre 2 et 3%) et d'autre part parce que le modèle est ajusté sur 4 dispositifs situés dans une gamme réduite de fertilité. En 2007, 5 nouveaux dispositifs ont été sondés dont 2 sont situés dans des gammes de fertilité différentes. Ces nouvelles données nous permettront non seulement de vérifier les premiers résultats sur les interactions intra et interspécifiques mais également de préciser l'influence de la fertilité et de l'âge sur les paramètres du modèle.

3 Exemple d'applications sous Capsis 4 à partir du modèle spatialisé

Le modèle que nous venons de présenter est un modèle simplifié qui a un domaine d'utilisation restreint (voir la discussion du paragraphe 3.4). Cependant, dans cette partie nous souhaitons illustrer l'intérêt de ce type de modèle par des exemples d'applications qui ont été réalisés sous la plate-forme informatique de simulation forestière Capsis (Coligny *et al.*, 2003 et http://coligny.free.fr/). Pour cela, nous partirons d'un cas réel dans une parcelle de la forêt domaniale d'Orléans puis nous présenterons deux grands types d'applications : des applications plutôt en rapport avec l'aménagement sur la production et le devenir du mélange et une application plutôt en rapport avec la sylviculture (stratégie de martelage).

3.1 Le peuplement initial : un cas réel

Pour les applications nous avons choisi le dispositif D49, l'un des dispositifs qui a servit à construire le modèle spatialisé. Ce dispositif est caractérisé par un mélange de type pied à pied (figure 7) avec des surfaces terrières en chêne et en pin relativement proches. Nous sommes dans le cas où il n'y a pas une essence prépondérante dans le peuplement.

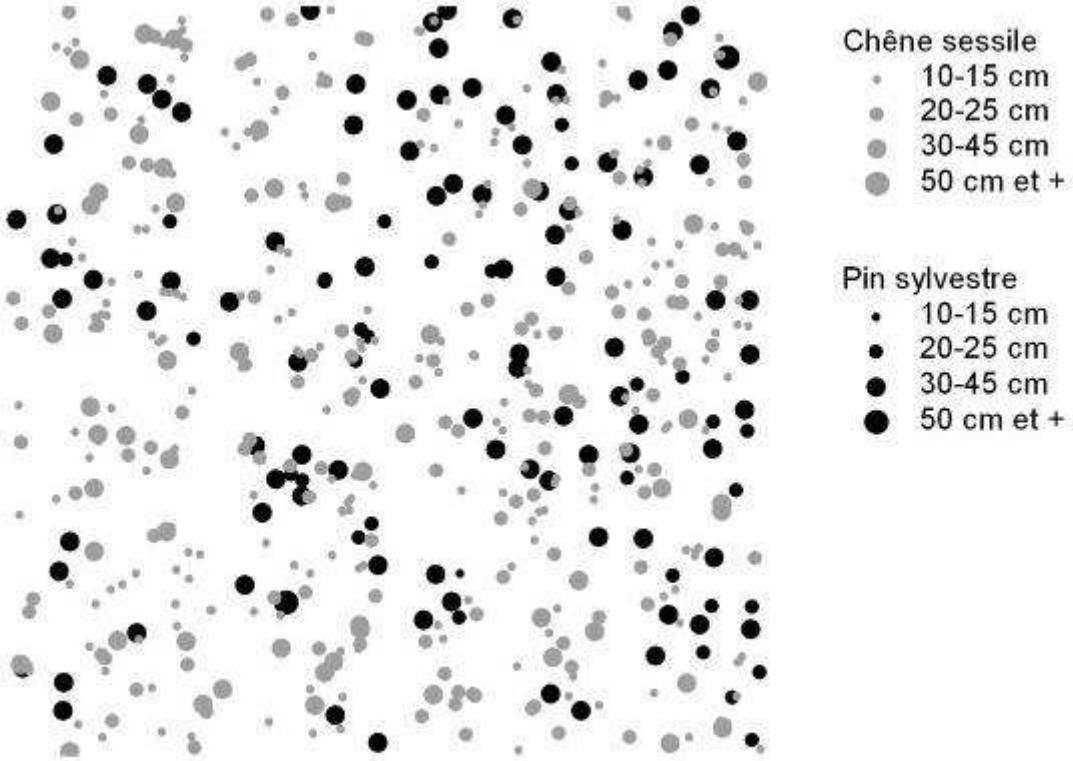


Figure 7 : Cartographie du dispositif D49 (1ha). En gris les chênes et en noir les pins. 10-15 cm = catégories de diamètre 10 et 15 cm.

Le tableau 5 donne les grandes caractéristiques dendrométriques du dispositif.

	Chêne	Pin
N (tiges/ha)	447	129
G (m²/ha)	13	11
Dg	19 cm	32 cm
Ddom	29 cm	34 cm
Age à 130cm*	67 ± 8	62 ± 6
Hdom	19.5 m	19.5 m

Tableau 5 : récapitulatif des caractéristiques du dispositif D49. (*) Ages mesurés sur un échantillon de 30 arbres par espèce. N = nombre de tiges ; G = surface terrière ; Dg = diamètre quadratique moyen ; Ddom = diamètre dominant ; Hdom = hauteur dominante.

On peut constater que le diamètre quadratique moyen des pins est supérieur à celui des chênes. De plus, les distributions des diamètres des deux essences sont très différentes (figure 2) avec une structure de type peuplement régulier pour le pin et une structure de type peuplement irrégulier pour le chêne.
En revanche, les chênes et les pins ont des âges à 1,3m très proches. Des mesures de hauteurs individuelles sur les arbres sondés (figure 8) ont permis de construire une relation entre la hauteur totale et le diamètre à 1,3 m. Nous avons utilisé cette relation pour estimer la hauteur correspondant au diamètre dominant de chaque espèce. Il ressort que les deux essences ont la même hauteur dominante, soit 19,5m.

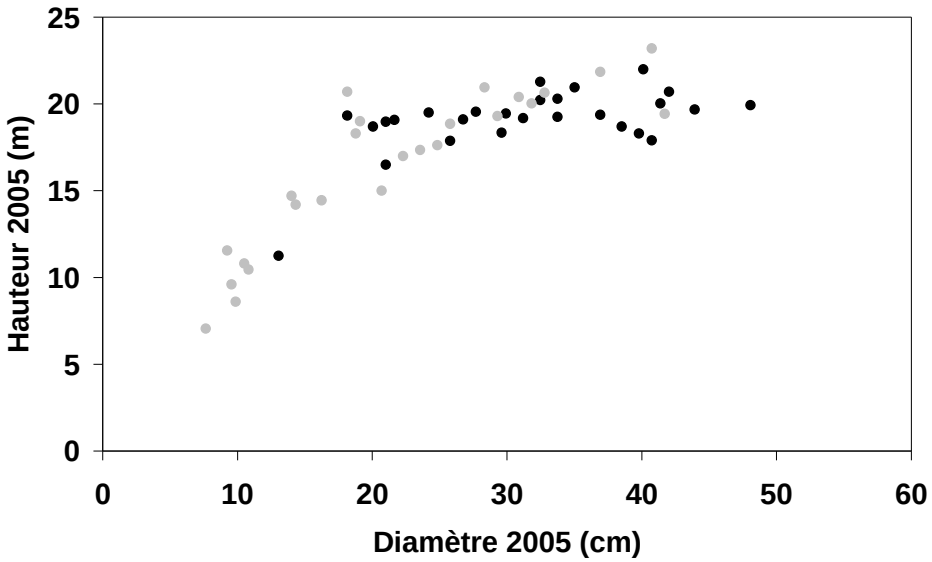


Figure 8 : Hauteur en fonction du diamètre à 1,3m pour les arbres échantillonnés du dispositif D49. Les points gris représentent les chênes et les points noirs les pins.

3.2 Applications sur la production et le devenir du mélange

Le dispositif que nous venons de présenter illustre bien un cas où la définition d'une seule essence objectif pose des difficultés, d'autant plus si la station ne permet pas de faire du chêne de très grande qualité. Pour bien intégrer ce type de parcelle dans un aménagement forestier il est nécessaire d'avoir des idées plus précises sur la production et le devenir du mélange.
Avec le modèle présenté dans la partie précédente nous avons fait une simulation sur 10 ans en utilisant les paramètres correspondant au dispositif D49 (tableau 4). Cette simulation nous permet d'estimer la production totale en surface terrière attendue pour ce dispositif et de la répartir entre le chêne et le pin. La production totale prédite par le modèle est de 0,55 m²/ha/an avec 0,19 m²/ha/an pour le pin et

0,36 m²/ha/an pour le chêne. Elle permet également de représenter les accroissements par classe de diamètre et par essence (figure 9). On peut ainsi constater que ce sont les chênes de la catégorie 20 cm qui contribuent le plus à la croissance en surface terrière du peuplement sur la période 2006-2015.

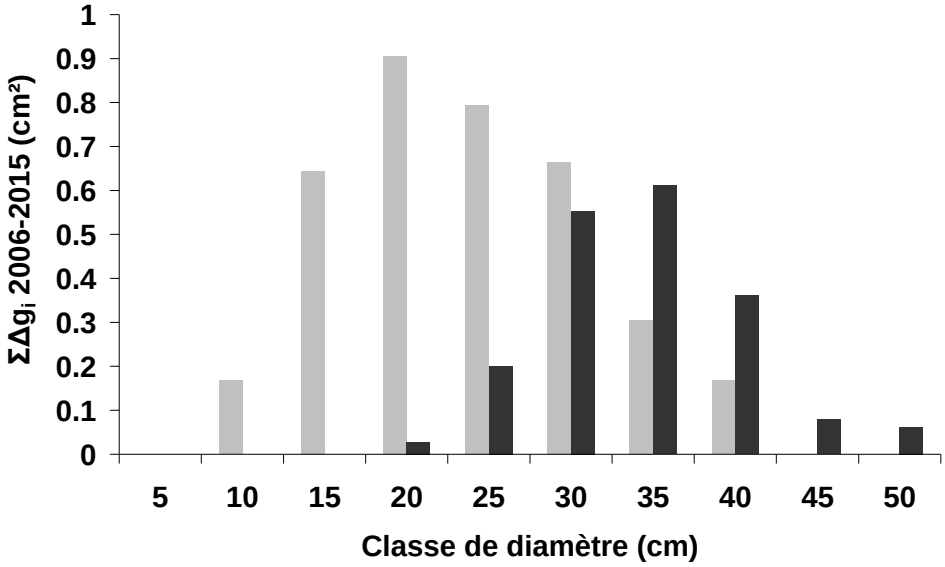


Figure 9 : Somme des accroissements en surface terrière ($\Sigma\Delta g_i$) par classe de diamètre sur 10 ans. Les barres grises représentent les chênes et les barres noires les pins.

Concernant le devenir du mélange, nous nous sommes basés sur les diamètres d'exploitabilité des deux essences. Dans le document d'aménagement du massif de Lorris le diamètre d'exploitabilité du chêne est de 65 cm (avec un âge total optimum fixé à 200 ans) et le diamètre d'exploitabilité du pin est de 50 cm (avec un âge total optimum fixé à 100 ans). En considérant ces informations et étant donné la différence actuelle entre le diamètre moyen des chênes et le diamètre moyen des pins (tableau 5) on peut se douter que les pins seront exploités avant les chênes. Le modèle peut nous permettre de préciser à partir de quand les pins seront exploitables. Pour cela nous avons fait une simulation sur une plus longue durée en essayant de reproduire les interventions réalisées dans ce type de peuplement, c'est-à-dire 1 éclaircie tous les 10 ans prélevant environ 25% de la surface terrière de chaque essence (figure 10).

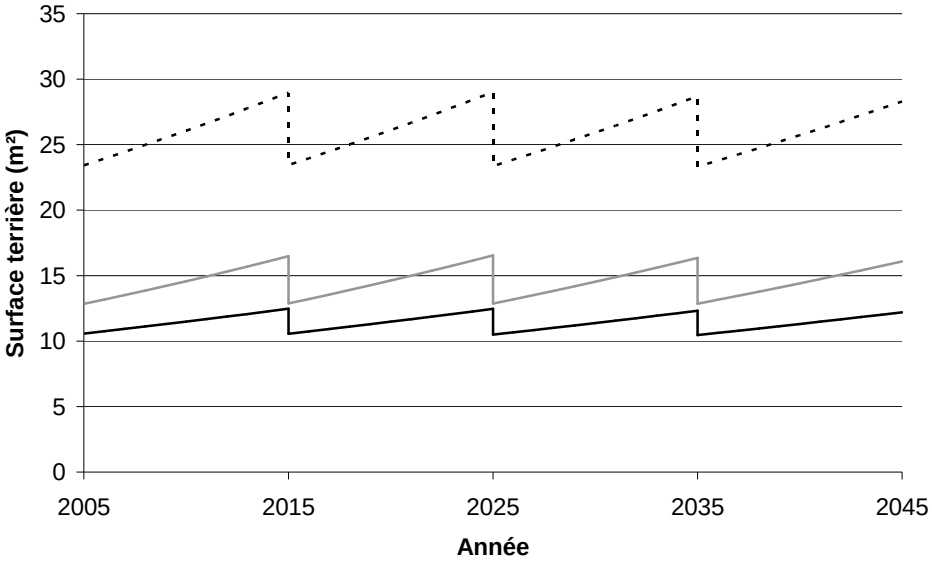


Figure 10 : Simulation sur 40 ans réalisée sous Capsis avec une éclaircie tous les 10 ans prélevant environ 25% de la surface terrière de chaque essence. En noir la surface terrière des pins, en gris celle des chênes et en pointillés la surface terrière totale.

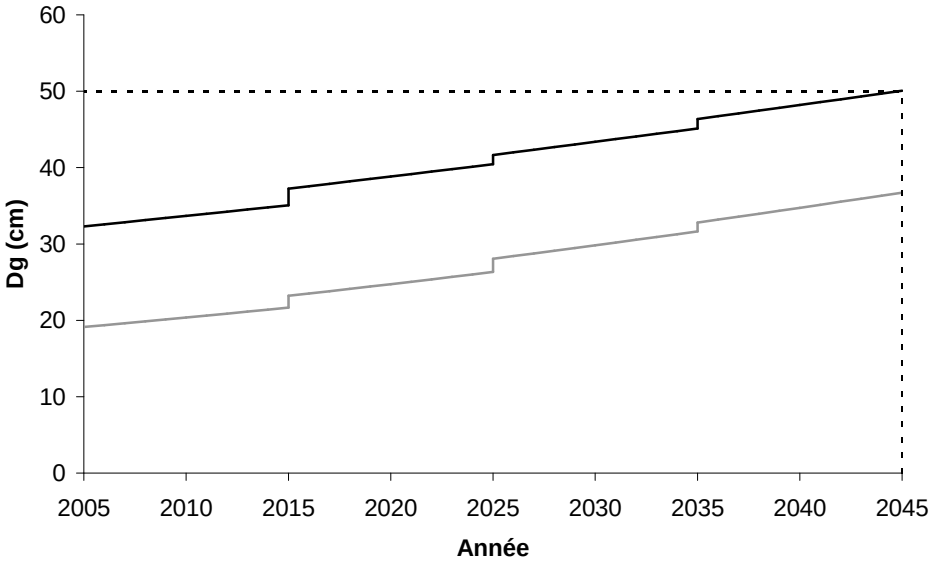


Figure 11 : Evolution du diamètre quadratique moyen Dg (cm) sur 40 ans. En noir le Dg des pins, en gris celui des chênes. La ligne en pointillés verticale représente l'année 2045. La ligne en pointillés horizontale représente un Dg de 50 cm.

En première approximation, la simulation montre que les pins atteindront un diamètre exploitable dans 40 ans (figure 11) avec 60 tiges/ha. Le chêne aurait alors un diamètre moyen quadratique de 37 cm. A ce stade de l'évolution du peuplement on peut choisir d'exploiter les pins en totalité et on aboutirait de cette façon à un peuplement pur de chêne relativement clair ayant une densité de 150 tiges/ha et une surface terrière de 16 m²/ha. On peut également se demander s'il n'est pas possible d'envisager un mode de gestion alternatif permettant de gérer les deux essences en mélange de façon durable. On pourrait, par exemple, étaler la récolte du peuplement final de pin et rechercher des environnements favorables à la régénération du pin et du chêne.

3.3 Application sur la stratégie de martelage

La phase de martelage dans les peuplements mélangés est délicate et demande une formation qui passe par des exercices pratiques de terrain. Un modèle arbre dépendant des distances peut servir de support à ces formations pour illustrer l'impact d'un martelage sur le peuplement. Ceci est déjà pratiqué dans les Alpes avec le modèle Samsara (Gauquelin *et al.*, ce numéro). On peut aussi vouloir tester de nouvelles stratégies de martelage. Par exemple, on peut se demander s'il est préférable de s'orienter vers un mélange par bouquet en favorisant la création d'îlots monospécifiques ou de s'orienter vers un mélange pied à pied. Pour illustrer cette question, nous sommes partis du dispositif D49 présenté plus haut et nous avons simulé deux éclaircies aboutissant à deux types de mélange différents (figure 12). Nous avons fait en sorte qu'après l'éclaircie, les surfaces terrières mais également les distributions des diamètres pour les deux essences soient identiques dans les deux stratégies. Seules les répartitions spatiales des tiges après éclaircie sont différentes.

Figure 12 : Simulation de deux stratégies de martelage sur le dispositif D49. A gauche la création d'îlots monospécifiques est favorisée. A droite le mélange pied à pied est favorisé. Dans les deux cas la même surface terrière est prélevée. Les chênes sont en gris et les pins en noir.

Nous avons volontairement réalisé une éclaircie très forte (environ 50% de la surface terrière totale) afin d'obtenir des répartitions spatiales bien contrastées. Ensuite nous avons simulé la croissance des arbres sur 20 ans en utilisant le modèle spatialisé et les paramètres du dispositif D49. D'après ce que nous avons montré dans la partie 2, les pins entourés de pins poussent moins que les pins entourés de chênes. On peut donc s'attendre à ce que le mélange pied à pied soit plus favorable à la croissance du pin. La figure 13 montre effectivement que la croissance en surface terrière des

pins est légèrement favorisée dans le cas du mélange pied à pied. En revanche, les deux stratégies aboutissent au même résultat pour le chêne.

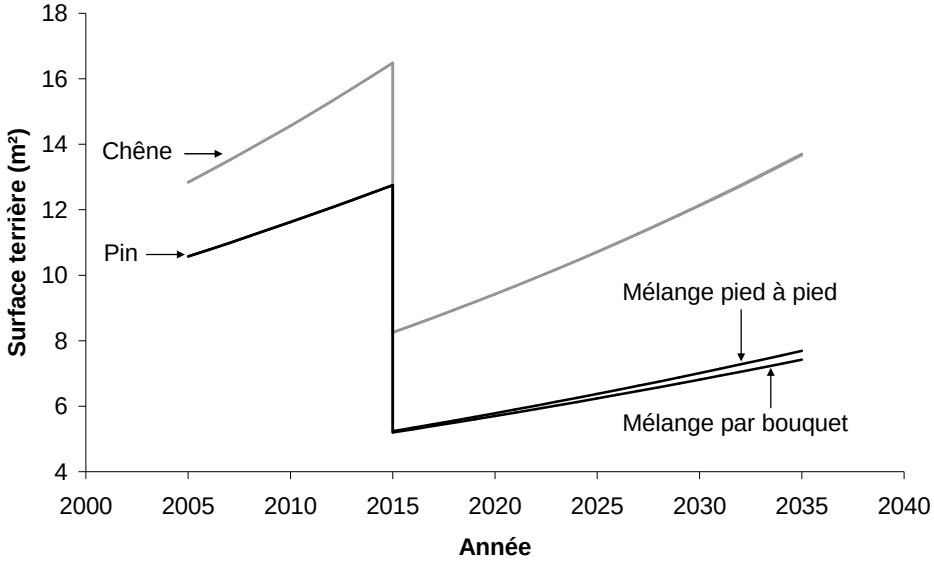


Figure 13 : Evolution de la surface terrière pour les deux stratégies : mélange par bouquet et mélange pied à pied. Les traits gris représentent le chêne et les traits noirs le pin.

Nous venons de voir sur cet exemple que le modèle spatialisé pouvait permettre de comparer, du point de vue de la production, deux stratégies de martelage aboutissant à des types de mélange différents. Les avantages et les inconvénients de ces deux stratégies pourraient également être évalués par rapport à d'autres aspects comme l'exploitation ou le renouvellement du peuplement.

3.4 Discussion sur l'utilisation du modèle spatialisé

Les exemples d'application que nous venons de présenter nous ont permis d'illustrer l'intérêt du modèle spatialisé. Dans le cas des applications sur la production et le devenir du mélange, nous aurions pu également utiliser un modèle qui ne nécessite pas de connaître la position des arbres dans le peuplement (modèle non spatialisé) donc moins contraignant pour l'utilisateur. Une comparaison entre les résultats de ces deux types de modèle nous permettrait d'évaluer l'intérêt de la spatialisation pour ce contexte d'utilisation. L'application sur le martelage, quant à elle, illustre bien une situation où la spatialisation est nécessaire. Cependant, nous avons pu comparer les stratégies uniquement sur l'aspect production car le modèle ne prend pas en compte le renouvellement et la mortalité.

Les résultats que nous obtenons avec ce modèle donnent de bonnes indications qualitatives et paraissent réalistes. Par exemple, nous avons estimé que le pin atteindrait un diamètre exploitable à environ 100 ans à 1,3 m ce qui est cohérent avec l'âge total optimum indiqué dans l'aménagement. Néanmoins, notre modèle spatialisé est adapté uniquement à quelques placettes (voir tableau 4). Cela signifie qu'il n'est pas vraiment possible d'utiliser le modèle pour des simulations à long terme ou dans d'autres situations de surface terrière ou de fertilité. Pour permettre une utilisation plus générale, le modèle doit être consolidé en étudiant grâce à de nouvelles données, l'impact de ces facteurs sur les paramètres du modèle.

Conclusion et perspectives

Le choix du niveau de détail d'un modèle de croissance peut avoir des implications importantes sur son utilisation. Ce choix est d'autant plus délicat lorsqu'on s'intéresse à des systèmes complexes comme les forêts mélangées. Pour essayer de répondre à cette question de façon objective, nous proposons de construire et de comparer une série de modèles simplifiés adaptés à la croissance des peuplements mélangés chêne sessile – pin sylvestre. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet d'étude en partenariat avec l'ONF. A partir de données de croissance obtenue par sondage, nous avons construit un premier modèle spatialisé qui nous a permis de préciser les interactions intra et interspécifiques. Cet outil est encore un prototype et il doit être consolidé pour envisager une utilisation dans un cadre plus générale. Pour illustrer ses potentialités, nous avons présenté des exemples d'applications réalisées avec le simulateur de croissance Capsis. Nous avons vu que le modèle pouvait apporter des informations sur la production et le devenir du mélange mais on peut se demander quel est l'apport de la spatialisation. La comparaison avec un modèle non spatialisé nous permettra d'apporter des éléments de réponse à cette question. Si l'on souhaite tester des sylvicultures assez fines à l'échelle de l'arbre, nous avons montré que le modèle spatialisé était un outil de réflexion intéressant. Comme notre modèle n'inclut pas le renouvellement des espèces, l'évaluation des stratégies de martelage reste partielle. Jusqu'à maintenant nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la croissance, mais des études sur la régénération sont en cours. Elles nous permettront de mieux comprendre les mécanismes de survie et de croissance des semis de pin ou de chêne et de pouvoir intégrer les connaissances sur la croissance et les connaissances sur la régénération dans un même outil d'aide à la gestion.

Remerciements

Le travail présenté dans cet article a bénéficié du soutien financier de l'Office National des Forêts. Nous remercions nos collègues permanents et temporaires qui ont participés à ce travail en particulier lors de la collecte des données. Nous remercions également les relecteurs de la *Revue forestière française* pour leurs commentaires constructifs.

Bibliographie

ANDREASSEN K. et TOMTER S.M. - Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. - *Forest Ecology and Management*, vol. 180, n° 1-3, 2003, pp. 11-24.

BOTKIN D.B., JANAK J.F. et WALLIS J.R. - Some ecological consequences of a computer model of forest growth. - *Journal of Ecology*, vol. 60, 1972, pp. 849-872.

BRETHES A. - Les types de station forestière de l'Orléanais. - Paris: Office National des Forêts, 1993. - 400 p.

BRUCIAMACCHIE M., GROUALLE C. et MINOT P. - Evolution Model in Populations of Unevenly-Aged Stands. - *Annales Des Sciences Forestieres*, vol. 48, n°2, 1991, pp. 215-224.

BUONGIORNO J., PEYRON J.L., HOULLIER F. et BRUCIAMACCHIE M. - Growth and Management of Mixed-Species, Uneven-Aged Forests in the French Jura - Implications for Economic Returns and Tree Diversity. - *Forest Science*, vol. 41, n°3, 1995, pp. 397-429.

COLIGNY F.D., ANCELIN P., CORNU G., COURBAUD B., DREYFUS P., GOREAUD F., GOURLET-FLEURY S., MEREDIEU C. et SAINT-ANDRE L. - CAPSIS : Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture : Advantages of a shared forest-modelling platform. - *International Workshop of IUFRO working party 4.01 "Reality, models and parameter estimation"*, 2003, pp. 319-323.

563 COURBAUD B. - Intérêt des modèles pour l`ingénierie écologique : exemples à partir du modèle de
564 dynamique des peuplements forestiers SAMSARA. - *Ingénieries*, vol. n° spécial Ingénierie
565 écologique, 2004, pp. 49-56.
566 DHÔTE J.F., HATSCH E. et RITTIE D. - Forme de la tige, tarifs de cubage et ventilation de la
567 production en volume chez le Chêne sessile. - *Annals of Forest Science*, vol. 57, n° 2, 2000, pp.
568 121-142.
569 DREYFUS P. - Dynamique du sapin, du hêtre et des pins dans l'arrière-pays méditerranéen : de la
570 modélisation à l'aide à la gestion. - *Revue Forestiere Francaise*, ce numéro
571 GAUQUELIN X., COURBAUD B., BERGER F., FAY J. et MERMIN E. - Conduite de peuplements
572 mélangés en forêt de montagne. Exemple d'un transfert chercheurs-gestionnaires. - *Revue*
573 *Forestiere Francaise*, ce numéro
574 GOREAUD F., COLIGNY F.D., COURBAUD B., DHOTE J.F., DREYFUS P. et PEROT T. - La
575 modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. - *VertigO*, vol. 6, n° 2, 2005, pp.
576 1-12.
577 HOULLIER F., BOUCHON J. et BIROT Y. - Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers
578 : état et perspectives. - *Revue Forestière Française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
579 MONSERUD R.A. et STERBA H. - A basal area increment model for individual trees growing in even-
580 and uneven-aged forest stands in Austria. - *Forest Ecology and Management*, vol. 80, n° 1-3, 1996,
581 pp. 57-80.
582 MORNEAU F., HERVE J.C. et DUPREZ C. - Les forêts mélangées en France métropolotaine. - *Revue*
583 *Forestiere Francaise*, ce numéro
584 NGO BIENG M.A. - Construction de modèles de structure spatiale permettant de simuler des
585 peuplements virtuels réalistes. Application aux peuplements mélangés Chêne sessile - Pin
586 sylvestre de la région Centre. - Nogent-sur-Vernisson: ENGREF-Cemagref, 2007. 183 p. (Thèse
587 de doctorat en Sciences Forestières).
588 ONF. - Aménagement forestier. Forêt domaniale d'Orléans. Massif de Lorris - Les Bordes. - Région
589 Centre - Département du Loiret: Office National des Forêts, 2004
590 OTTORINI J.M. et LE GOFF N. - Modélisation et simulation de la croissance individuelle en
591 peuplement du hêtre et du frêne. Convention GIP-ECOFOR / INRA., 2002. - 30p.
592 PEROT T. et GINISTY C. - Bilan et perspectives sur les modèles de croissance, de dynamique
593 forestière et de qualité des bois. - Nogent-sur-Vernisson: Cemagref, 2004. - 190p.
594 PEROT T., PERRET S., MEREDIEU C. et GINISTY C. - Prévoir la croissance et la production du Pin
595 sylvestre : le module Sylvestris sous Capsis 4. - *Revue Forestiere Francaise*, vol. 59, n° 1, 2007,
596 pp. 57-84.
597 PORTÉ A. et BARTELINK H.H. - Modelling mixed forest growth: a review of models for forest
598 management. - *Ecological Modelling*, vol. 150, n° 1-2, 2002, pp. 141-188.
599 PRETZSCH H., BIBER P. et DURSKY J. - The single tree-based stand simulator SILVA: construction,
600 application and evaluation. - *Forest Ecology and Management*, vol. 162, n° 1, 2002, pp. 3-21.
601 PRÉVOSTO B. - Les indices de compétition en foresterie : exemples d'utilisation, intérêts et limites. -
602 *Revue Forestiere Francaise*, vol. LVII, n° 5, 2005, pp. 413-430.
603 REGENT I. - Manual Windendro 2005a for tree-ring analysis: Université du Quebec à Chicoutimi,
604 2005. - 132 p.
605 TRASOBARES A., PUKKALA T. et MUNA J. - Growth and yield model for uneven-aged mixtures of
606 Pinus sylvestris L. and Pinus nigra Arn. in Catalonia, north-east Spain. - *Annals of Forest Science*,
607 vol. 61, n° 1, 2004, pp. 9-24.
608 ULRICH E., RENAUD J.P., NAGELEISEN L.M., FLOT J.L., DUMÉ G., BILGER I., COLIN E.,
609 FERRAND P., PEYRON J.L. et HAMZA N. - Les indicateurs de gestion durable des forêts
610 française - édition 2005: Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, IFN, 2006. - 148 p.
611 WYKOFF W.R. - A basal area increment model for individual conifers in the northern Rocky
612 Mountains. - *Forest Science*, vol. 36, n° 4, 1990, pp. 1077-1104.