

# 6 7 **Quels modèles de croissance pour les** 8 **peuplements mélangés ? Exemple du** 9 **mélange chêne sessile – pin sylvestre.**

10  
11 **Thomas PEROT, Cemagref Nogent-sur-Vernisson \***, François GOREAUD,  
12 Cemagref Clermont-Ferrand, Christian GINISTY, Cemagref Nogent-sur-Vernisson

13  
14 \* **Unité de recherche Ecosystèmes Forestiers**  
15 **Domaine des Barres, 45 290 Nogent-sur-Vernisson**  
16 **Tel 02 38 95 09 65, FAX 02 38 95 03 46 Mél : thomas.perot@cemagref.fr**  
17

## 18 **Summary**

19  
20 Mixed forests currently account for 50% of the French forest cover. Nonetheless,  
21 there are very few management aid tools in France relating to these stands. Growth  
22 model describe the development of stands over time and are able to simulate forestry  
23 practices – in this respect, they are very useful tools for planning operations and  
24 harvesting, or as aids in producing silvicultural guidelines. The purpose of this article  
25 is to present a specific issue raised by these models: the choice of the level of detail  
26 for a growth model. This choice can indeed have significant implications for the use  
27 of the model. So as to choose the level of detail, we propose building and comparing  
28 a series of simplified models. This method is applied to the growth of sessile oak /  
29 Scots pine stands in the context of a partnership between the French Forestry Board  
30 (ONF) and Cemagref. We sampled 101 oaks and 116 pines distributed in four  
31 experimental plots in the Orleans state forest for the purpose of studying radial  
32 increment. With this data, we built a first model – a distance-dependent tree model.  
33 With this model, we were able to specify the interaction between and within species.  
34 One finding was that pines surrounded by pines are at a disadvantage compared to  
35 those surrounded by oak. The model was integrated in a module of the Capsis forest  
36 simulation system. Starting from an actual stand, we conducted simulations that  
37 enabled us to quantify the production of the mixture and furthermore to provide  
38 information or input as to the future development of that combination. We also  
39 showed the relevance of the distant-dependent tree model for testing marking  
40 strategies on the scale of the individual tree. This work is a first step in building a  
41 family of models for sessile oak / Scots pine stands at various levels of detail. In the  
42 longer term, by comparing the various models in the family, we hope to identify the  
43 appropriate scale for one or several management issues. We will then be able to  
44 supplement this model by bringing regeneration into the equation so as to develop a  
45 comprehensive management aid tool for these mixtures.  
46

## 47 **Resumé**

48

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

55

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

59

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

66

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

77

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

84

85

## 86 Introduction

87  
88 Les peuplements mélangés couvrent une fraction importante de la surface forestière  
89 française (Morneau *et al.*, ce numéro) et leur proportion semble encore augmenter  
90 (Ulrich *et al.*, 2006). Aujourd'hui, de nombreuses questions se posent sur l'avenir de  
91 ces peuplements. La plupart de ces questions peuvent être regroupées en une  
92 question générale : Comment gérer les peuplements mélangés de façon durable ?  
93 Cette question est d'autant plus difficile que nous sommes dans un contexte où  
94 certaines demandes de la société (ex : demande en bois énergie) peuvent entrer en  
95 conflit avec d'autres enjeux de la gestion durable des forêts : conservation de la  
96 biodiversité, conservation des ressources du sol. Face à ce genre de situations les  
97 gestionnaires ont besoin d'outils leur permettant de mieux décrire les peuplements  
98 forestiers mélangés, de mieux prédire leur croissance et de tester des scénarios de  
99 gestion variés. Les modèles de croissance et de dynamique forestière sont des outils  
100 très intéressants pour répondre à ce besoin (Goreaud *et al.*, 2005). En effet, parce  
101 qu'ils permettent de tester et comparer différentes stratégies sylvicoles, ils peuvent  
102 être utiles à la mise au point de guides de sylviculture et, au niveau des  
103 aménagements forestiers, pour définir les objectifs et prévoir les travaux et récoltes  
104 par unité de gestion. Beaucoup de travaux récents ou anciens ont déjà été réalisés  
105 sur la modélisation des peuplements mélangés. On peut citer le premier modèle  
106 construit par Botkin *et al.* en 1972 pour l'étude de la dynamique de peuplements  
107 mélangés ou celui de Wykoff en 1990 pour l'aide à la décision et largement repris  
108 par la suite. En Europe, on peut citer les travaux de Monserud et Sterba (1996) en  
109 Autriche, Pretzsch *et al.* (2002) en Allemagne, Andreassen et Tomter (2003) en  
110 Norvège, Trasobares *et al.* (2004) en Espagne, etc.

111 En France, jusqu'à maintenant l'effort de construction de modèles de croissance a  
112 surtout porté sur les peuplements réguliers (Perot et Ginisty, 2004). Concernant les  
113 peuplements mélangés, quatre mélanges différents ont été modélisés : le mélange  
114 hêtre, sapin et épicéa dans le Jura (Buongiorno *et al.*, 1995; Bruciamacchie *et al.*,  
115 1991), le mélange sapin et épicéa dans les Alpes (Courbaud, 2004), le mélange  
116 frêne et hêtre dans le Nord-est (Ottorini et Le Goff, 2002), et le mélange hêtre, pin  
117 noir et sapin dans l'arrière-pays méditerranéen (Dreyfus, ce numéro). Ces travaux  
118 sont loin de couvrir l'ensemble des types de mélange que l'on peut rencontrer en  
119 France (Morneau *et al.*, ce numéro) et ne couvrent pas l'ensemble des régions  
120 géographiques. Il est donc nécessaire de poursuivre la construction de modèles pour  
121 mieux répondre aux demandes des gestionnaires ou des pouvoirs publics.

122  
123 Lors de la construction d'un modèle de croissance, le concepteur doit faire des choix  
124 en fonction des spécificités du peuplement, des données disponibles et des objectifs  
125 du modèle. Dans cet article, nous abordons la question du choix du niveau de détail  
126 des modèles. Ce choix conditionne fortement l'utilisation des modèles et nous  
127 montrons comment nous souhaitons répondre à cette question dans le contexte des  
128 peuplements mélangés chêne sessile - pin sylvestre de la région Centre. Puis nous  
129 présentons un modèle construit dans le cadre de cette démarche et des exemples  
130 d'applications réalisées avec un outil de simulation permettant d'illustrer l'intérêt de  
131 ce modèle.

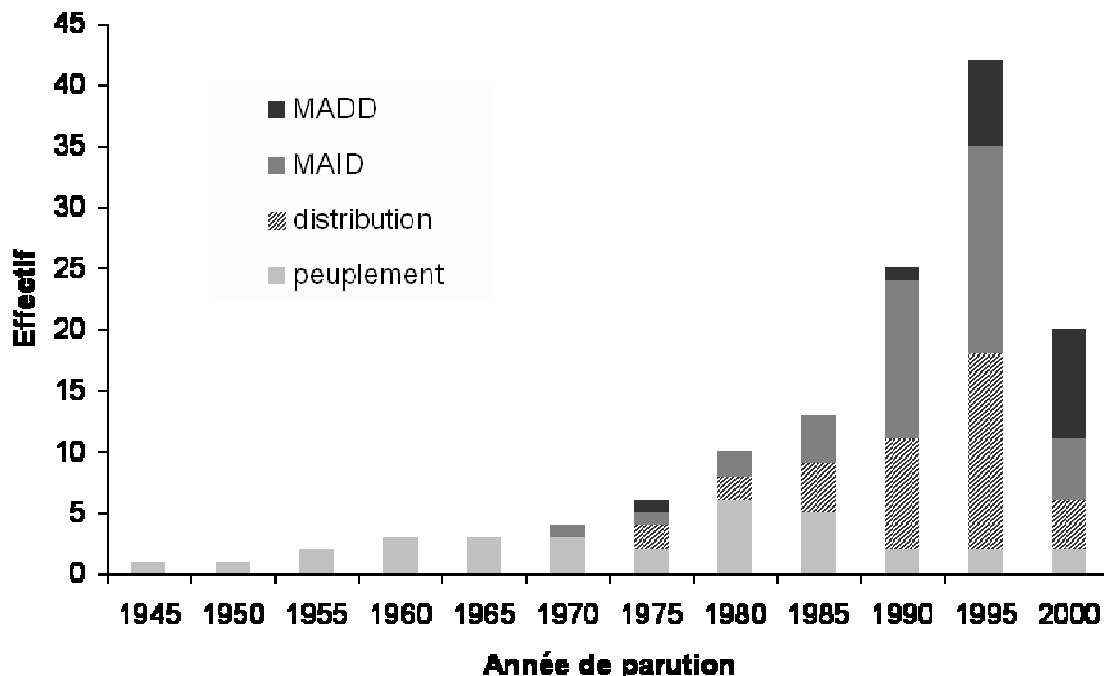
# 1 Quel niveau de détail choisir pour construire un modèle de croissance ?

## 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<sup>1</sup> : (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).




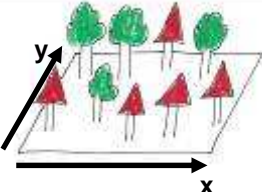
154 Figure 1 : Répartition des travaux de modélisation sur les peuplements mélangés par type de  
155 modèle et par année de parution d'après Porté et Bartelink (2002). Les années ont été  
156 regroupées par classe de 5 ans sauf pour la classe 2000 qui comprend 3 années (1998, 1999 et  
157 2000).  
158

<sup>1</sup> Voir Houllier *et al.* (1991) pour une typologie plus complète des modèles de croissance forestiers.

159 Les premiers modèles construits pour des peuplements mélangés étaient des  
 160 modèles peuplement et, à partir des années 1970, sont apparus les autres types de  
 161 modèle. L'émergence des modèles arbre dépendants des distances est récente,  
 162 plutôt début des années 1990 ; ils deviennent majoritaires dans la dernière période  
 163 1998-2000. Il y a donc une tendance vers la construction de modèles de plus en plus  
 164 détaillés. Si les questions posées par la société ont pu évoluer, le développement  
 165 des connaissances mathématiques et surtout l'amélioration de l'informatique  
 166 expliquent en partie cette évolution. Aujourd'hui, pour un objectif et des contraintes  
 167 donnés, on peut donc supposer qu'il est possible de construire des modèles ayant  
 168 des niveaux de détail différents. On peut alors légitimement se demander lequel de  
 169 ces modèles est le plus pertinent pour la question posée.

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

183

	<b>Modèle peuplement</b>	<b>Modèle arbre dépendant des distances</b>
		
<b>Description du peuplement</b>	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.
<b>Avantages</b>	- 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 détournage).
<b>Inconvénients</b>	- 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.

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

186

187 **1.3 Notre stratégie : comparer des modèles ayant différents**  
188 **niveaux de détail.**

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

199 **2 Un modèle de croissance spatialisé pour le mélange**  
200 **chêne – pin**

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

206 **2.1 Le mélange chêne pin en forêt domaniale d'Orléans**

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

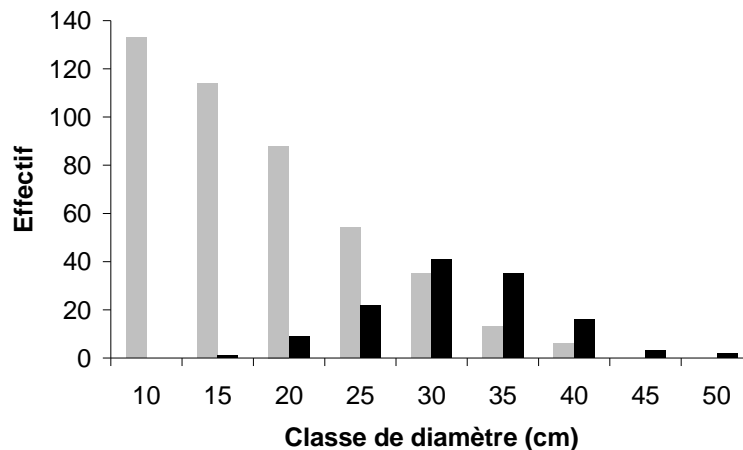
---

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> La robustesse du modèle est sa capacité à faire de bonne prédiction malgré la présence de données aberrantes.

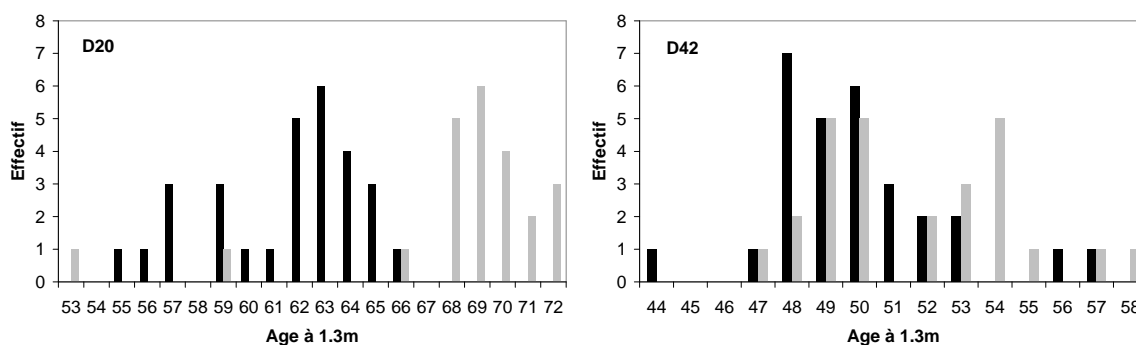
## 226 **2.2 Acquisition des données de croissance en surface terrière**

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



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

247 Sur chacun de ces dispositifs, nous avons sélectionné 30 arbres par espèces selon  
248 leur taille et leur situation de compétition. Ces arbres ont été sondés en essayant  
249 d'atteindre le cœur. Les largeurs de cerne ont été mesurées à l'aide du logiciel  
250 Windendro (Regent, 2005). Au total, nous disposons de données de croissance sur  
251 101 chênes et 116 pins. Ces données nous ont permis de connaître plus  
252 précisément l'âge des arbres. Il ressort d'une part que les arbres à l'intérieur d'une  
253 espèce ont tous à peu près le même âge et d'autre part qu'il peut exister un  
254 décalage plus ou moins important entre l'âge des chênes et l'âge des pins (figure 3).  
255 Pour la construction du modèle arbre dépendant des distances, nous avons utilisé la  
256 période de croissance 2000-2005, période pendant laquelle aucune intervention  
257 sylvicole n'a été réalisée sur ces dispositifs.



258  
259 **Figure 3 : Répartition des âges à 1,3m pour les arbres sondés dans deux dispositifs. En gris**  
260 **les chênes et en noir les pins. A gauche un dispositif où les pins ont environ 10 ans de moins**  
261 **que les chênes. A droite un dispositif où les chênes et les pins ont pratiquement le même âge.**

262 **2.3 Présentation du modèle et des résultats**

263 **2.3.1 Prise en compte des interactions intra et inter spécifique**

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

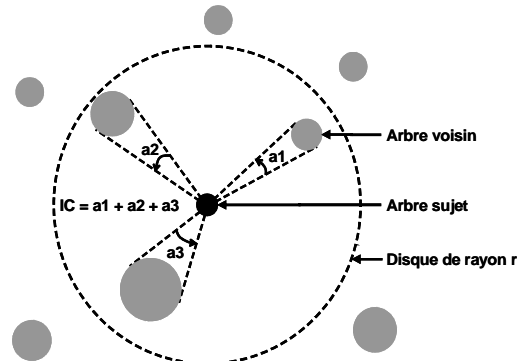
Indice calculé dans un disque de rayon r	Formule	Type
Nombre d'arbres voisins.	$\sum_{j \in v(i)} 1$	Symétrique
Surface terrière des arbres voisins.	$\sum_{j \in v(i)} g_j$	Symétrique
Somme des tailles des compétiteurs pondérées par la distance compétiteur et sujet.	$\sum_{j \in v(i)} \frac{d_j}{l_{ij}}$	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 $\alpha$ 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

<sup>4</sup> 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.



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

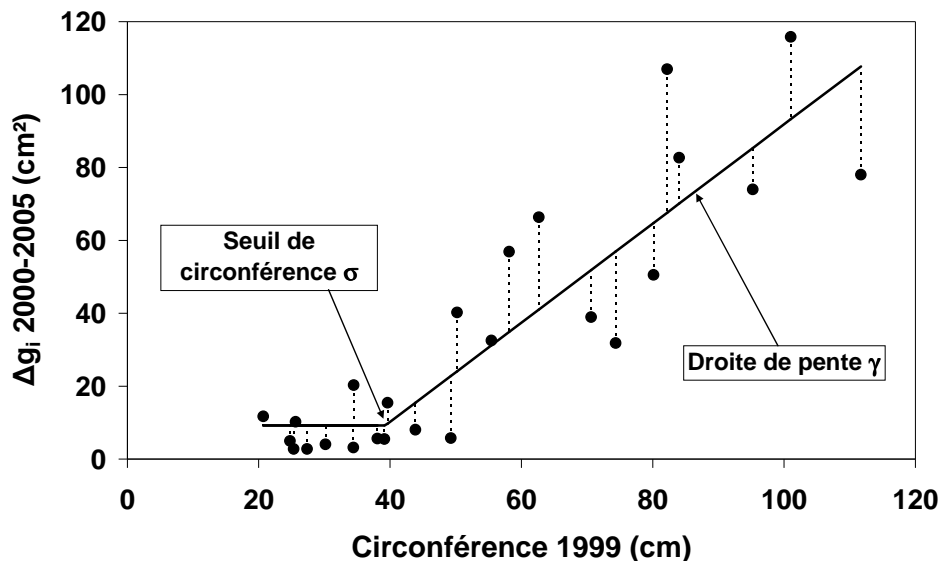
278  
 279 Au total nous avons donc 63 variables pour tester l'influence des interactions intra et  
 280 interspécifiques sur la croissance.



281  
 282 **Figure 4 : représentation schématique de l'indice correspondant à la somme des angles**  
 283 **interceptant la largeur des troncs voisins dans un disque de rayon  $r$ . Les disques pleins**  
 284 **représentent les sections des troncs à 1,3m. IC = indice de compétition.**

### 285 2.3.2 Forme du modèle spatialisé

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



289  
 290 **Figure 5 : Accroissements individuels en surface terrière ( $\Delta g_i$ ) sur la période 2000-2005 en**  
 291 **fonction de la circonférence 1999. Exemple du dispositif D02 pour le chêne. Le trait plein**  
 292 **schématise la forme du modèle donnée par l'équation (1). Les barres verticales en pointillés**  
 293 **représentent la partie non expliquée par le modèle.**

294  
 295 Ceci nous a permis de mettre en évidence une relation forte entre ces deux  
 296 variables, voisine de celle identifiée dans les peuplements purs de chêne (Dhôte *et*  
 297 *al.*, 2000) ou de pin (Perot *et al.*, 2007). Nous avons repris la forme du modèle  
 298 proposée par Dhôte *et al.* (2000) pour le chêne en peuplement régulier (équation 1)  
 299 où  $g_i$  est la surface terrière,  $c_i$  la circonférence en cm,  $b$ ,  $\gamma$  et  $\sigma$  les paramètres du  
 300 modèle et  $\varepsilon_i$  la valeur résiduelle.

301

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si circonférence} \leq \sigma \\ \frac{\Delta g_i}{\Delta t} = b + \varepsilon_i \end{array} \right| \left. \begin{array}{l} \text{Si circonférence} > \sigma \\ \frac{\Delta g_i}{\Delta t} = b + \gamma(c_i - \sigma) + \varepsilon_i \end{array} \right| (1)$$

302

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

310

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si circonférence} \leq \sigma \\ \frac{\Delta g_i}{\Delta t} = \max[0, b + \alpha IC_i] + \varepsilon_i \end{array} \right| \left. \begin{array}{l} \text{Si circonférence} > \sigma \\ \frac{\Delta g_i}{\Delta t} = \max[0, b + \gamma(c_i - \sigma) + \alpha IC_i] + \varepsilon_i \end{array} \right| (2)$$

311

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

### 315 2.3.3 Résultats et limites du modèle

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

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

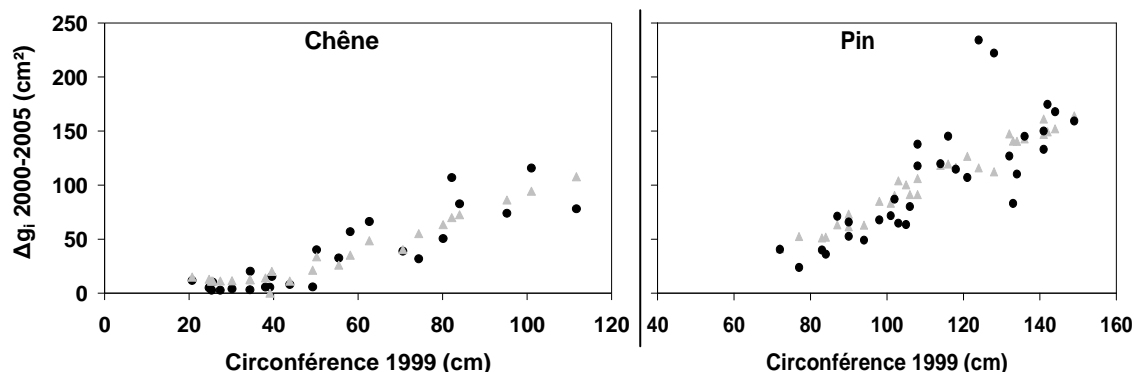
328

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

329

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

330



331  
332 **Figure 6 : Accroissements individuels en surface terrière ( $\Delta g_i$ ) sur la période 2000-2005 en**  
333 **fonction de la circonférence 1999 : données observées et données prédites par le modèle arbre**  
334 **dépendant des distances sur le dispositif D20. Les points noirs sont les données observées et**  
335 **les triangles gris sont les données prédites.**

336  
337 Avec le modèle nous avons également testé s'il y avait une différence entre les  
338 dispositifs (tableau 4). Pour le chêne les résultats montrent un effet dispositif  
339 significatif qui joue sur la pente du modèle (paramètre  $\gamma$ ) alors que pour le pin cet  
340 effet joue plutôt sur le seuil (paramètre  $\sigma$ ). Etant donné le faible nombre de dispositifs  
341 il est difficile d'interpréter cet effet qui peut être dû à des différences de fertilité, mais  
342 également à des différences d'âge des arbres (les accroissements dans le jeune âge  
343 sont généralement plus importants).  
344

Chêne		
Paramètre	Valeur	Écart-type
$\gamma$ D02	1,249	0,1647
$\gamma$ D20	1,453	0,1819
$\gamma$ D42	2,722	0,2704
$\gamma$ D49	1,585	0,1354
$\sigma$	38,41	3,158
b	27,48	9,176
$\alpha$	-12,28	5,673

Pin		
Paramètre	Valeur	Écart-type
$\gamma$	1,719	0,1456
$\sigma$ D02	36,292	8,313
$\sigma$ D20	27,76	9,484
$\sigma$ D42	22,02	7,569
$\sigma$ D49	37,85	8,941
$\alpha$	-0,00314	0,001305

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

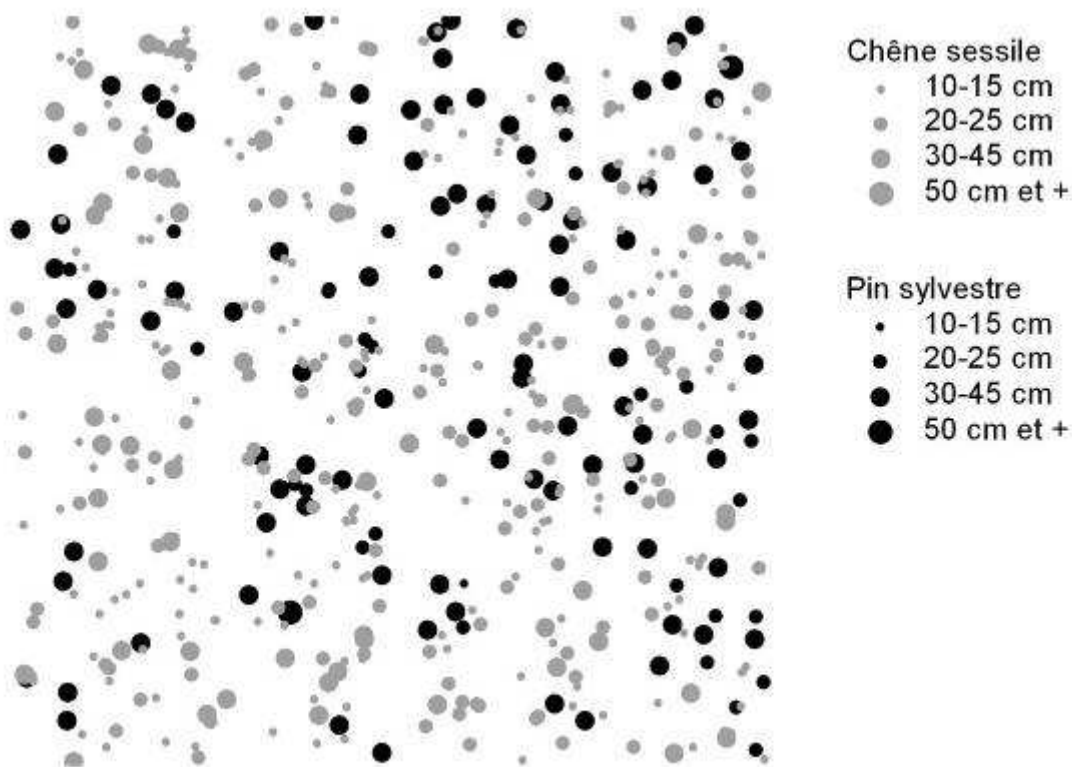
347  
348 Ces résultats sont à relativiser d'une part parce que les indices de compétition locale  
349 retenus expliquent une faible part de la variabilité de la croissance observée (entre 2  
350 et 3%) et d'autre part parce que le modèle est ajusté sur 4 dispositifs situés dans une  
351 gamme réduite de fertilité. En 2007, 5 nouveaux dispositifs ont été sondés dont 2  
352 sont situés dans des gammes de fertilité différentes. Ces nouvelles données nous  
353 permettront non seulement de vérifier les premiers résultats sur les interactions intra  
354 et interspécifiques mais également de préciser l'influence de la fertilité et de l'âge sur  
355 les paramètres du modèle.  
356

357 **3 Exemple d'applications sous Capsis 4 à partir du**  
358 **modèle spatialisé**

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

368 **3.1 Le peuplement initial : un cas réel**

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



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

377  
378 Le tableau 5 donne les grandes caractéristiques dendrométriques du dispositif.

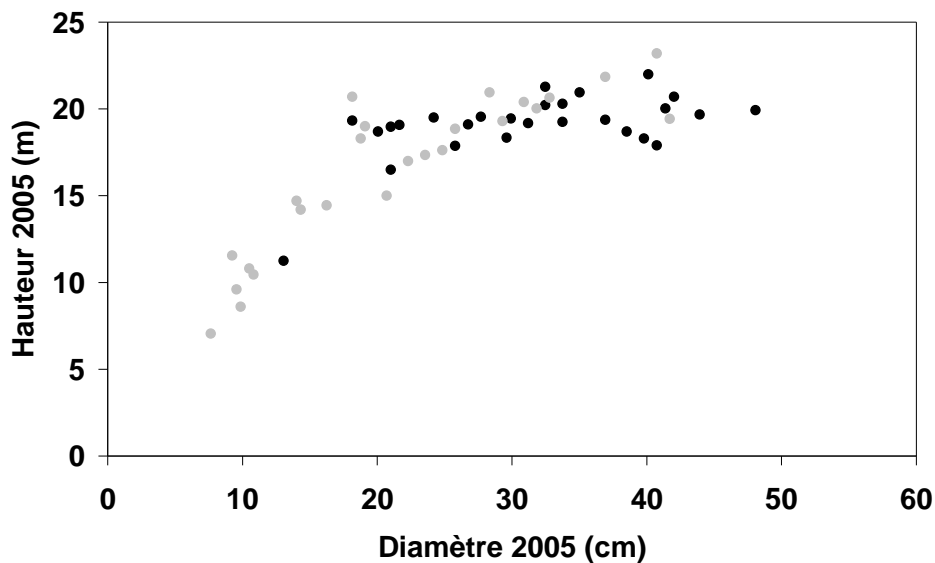
379  
380  
381

	Chêne	Pin
N (tiges/ha)	447	129
G (m <sup>2</sup> /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

382 **Tableau 5 : récapitulatif des caractéristiques du dispositif D49. (\*) Ages mesurés sur un**  
 383 **échantillon de 30 arbres par espèce. N = nombre de tiges ; G = surface terrière ; Dg = diamètre**  
 384 **quadratique moyen ; Ddom = diamètre dominant ; Hdom = hauteur dominante.**  
 385

386 On peut constater que le diamètre quadratique moyen des pins est supérieur à celui  
 387 des chênes. De plus, les distributions des diamètres des deux essences sont très  
 388 différentes (figure 2) avec une structure de type peuplement régulier pour le pin et  
 389 une structure de type peuplement irrégulier pour le chêne.

390 En revanche, les chênes et les pins ont des âges à 1,3m très proches. Des mesures  
 391 de hauteurs individuelles sur les arbres sondés (figure 8) ont permis de construire  
 392 une relation entre la hauteur totale et le diamètre à 1,3 m. Nous avons utilisé cette  
 393 relation pour estimer la hauteur correspondant au diamètre dominant de chaque  
 394 espèce. Il ressort que les deux essences ont la même hauteur dominante, soit  
 395 19,5m.



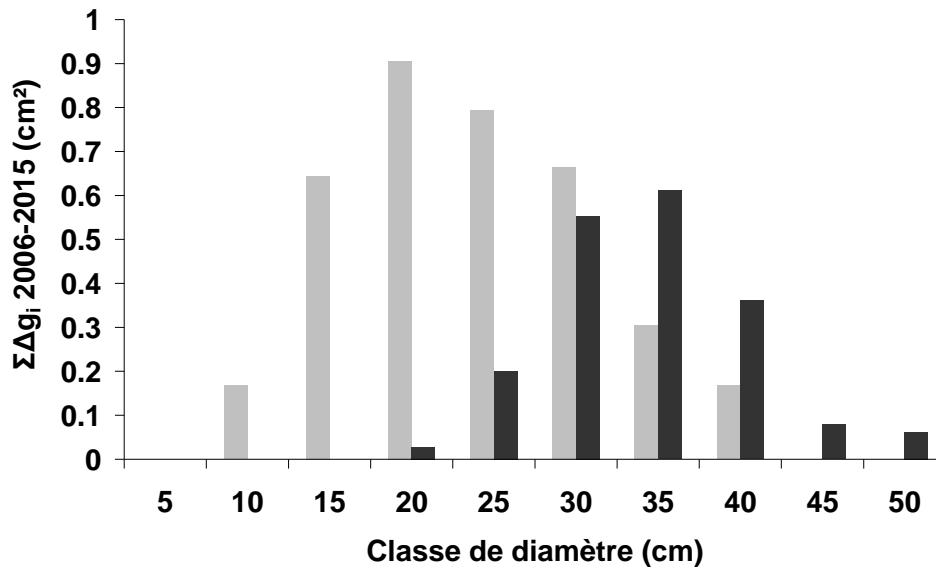
396 **Figure 8 : Hauteur en fonction du diamètre à 1,3m pour les arbres échantillonnés du dispositif**  
 397 **D49. Les points gris représentent les chênes et les points noirs les pins.**  
 398

### 399 **3.2 Applications sur la production et le devenir du mélange**

400 Le dispositif que nous venons de présenter illustre bien un cas où la définition d'une  
 401 seule essence objectif pose des difficultés, d'autant plus si la station ne permet pas  
 402 de faire du chêne de très grande qualité. Pour bien intégrer ce type de parcelle dans  
 403 un aménagement forestier il est nécessaire d'avoir des idées plus précises sur la  
 404 production et le devenir du mélange.

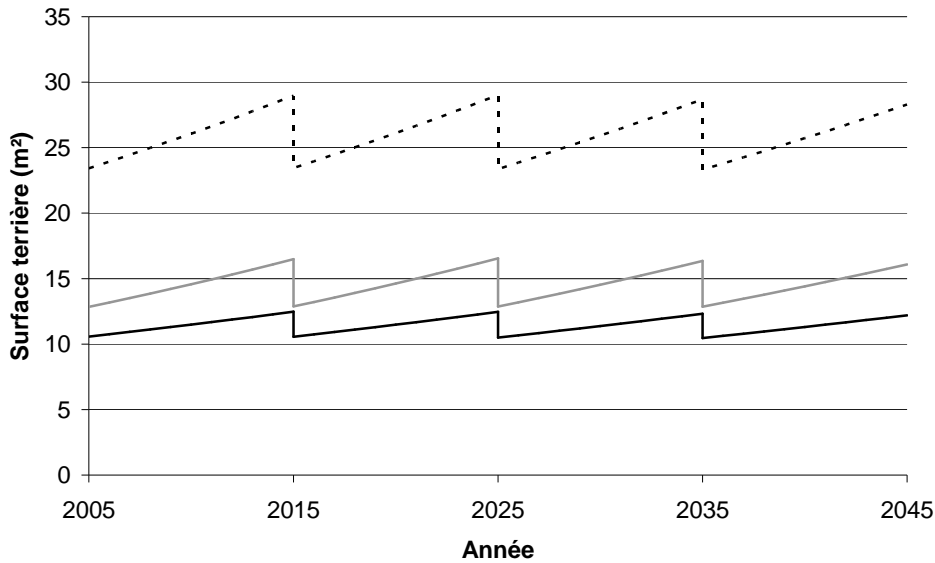
405 Avec le modèle présenté dans la partie précédente nous avons fait une simulation  
 406 sur 10 ans en utilisant les paramètres correspondant au dispositif D49 (tableau 4).  
 407 Cette simulation nous permet d'estimer la production totale en surface terrière  
 408 attendue pour ce dispositif et de la répartir entre le chêne et le pin. La production  
 409 totale prédite par le modèle est de 0,55 m<sup>2</sup>/ha/an avec 0,19 m<sup>2</sup>/ha/an pour le pin et

410 0,36 m<sup>2</sup>/ha/an pour le chêne. Elle permet également de représenter les  
 411 accroissements par classe de diamètre et par essence (figure 9). On peut ainsi  
 412 constater que ce sont les chênes de la catégorie 20 cm qui contribuent le plus à la  
 413 croissance en surface terrière du peuplement sur la période 2006-2015.

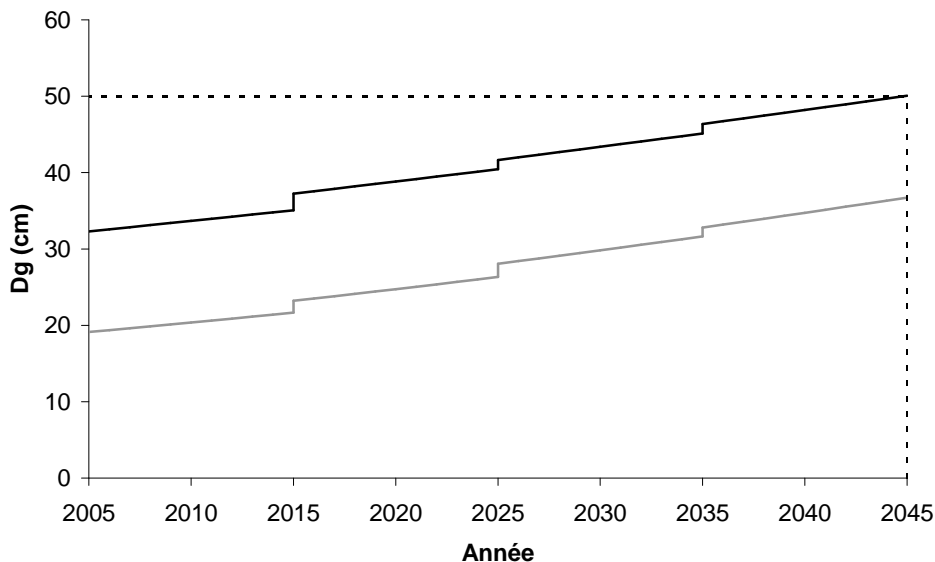


414  
 415 **Figure 9 : Somme des accroissements en surface terrière (ΣΔg<sub>j</sub>) par classe de diamètre sur 10**  
 416 **ans. Les barres grises représentent les chênes et les barres noires les pins.**

417  
 418 Concernant le devenir du mélange, nous nous sommes basés sur les diamètres  
 419 d'exploitabilité des deux essences. Dans le document d'aménagement du massif de  
 420 Lorris le diamètre d'exploitabilité du chêne est de 65 cm (avec un âge total optimum  
 421 fixé à 200 ans) et le diamètre d'exploitabilité du pin est de 50 cm (avec un âge total  
 422 optimum fixé à 100 ans). En considérant ces informations et étant donné la  
 423 différence actuelle entre le diamètre moyen des chênes et le diamètre moyen des  
 424 pins (tableau 5) on peut se douter que les pins seront exploités avant les chênes. Le  
 425 modèle peut nous permettre de préciser à partir de quand les pins seront  
 426 exploitables. Pour cela nous avons fait une simulation sur une plus longue durée en  
 427 essayant de reproduire les interventions réalisées dans ce type de peuplement, c'est-  
 428 à-dire 1 éclaircie tous les 10 ans prélevant environ 25% de la surface terrière de  
 429 chaque essence (figure 10).



430  
 431 **Figure 10 : Simulation sur 40 ans réalisée sous Capsis avec une éclaircie tous les 10 ans**  
 432 **prélevant environ 25% de la surface terrière de chaque essence. En noir la surface terrière des**  
 433 **pins, en gris celle des chênes et en pointillés la surface terrière totale.**



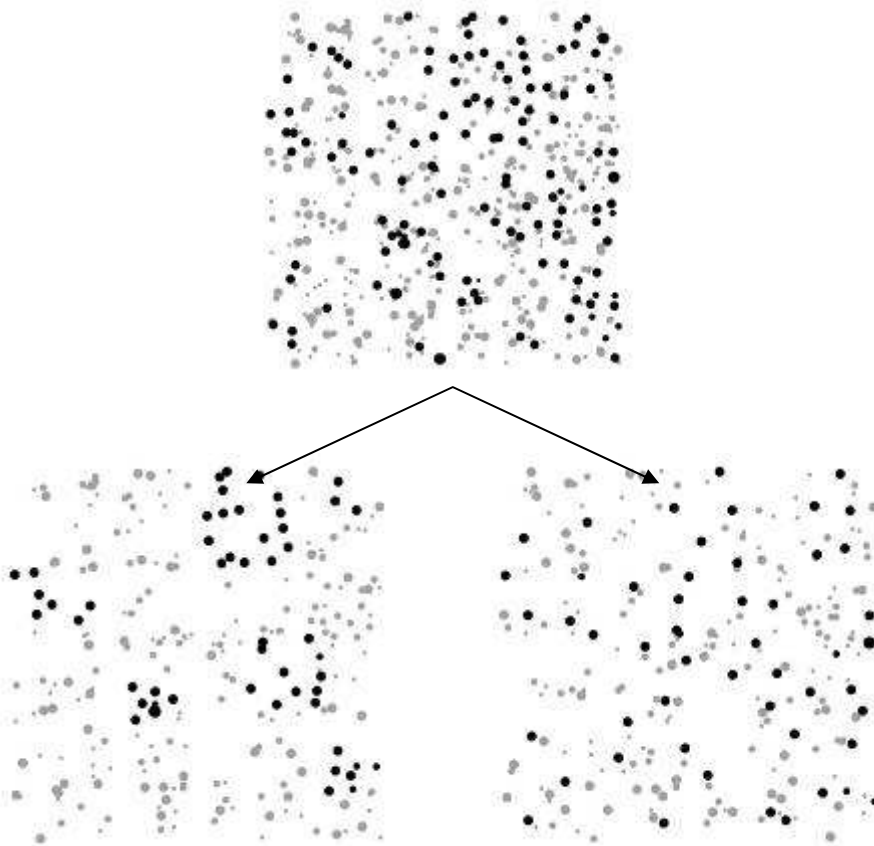
434  
 435 **Figure 11 : Evolution du diamètre quadratique moyen Dg (cm) sur 40 ans. En noir le Dg des**  
 436 **pins, en gris celui des chênes. La ligne en pointillés verticale représente l'année 2045. La ligne**  
 437 **en pointillés horizontale représente un Dg de 50 cm.**  
 438

439 En première approximation, la simulation montre que les pins atteindront un diamètre  
 440 exploitable dans 40 ans (figure 11) avec 60 tiges/ha. Le chêne aurait alors un  
 441 diamètre moyen quadratique de 37 cm. A ce stade de l'évolution du peuplement on  
 442 peut choisir d'exploiter les pins en totalité et on aboutirait de cette façon à un  
 443 peuplement pur de chêne relativement clair ayant une densité de 150 tiges/ha et une  
 444 surface terrière de 16 m<sup>2</sup>/ha. On peut également se demander s'il n'est pas possible  
 445 d'envisager un mode de gestion alternatif permettant de gérer les deux essences en  
 446 mélange de façon durable. On pourrait, par exemple, étaler la récolte du peuplement  
 447 final de pin et rechercher des environnements favorables à la régénération du pin et  
 448 du chêne.

### 449 **3.3 Application sur la stratégie de martelage**

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

464  
465  
466

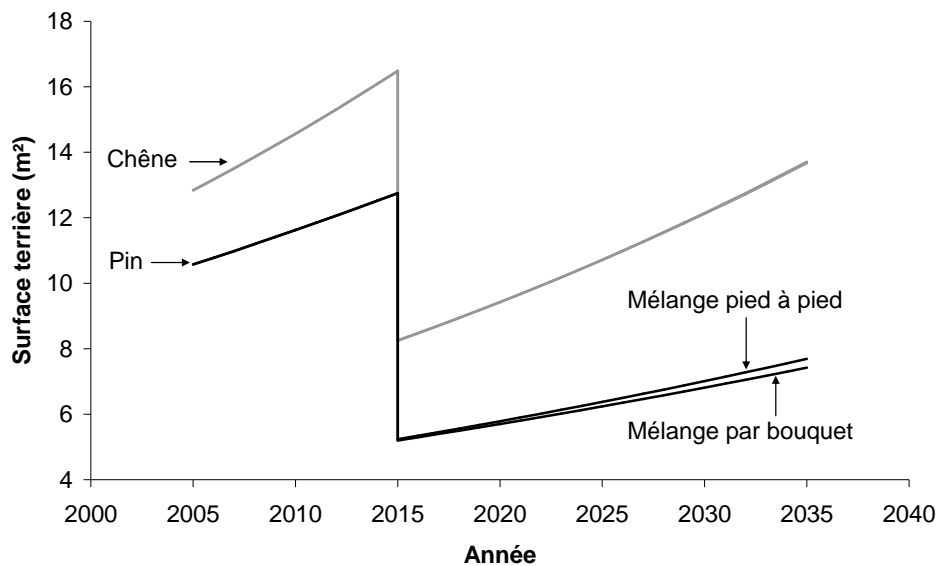


467  
468 **Figure 12 : Simulation de deux stratégies de martelage sur le dispositif D49. A gauche la**  
469 **création d'îlots monospécifiques est favorisée. A droite le mélange pied à pied est favorisé.**  
470 **Dans les deux cas la même surface terrière est prélevée. Les chênes sont en gris et les pins en**  
471 **noir.**

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



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



481  
482 **Figure 13 : Evolution de la surface terrière pour les deux stratégies : mélange par bouquet et**  
483 **mélange pied à pied. Les traits gris représentent le chêne et les traits noirs le pin.**  
484 Nous venons de voir sur cet exemple que le modèle spatialisé pouvait permettre de  
485 comparer, du point de vue de la production, deux stratégies de martelage  
486 aboutissant à des types de mélange différents. Les avantages et les inconvénients  
487 de ces deux stratégies pourraient également être évalués par rapport à d'autres  
488 aspects comme l'exploitation ou le renouvellement du peuplement.

### 489 **3.4 Discussion sur l'utilisation du modèle spatialisé**

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

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

509  
510  
511

## 512 **Conclusion et perspectives**

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

## 537 **Remerciements**

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

## 544 **Bibliographie**

- 545  
546 ANDREASSEN K. et TOMTER S.M. - Basal area growth models for individual trees of Norway spruce,  
547 Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. - *Forest Ecology and Management*, vol. 180, n°  
548 1-3, 2003, pp. 11-24.
- 549 BOTKIN D.B., JANAK J.F. et WALLIS J.R. - Some ecological consequences of a computer model of  
550 forest growth. - *Journal of Ecology*, vol. 60, 1972, pp. 849-872.
- 551 BRETHES A. - Les types de station forestière de l'Orléanais. - Paris: Office National des Forêts, 1993.  
552 - 400 p.
- 553 BRUCIAMACCHIE M., GROUALLE C. et MINOT P. - Evolution Model in Populations of Unevenly-  
554 Aged Stands. - *Annales Des Sciences Forestieres*, vol. 48, n°2, 1991, pp. 215-224.
- 555 BUONGIORNO J., PEYRON J.L., HOULLIER F. et BRUCIAMACCHIE M. - Growth and Management  
556 of Mixed-Species, Uneven-Aged Forests in the French Jura - Implications for Economic Returns  
557 and Tree Diversity. - *Forest Science*, vol. 41, n°3, 1995, pp. 397-429.
- 558 COLIGNY F.D., ANCELIN P., CORNU G., COURBAUD B., DREYFUS P., GOREAUD F., GOURLET-  
559 FLEURY S., MEREDIEU C. et SAINT-ANDRE L. - CAPSIS : Computer-Aided Projection for  
560 Strategies In Silviculture : Advantages of a shared forest-modelling platform. - *International  
561 Workshop of IUFRO working party 4.01 "Reality, models and parameter estimation"*, 2003, pp. 319-  
562 323.

- 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 Forestière Française*, 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 *Forestière Française*, 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 métropolitaine. - *Revue*  
583 *Forestière Française*, 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 Forestière Française*, 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 Forestière Française*, vol. LVII, n° 5, 2005, pp. 413-430.
- 603 REGENT I. - Manual Windendro 2005a for tree-ring analysis: Université du Québec 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.