OPTIMISATION DES RÉGIMES D'ÉCLAIRCIE COMMERCIALE DANS LES PINÈDES À PIN BLANC ET PIN ROUGE

Projet réalisé par :

Pascale Sabbagh, M. Sc.

François Lorenzetti, Ph. D.

Régis Pouliot, Tech. Inf.

Frédérik Doyon, Ph. D., ing. f.

Philippe Nolet, M. Sc.

présenté à:

Louisiana Pacific Ltée

Bowater Produits Forestiers du Canada Inc.

Les Entreprises Davidson Inc.

Corporation de gestion de la Forêt de l'Aigle

et

MRN, Unité de gestion 73-74

Mai 2003

Résumé

Depuis la mise en application du nouveau Manuel d'Aménagement Forestier, les pinèdes du Québec doivent être aménagées selon un système équienne par coupes d'éclaircie suivies d'une coupe progressive d'ensemencement à 120 ou 140 ans. Or il n'existe actuellement aucun outil permettant de déterminer si les régimes d'éclaircie appliqués sont optimaux, ni du point de vue du rendement en volume, ni du point de vue économique. Dans ce contexte, les objectifs de la présente étude étaient les suivants :

- Développer, pour le pin blanc et le pin rouge, des modèles de croissance spatialement explicites à l'échelle de l'arbre et basés sur la compétition ;
- Développer un simulateur de croissance de peuplements à partir des modèles précédents ;
- Coupler ce simulateur de croissance à un optimisateur de régime d'éclaircie pour maximiser une variable d'intérêt (valeur économique actuelle nette, volume, etc.).

Des modèles de croissance ont été établis à partir de mesures réalisées sur des tiges-sujets et des tiges compétitrices de pin blanc et de pin rouge situées sur le territoire de la Forêt de l'Aigle. Pour chaque essence, une partie des tiges-sujets avaient subi une éclaircie en 1997 tandis que l'autre partie des tiges-sujets n'avaient pas été éclaircies. L'environnement de compétition et la croissance des dix dernières années ont été mesurés pour chaque tige-sujet. Les modèles développés prédisent la croissance en diamètre avant et après éclaircie en fonction d'indices de compétition spatiaux. Ces modèles ont été inclus dans un simulateur permettant de faire croître sur un horizon de 100 ans les tiges individuelles d'un peuplement virtuel possédant des attributs de structure semblables à ceux d'un peuplement réel initialement âgé de 100 ans. Des fonctions de mortalité ont été incluses dans le simulateur.

Le couplage du simulateur avec un algorithme d'optimisation a permis de déterminer, parmi des milliers de régimes d'éclaircie possibles, les régimes produisant le volume de sciage de pin blanc le plus élevé. Les variables à optimiser étaient le nombre d'éclaircies, le moment de chaque éclaircie, le moment de la coupe finale ainsi que les pourcentages récoltés dans les petites et les grosses tiges à chaque éclaircie.

Les séquences d'optimisation réalisées avec un nombre d'éclaircies imposé au couple simulateur-optimisateur montrent qu'il existe plusieurs solutions optimales produisant des rendements relativement similaires. Ces résultats sont prometteurs puisqu'ils permettent d'envisager une certaine flexibilité au niveau de l'aménagement. L'intérêt de l'optimisateur est mis en évidence par les résultats de simulations obtenus sans y avoir recours : par exemple, le régime d'éclaircie actuellement en vigueur à la Forêt de l'Aigle, lorsqu'on l'applique à un peuplement virtuel, produit un volume de sciage de pin blanc largement inférieur à ceux obtenus par optimisation.

Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce au Programme de Mise en Valeur des Ressources du Milieu Forestier (Volet I) du Ministère des Ressources naturelles, avec l'appui de la Corporation de Gestion de la Forêt de l'Aigle (CGFA), Louisiana Pacific Ltée, Bowater Produits Forestiers du Canada Inc. et Les Entreprises Davidson Inc.

Nous adressons nos remerciements à Luc Duguay et Renaud Longrée, qui ont contribué avec efficacité à la prise de données sur le terrain. Soulignons la collaboration très appréciée de la CGFA, qui s'est effectuée par l'intermédiaire de Marc Beaudoin, Véronique Drolet et Yves Lamarche. Nous désirons également souligner l'appui technique de la Société Sylvicole de la Haute-Gatineau (Patrick Feeny, Yvon Labelle, André Riopel et Michel Thibault). Des remerciements sont dus au Ministère des Ressources naturelles, et en particulier à Mario Gibeault, Normand Brisson, Marc Lavergne et Denis Rozon. En outre, nous souhaitons témoigner notre reconnaissance aux personnes suivantes, qui ont fourni de l'information utile pour le projet : Lauri Valsta, Timo Pukkala, Jari Miina, François de Coligny, François Goreaud, Sylvain Turbis, Philippe Fredette, Steve D'Eon et Jean Lajeunesse. Enfin, nous sommes reconnaissants à Marek Zaremba (Université du Québec en Outaouais) pour la mise à disposition de matériel informatique.

Table des matières

Liste des tableaux vi

Liste des figures vii

Liste des annexes vii

1. INTRODUCTION 1

1.1 Problématique 1
1.2 Objectifs 2
1.3 Plan du rapport 3

2. RÉCOLTE DES DONNÉES 4

2.1 Peuplements échantillonnés 4
2.1.1 Types de peuplements 4
2.1.2 Historique des peuplements 4
2.2 Tiges-sujets 4
2.2.1 Caractéristiques des tiges-sujets 4
2.2.2 Sélection des tiges-sujets : choix d'un dispositif équilibré 5
2.3 Mesures sur les tiges sur pied 6
2.4 Mesures au laboratoire 6

3. MODÉLISATION DE LA CROISSANCE 8

3.1 Revue de la littérature 8
3.1.1 Modèles de croissance 8
3.1.2 Choix de modèles spatialement explicites 8
3.1.3 Les indices de compétition 8
3.2 Construction des modèles de croissance en DHP 9
3.2.1 Estimation de l'environnement de compétition passé des tiges-sujets 9
3.2.2 Choix des indices de compétition 13
3.2.3 Modèles de croissance en DHP 13
3.3 Durée de la réponse à l'éclaircie 23

4. OPTIMISATION 26

4.1 Les différents éléments du système de simulation-optimisation 26
4.2 Simulateur 26
4.2.1 Revue de la littérature 26
4.2.2 Construction du simulateur 26
4.2.3 Fonctionnement du simulateur 30
4.3 Générateur de forêts virtuelles 31
4.3.1 Revue de la littérature 31
4.3.2 Méthodologie 31
4.3.3 Caractéristiques du peuplement virtuel 32
4.4 Algorithme d'optimisation 35
4.4.1 Choix de l'algorithme d'optimisation 35
4.4.2 Caractéristiques de la méthode de Hooke et Jeeves 35
4.4.3 Fonction-objectif et variables décisionnelles 36
4.4 Couplage entre le simulateur et l'optimisateur 37

5. RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION 39

5.1 Approche 39

5.2 Résultats 39

6. DISCUSSION ET MISE EN APPLICATION DE L'OUTIL D'OPTIMISATION 43

6.1 Utilisation à l'échelle de l'aménagement 43
6.2 Utilisation à l'échelle de la sylviculture 43
6.3 Développements et améliorations possibles 43
6.3.1 Champ d'application de l'outil 44
6.3.2 Connaissances manquantes 44
6.3.3 Limites 45

7. CONCLUSION 46

RÉFÉRENCES CITÉES 47

Liste des tableaux

Tableau 1. Croissances maximales et minimales introduites dans le simulateur pour le pin blanc et le pin rouge. 27
Tableau 2. Hypothèses de répartition des volumes par produits pour le pin blanc. 29
Tableau 3. Hypothèses de répartition des volumes par produits pour le pin rouge. 29
Tableau 4. Comparaison entre les caractéristiques de la forêt virtuelle et celles de la Forêt de l'Aigle à partir de 30 placettes circulaires de 5 m de rayon. 33
Tableau 5. Caractéristiques des régimes d'éclaircie optimaux. 40
Tableau 6. Volume de qualité (sciage de pin blanc, sciage de pin rouge et poteau de pin rouge) produit à chaque éclaircie pour les régimes optimaux. 41

Liste des figures

Figure 1. Disque de pin blanc après sablage. 7

Figure 2. Relation entre la croissance annuelle moyenne en DHP et le DHP en 1993 utilisée pour l'estimation des DHP passés des tiges compétitrices de pin blanc. 11

Figure 3. Relation entre la croissance annuelle moyenne en DHP et le DHP en 1993 utilisée pour l'estimation des DHP passés des tiges compétitrices de pin rouge. 11

Figure 4. Équation de prédiction de la hauteur en fonction du DHP pour le pin blanc. 12

Figure 5. Équation de prédiction de la hauteur en fonction du DHP pour le pin rouge. 12

Figure 6. Relation entre la croissance annuelle en DHP chez le pin blanc et le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement. 15

Figure 7. Variation résiduelle (non expliquée par le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement) de la croissance annuelle en DHP du pin blanc, en relation avec l'indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin blanc avant éclaircie. 15

Figure 8. Croissance annuelle en DHP chez le pin rouge en fonction du premier indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge avant éclaircie. 17

Figure 9. Variation résiduelle (non expliquée par le premier indice de compétition) de la croissance annuelle en DHP chez le pin rouge, en fonction du second indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge avant éclaircie. 17

Figure 10. Variation résiduelle (non expliquée par les premier et second indices de compétition) de la croissance annuelle en DHP chez le pin rouge, en fonction du troisième indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge avant éclaircie. 18

Figure 11. Évolution de la croissance moyenne annuelle en DHP entre 1993 et 2002 pour les pins blancs éclaircis et non-éclaircis. 19

Figure 12. Pourcentage d'augmentation de la croissance du pin blanc après éclaircie par rapport à la croissance avant éclaircie en fonction de l'indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin blanc après éclaircie. 20

Figure 13. Croissance annuelle en DHP du pin rouge après éclaircie en relation avec le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement. 21

Figure 14. Variation résiduelle (non expliquée par le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement) de la croissance annuelle en DHP après éclaircie chez le pin rouge, en relation avec l'indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge après éclaircie. 22

Figure 15. Fonction d'atténuation de l'effet de l'éclaircie sur la croissance en DHP. 24

Figure 16. Exemple de trajectoire de la croissance d'une tige avant et après éclaircie telle que générée par les modèles et la fonction d'atténuation de la réponse à l'éclaircie. 25

Figure 17. Ligne d'initiation de la mortalité densité-dépendante dans les diagrammes de gestion de la densité. 28
Figure 18. Proportion de bois de sciage et de bois à pâte par m3 en fonction du DHP pour le pin blanc. 29
Figure 19. Étapes de fonctionnement du simulateur. 30
Figure 20. Forêt virtuelle : partie utile et zone-tampon. 31
Figure 21. Histogrammes de distribution des DHP pour le pin blanc : comparaison entre la Forêt de l'Aigle et la forêt virtuelle. 34
Figure 22. Histogrammes de distribution des DHP pour le pin rouge : comparaison entre la Forêt de l'Aigle et la forêt virtuelle. 34
Figure 23. Représentation spatiale de la forêt virtuelle 35
Figure 24. Couplage entre le simulateur et l'algorithme d'optimisation. 38
Figure 25. Évolution du volume total sur pied en fonction de l'âge du peuplement pour les régimes d'éclaircie optimaux correspondant à chaque nombre d'éclaircie. 41

Liste des annexes

Annexe 1. Localisation des peuplements sur le territoire de la Forêt de l'Aigle. II

Annexe 2. Localisation des tiges-sujets, secteur Multiressource-Est..... III

Annexe 3. Localisation des tiges-sujets, secteur Magloire. IV

Annexe 4. Localisation des tiges-sujets, secteur Rivière de l'Aigle. V

Annexe 5. Indices de compétition testés comme variables prédictives de la croissance en DHP.....VI

Annexe 6. Modèles de croissance en DHP pour le pin blanc avant éclaircie, le pin blanc après éclaircie, le pin rouge avant éclaircie et le pin rouge après éclaircie. VIII

Annexe 7. Fenêtre d'accueil du générateur de forêts virtuelles..... IX

Annexe 8. Algorithme d'optimisation. X

Annexe 9. Exemple de cheminement dans l'espace d'optimisation..... XI

Annexe 10. Programme de simulation-optimisation. XII

1. Introduction

1.1 Problématique

Depuis la mise en application du nouveau Manuel d'Aménagement Forestier en 1995, l'ensemble des pinèdes du Québec doivent être aménagées selon un système équienne par coupes d'éclaircie successives suivies d'une coupe progressive d'ensemencement. Bien que l'éclaircie commerciale dans les pinèdes naturelles à pin blanc et pin rouge ait fait l'objet de différents travaux de recherche (Gillespie et Hocker 1986a ; Hibbs et Bentley 1987 ; Seymour et Smith 1987 ; Brown 1992 ; Burgess et Robinson 1998 ; Anderson *et al.* 2002), les régimes d'éclaircie commerciale optimaux pour ces types de peuplements sont encore inconnus. Quelques études fournissent de l'information sur les surfaces terrières résiduelles permettant de maximiser le volume total (Hibbs et Bentley 1987 ; Brown 1992 ; Anderson *et al.* 2002). Plusieurs auteurs ont montré que des surfaces terrières résiduelles élevées (entre 32 et 46 m^2/ha selon les auteurs pour le pin blanc et le pin rouge) sont appropriées pour maximiser la croissance totale du peuplement en surface terrière ou en volume (Schlaegel 1971 ; Benzie 1977). Selon les normes du Manuel d'Aménagement Forestier (MRN 1997), la surface terrière récoltée doit être comprise entre 20 et 30 % de la surface terrière initiale et ne peut dépasser 10 m^2/ha, tandis que la surface terrière après éclaircie doit être supérieure à 20 m^2/ha. D'après le Manuel, l'éclaircie commerciale produit une amélioration de la qualité et une augmentation du volume total. Brown (1992) distingue deux stratégies : l'aménagement à forte densité et l'aménagement à faible densité. Il recommande de conserver des surfaces terrières égales ou supérieures à 25 m^2/ha pour les peuplements de pin blanc et pin rouge de l'Outaouais. D'après cet auteur, il n'existe aucune information sur les densités optimales pour la production prioritaire de poteaux de pin rouge.

L'absence d'information sur les régimes d'éclaircie appropriés est d'autant plus marquée pour les forêts âgées de plus de 100 ans. La Manuel d'Aménagement Forestier (MRN 1997) prescrit une coupe progressive à 120 ou 140 ans (Bouillon 2003). Alors que le pin blanc a une longévité maximale de l'ordre de 300 ans (Abrams et Orwig 1996), il existe très peu de données sur la croissance de cette essence et l'évolution des peuplements après l'âge de 100 ans. Il en va de même pour le pin rouge.

Les seuls outils d'aide à la décision disponibles à ce jour pour déterminer le régime d'éclaircie à l'échelle du peuplement sont les diagrammes de gestion de la densité développés en Ontario pour des peuplements purs de pin blanc ou de pin rouge (Smith et Woods 1997). Ces diagrammes, calibrés à partir de courbes d'éclaircie naturelle obtenues pour des peuplements où les pins représentaient plus de 80 % de la surface terrière totale, sont particulièrement adaptés

pour des régimes d'éclaircie par le bas ; leur utilisation pour des régimes d'éclaircie par le haut ou mixte n'est donc pas recommandée, ce qui limite leur utilité. Par ailleurs, les diagrammes de gestion de la densité n'ont été calibrés que pour des peuplements dont le diamètre moyen est inférieur ou égal à 50 cm pour le pin blanc et à 40 cm pour le pin rouge, et les trajectoires de croissance prédites deviennent de plus en plus imprécises à mesure que les diamètres moyens s'approchent de ces limites supérieures. Par conséquent, des options d'aménagement incluant la possibilité de faire croître les tiges jusqu'à un diamètre plus élevé ne peuvent être explorées avec cet outil.

Les quelques données disponibles sur la croissance des pins blancs dans des peuplements très âgés nous confirment dans l'idée que les tiges présentent encore de fortes croissances au-delà de 200 ans (Abrams et Orwig 1996). Les dendrosséries présentées par ces auteurs indiquent par ailleurs de fortes reprises de croissance, ce qui suggère que la capacité de répondre favorablement à une éclaircie se maintient longtemps chez cette espèce.

Le manque de données concernant les peuplements âgés de plus de 100 ans exclut la modélisation de la croissance à l'échelle du peuplement, du moins de façon directe. L'utilisation de modèles à l'échelle de l'arbre offre une alternative intéressante pour tester les effets de différents traitements sylvicoles. Ainsi, nous avons construit un simulateur de croissance des peuplements à partir de modèles de croissance à l'échelle de l'arbre. Nous innovons également en couplant un tel simulateur à un optimisateur qui permet de maximiser une variable d'intérêt (volume, valeur économique, etc.). Un tel couplage permet de sélectionner, parmi des milliers de possibilités, la solution optimale.

Le couple simulateur-optimisateur développé a servi à explorer les régimes d'éclaircie optimaux pour des peuplements de pins au-delà de l'horizon de 100 ans.

1.2 Objectifs

Les objectifs de la présente étude étaient les suivants :

- Développer, pour le pin blanc et le pin rouge, des modèles de croissance spatialement explicites à l'échelle de l'arbre et basés sur la compétition ;
- Développer un simulateur de croissance de peuplements à partir des modèles précédents ;
- Coupler ce simulateur de croissance à un optimisateur de régime d'éclaircie pour maximiser une variable d'intérêt (valeur économique actuelle nette, volume, etc.)

1.3 Plan du rapport

Après une première partie consacrée aux mesures sur le terrain et en laboratoire, nous traiterons du développement des modèles de croissance avant et après éclaircie pour le pin blanc et le pin rouge. La partie suivante portera sur le simulateur de croissance des peuplements et son couplage avec l'algorithme d'optimisation. Nous présenterons ensuite les résultats de l'optimisation. Enfin, nous discuterons des modalités de mise en application de l'outil.

2. Récolte des données

2.1 Peuplements échantillonnés

2.1.1 Types de peuplements

Les secteurs utilisés pour l'étude, situés sur le territoire de la Forêt de l'Aigle (Annexe 1), appartenaient aux groupements et aux classes de densité, hauteur et âge suivants : PbPb A190, PbPb B190, PbPb C190, PbPb D190, PePb B170, RPB B270, PrPb B190 (Annexe 2, Annexe 3 et Annexe 4).

L'étage dominant était constitué à majorité de pin blanc et de pin rouge. Un certain nombre de trembles, bouleaux blancs et pins gris étaient également présents. L'étage inférieur comprenait du sapin baumier et des épinettes.

2.1.2 Historique des peuplements

Ces peuplements étaient issus d'un épisode de feu datant de la fin du 19ème siècle, et les pins étaient âgés en moyenne de 110 ans en 2002. Les peuplements échantillonnés étaient au nombre de trois : un peuplement ayant subi une éclaircie commerciale en 1997, un peuplement ayant subi un traitement de jardinage en 1996 et un peuplement non traité. Le traitement effectué en 1997 constituait la première intervention d'éclaircie commerciale réalisée sur le territoire de la Forêt de l'Aigle ; les modalités de ce traitement (par le haut, par le bas…) n'ont pas été consignées avec précision. Cependant, l'observation des souches suggérait qu'il s'agissait d'une éclaircie de type mixte, avec prélèvement de petites tiges et de grosses tiges.

2.2 Tiges-sujets

2.2.1 Caractéristiques des tiges-sujets

Un total de 88 tiges ont été sélectionnées, dont 44 tiges de pin blanc et 44 tiges de pin rouge. L'ensemble des tiges-sujets étaient situées sur un dépôt de type 2BE (épandage fluvioglaciaire). Les tiges-sujets devaient être vigoureuses, avoir un diamètre à hauteur de poitrine supérieur ou égal à 30 cm et n'avoir que des pins comme tiges compétitrices. Une tige compétitrice était définie comme une tige de DHP supérieur ou égal à 20 cm située à l'intérieur d'un prisme de facteur 4 tenu à la tige-sujet. Les tiges de sapin ou d'épinettes de DHP strictement inférieur à 20 cm étaient considérées comme appartenant au sous-couvert et n'étaient donc pas prises en compte en tant que compétiteurs. Dans la mesure du possible, la nature et la densité du sous-

couvert étaient similaires pour l'ensemble des tiges : celles-ci étaient entourées d'un sous-couvert résineux (sapin et/ou épinettes) moyennement dense.

2.2.2 Sélection des tiges-sujets : choix d'un dispositif équilibré

Le choix des tiges-sujets a été opéré de façon à représenter la plus grande diversité possible de combinaisons classe de DHP-classe de compétition. Ainsi, un effort a été fait pour rechercher non seulement les types de tiges les plus communs (tiges opprimées de DHP faible ou moyen, tiges dominantes ou codominantes de fort DHP peu compétitionnées…) mais aussi des types plus rares, comme par exemple les tiges de faible DHP faiblement compétitionnées. L'approche retenue s'apparente à un dispositif équilibré où l'on recherche à obtenir une représentation égale des situations extrêmes et des situations intermédiaires. Les avantages d'un tel dispositif sont : 1) une diminution importante du nombre de données à récolter, 2) une exploration maximale de l'espace d'échantillonnage, sans sur-représentation des situations les plus fréquentes. Le principal inconvénient d'une telle approche est que les réponses mesurées dans les cas extrêmes deviennent plus dépendantes de facteurs non contrôlés ; autrement dit, elles reflètent l'importance plus forte d'interactions avec les facteurs non contrôlés par l'expérimentateur. Cet inconvénient peut être contourné par une élimination *a posteriori* d'observations aberrantes (« outliers »).

2.2.2.1 Classes de DHP

Les valeurs de DHP étaient divisées entre quatre classes :

- classe 1 : DHP compris entre 30 et 39 cm,
- classe 2 : DHP compris entre 40 et 49 cm,
- classe 3 : DHP compris entre 50 et 59 cm,
- classe 4 : DHP supérieur ou égal à 60 cm.

2.2.2.2 Classes de compétition

L'attribution à une tige-sujet d'une classe de compétition se faisait à l'aide d'un indice de compétition visuel selon la procédure suivante : à chaque tige compétitrice était attribué un coefficient compris entre 1 et 3 en fonction de sa différence de hauteur avec la tige-sujet : 1 pour les compétiteurs dont la hauteur était inférieure à celle de la tige-sujet, 2 pour les compétiteurs dont la hauteur était égale à celle de la tige-sujet et 3 pour les compétiteurs dont la hauteur était supérieure à celle de la tige-sujet. Une différence de hauteur de moins de 2,5 mètres étant difficilement détectable à l'œil, les tiges pour lesquelles la différence de hauteur était inférieure ou égale à 2,5 mètres se voyaient attribuer un coefficient 2. La classe de compétition était déterminée en fonction de la somme des coefficients :

- classe 1 (compétition très faible) : indice compris entre 0 et 3,

- classe 2 (compétition faible) : indice compris entre 4 et 7,
- classe 3 (compétition moyenne) : indice compris entre 8 et 11,
- classe 4 (compétition élevée) : indice supérieur ou égal à 12.

2.2.2.3 Intensités d'éclaircie

Pour chaque essence, un peu plus de la moitié des tiges (24 pins blancs et 23 pins rouges) avaient été dégagées lors de l'éclaircie commerciale de 1997 (ou, pour quatre tiges, lors du traitement de jardinage effectué en 1996) tandis que le reste des tiges (20 pins blancs et 21 pins rouges) appartenaient au peuplement non traité. Dans les secteurs traités, le choix des tiges s'est efforcé d'être représentatif de différentes intensités de coupe autour de la tige-sujet, ce qui se traduisait par le plus ou moins grand nombre de souches et la taille des souches présentes dans un prisme de facteur 4 tenu à la tige-sujet.

2.3 Mesures sur les tiges sur pied

L'essence (pin blanc ou pin rouge), le DHP et la hauteur de la tige-sujet étaient notés, ainsi que l'essence, le DHP, la hauteur et la distance à la tige-sujet de chaque compétiteur. Les diamètres à hauteur de poitrine étaient mesurés au cm près à l'aide d'un compas forestier. Les hauteurs étaient mesurées avec une précision de 0,5 m au clinomètre. Les distances étaient mesurées au dm près à l'aide d'un lasermètre Disto ®. Dans le cas des tiges situées dans les secteurs éclaircis, le diamètre et la distance à la tige-sujet des souches situées à l'intérieur d'un prisme de facteur 4 tenu à la tige-sujet étaient notés. Le diamètre était mesuré au compas pour les souches de forme relativement sphérique et au gallon circonférentiel pour les souches de forme très irrégulière ou de très gros diamètre.

2.4 Mesures au laboratoire

Un disque transversal a été prélevé sur chaque tige-sujet à une hauteur d'environ 40 cm. Les disques ont été séchés à l'air puis sablés (
Figure 1). Quatre rayons perpendiculaires ont été scannés et les images numériques ont été importées dans ArcView 3.2. Les mesures de croissance radiale annuelle des dix dernières années ont été prises au $10^{ème}$ de mm après calibration de l'échelle de l'image. Pour les quatre tiges éclaircies en 1996 et non en 1997, on n'a pas tenu compte de la dernière année de croissance afin de disposer, comme pour les autres tiges, de la croissance cinq ans avant éclaircie (1992-1996) et cinq ans après éclaircie (1997-2001). Chaque croissance annuelle a été calculée comme la moyenne quadratique des croissances mesurées sur les quatre axes.

Figure 1. Disque de pin blanc après sablage.

3. Modélisation de la croissance

3.1 Revue de la littérature

3.1.1 Modèles de croissance

La littérature fournit de nombreux exemples de modèles de croissance pour différentes espèces de pin, tant en plantation qu'en peuplements naturels (pin radiata : Daniels et Burkhart 1975 ; Daniels 1976 ; pin sylvestre : Miina et Pukkala 2002 ; pin rouge : Martin et Ek 1984 ; pin blanc : Gillespie et Hocker 1986a). Alors que les modèles de croissance au niveau du peuplement prédisent la croissance en surface terrière totale ou en volume total, les modèles de croissance au niveau de l'arbre prédisent la croissance en DHP, en surface terrière ou en volume d'une tige, en fonction de son DHP, de son âge et/ou de son environnement de compétition.

3.1.2 Choix de modèles spatialement explicites

Il existe deux catégories de modèles de croissance à l'échelle de l'arbre : les modèles indépendants des distances et les modèles dépendant des distances, ou encore spatialement explicites. Notre prémisse de départ était que des modèles tenant compte des distances entre les tiges seraient plus efficaces pour prédire la croissance que des modèles non spatialement explicites. De plus, les éclaircies commerciales sont susceptibles de modifier la distribution spatiale des arbres, ce qui ajoute à l'intérêt de développer des modèles de croissance dépendant des distances. Il faut noter ici que les indices calculés sur les tiges compétitrices présentes à l'intérieur d'une placette à rayon variable (placette au prisme) intègrent de façon implicite la distance puisque celle-ci dépend du diamètre des tiges compétitrices.

3.1.3 Les indices de compétition

De multiples indices de compétition ont été développés pour prédire la croissance d'arbres individuels. Un indice de compétition est une formule mathématique qui permet d'exprimer, sur une échelle continue, la variation de l'intensité de la compétition exercée sur une tige-sujet. La majorité des auteurs s'accordent à dire qu'il n'existe pas d'indice de compétition va lide quelle que soit l'essence, la qualité de site et l'origine du peuplement (peuplement naturel versus plantation) (voir Alemdag 1978).

3.2 Construction des modèles de croissance en DHP

Les variables à prédire étaient la moyenne de la croissance annuelle en DHP sur la période de cinq ans avant éclaircie (1993-1997) et la moyenne de la croissance annuelle en DHP sur la période de cinq ans après éclaircie (1998-2002). Les variables prédictives étaient des indices de compétition et des variables dendrométriques relatives aux tiges-sujets.

3.2.1 Estimation de l'environnement de compétition passé des tiges-sujets

Les mesures effectuées en 2002 sur les tiges-sujets et les tiges compétitrices permettaient de calculer les indices de compétition actuels. Or, pour la construction des modèles, il était nécessaire d'estimer les indices de compétition passés des tiges-sujets, ce qui supposait de reconstruire le DHP et la hauteur passés des compétiteurs.

3.2.1.1 Estimation des DHP passés des compétiteurs

Les DHP passés des compétiteurs ont été estimés comme suit : un modèle prédisant la croissance annuelle en DHP en fonction du DHP a été développé en se basant sur les tiges-sujets, tant pour le pin blanc (Figure 2) que pour le pin rouge (Figure 3). Les équations de régression linéaire obtenues ont permis d'estimer le DHP des compétiteurs en 1993 et en 1998 à partir de leur DHP en 2003. Remarquons que la croissance augmente avec le DHP pour le pin blanc (Figure 2) tandis que la croissance diminue avec le DHP pour le pin rouge (Figure 3). La qualité de prédiction du modèle est meilleure pour le pin blanc (R^2 = 0,54) que pour le pin rouge (R^2 = 0,39).

Pour reconstituer l'environnement de compétition en 1993 des tiges-sujets éclaircies en 1997, il était nécessaire d'estimer le DHP des tiges compétitrices récoltées lors de l'éclaircie. Pour ce faire, on a utilisé la relation entre diamètre à hauteur de souche (DHS) et DHP de l'Annexe F des Méthodes d'échantillonnage pour le suivi des interventions forestières (MRN 1999) pour convertir les DHS en 2003 en DHP en 2003. Nous avons supposé que toutes les tiges récoltées en 1996 et 1997 étaient des pins blancs, ce qui est tout à fait vraisemblable selon les gestionnaires de la Forêt de l'Aigle puisqu'il n'existait pas de marché pour les poteaux de pin rouge il y a cinq ans.

3.2.1.2 Équations hauteur-DHP

Des équations non linéaires de prédiction de la hauteur en fonction du DHP ont été développées en vue de l'estimation des hauteurs passées des tiges-sujets et des compétiteurs, en utilisant les données de DHP et de hauteurs mesurées sur les tiges-sujets et les compétiteurs en 2003 (Figure 4 et Figure 5). Les équations quadratiques produites par le MRN se sont révélées inappropriées pour notre jeu de données. En effet, ces équations sont limitées à des DHP

inférieurs à 60 cm. En outre, le recours à des équations quadratiques a pour effet de faire diminuer la hauteur lorsque le DHP devient trop élevé. Les équations non linéaires asymptotiques retenues (Figure 4 et Figure 5) ne souffrent pas de cette aberration. Remarquons que l'asympote estimée par notre analyse de régression non linéaire est propre à notre jeu de données et serait différente pour des arbres croissant sur des sites de qualité différente. Par ailleurs, les sites échantillonnés dans cette étude semblent être de très bonne qualité, tant pour le pin blanc que pour le pin rouge, car les hauteurs mesurées sur les tiges échantillonnées sont plus élevées que celles prédites par les équations du MRN.

La relation obtenue entre la hauteur et le diamètre est plus forte pour le pin blanc (R^2 = 0,57) que pour le pin rouge (R^2 = 0,35). Du fait de la quasi-absence dans le set de données de pins rouges de DHP inférieur à 32 cm, on a créé artificiellement des tiges appartenant à ces classes de DHP (appelées «pseudo-PIR » dans la Figure 5) en utilisant pour le calcul de leur hauteur l'équation relative aux pins blancs corrigée pour refléter les différences de croissance moyennes entre les pins rouges et les pins blancs (obtenues à partir des équations des tarifs de cubage du MRN) (Figure 5). Pour les besoins de la modélisation, la régression dans le temps des hauteurs pour chacune des tiges a été faite en tenant compte de leur distance relative à la courbe empirique développée pour chaque essence.

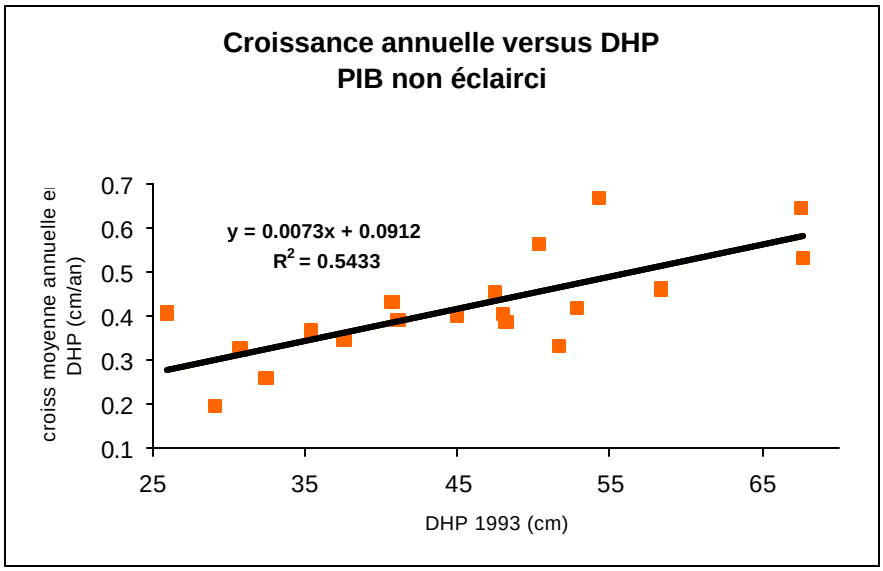


Figure 2. Relation entre la croissance annuelle moyenne en DHP et le DHP en 1993 utilisée pour l'estimation des DHP passés des tiges compétitrices de pin blanc.

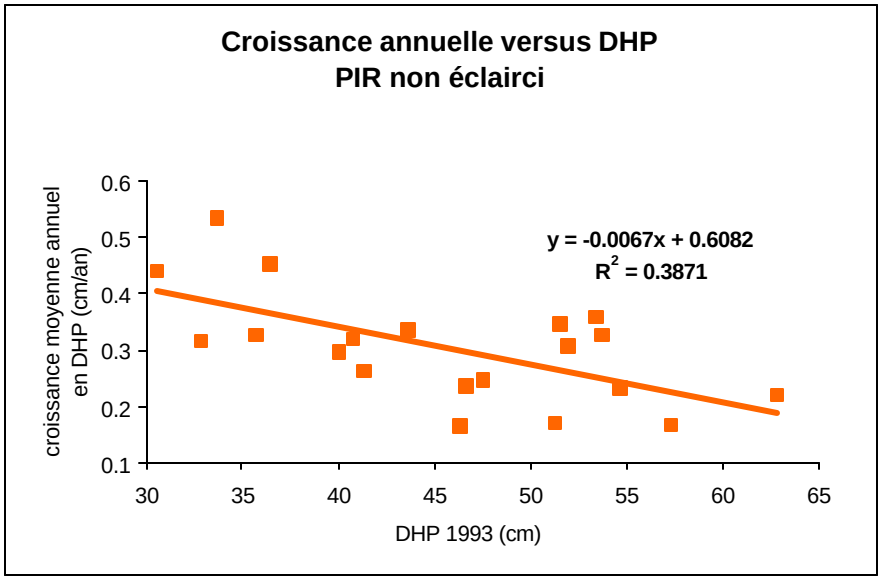


Figure 3. Relation entre la croissance annuelle moyenne en DHP et le DHP en 1993 utilisée pour l'estimation des DHP passés des tiges compétitrices de pin rouge.

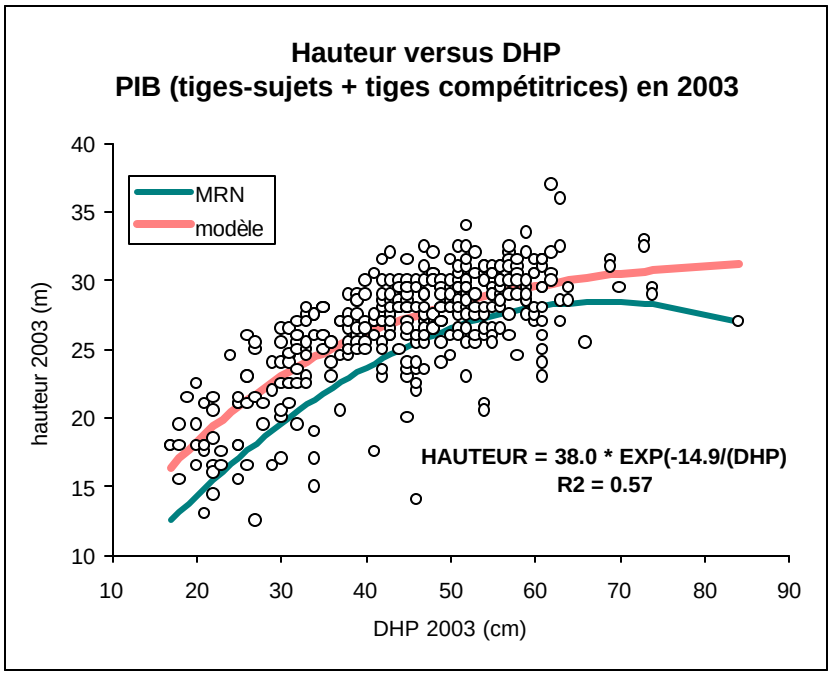


Figure 4. Équation de prédiction de la hauteur en fonction du DHP pour le pin blanc.

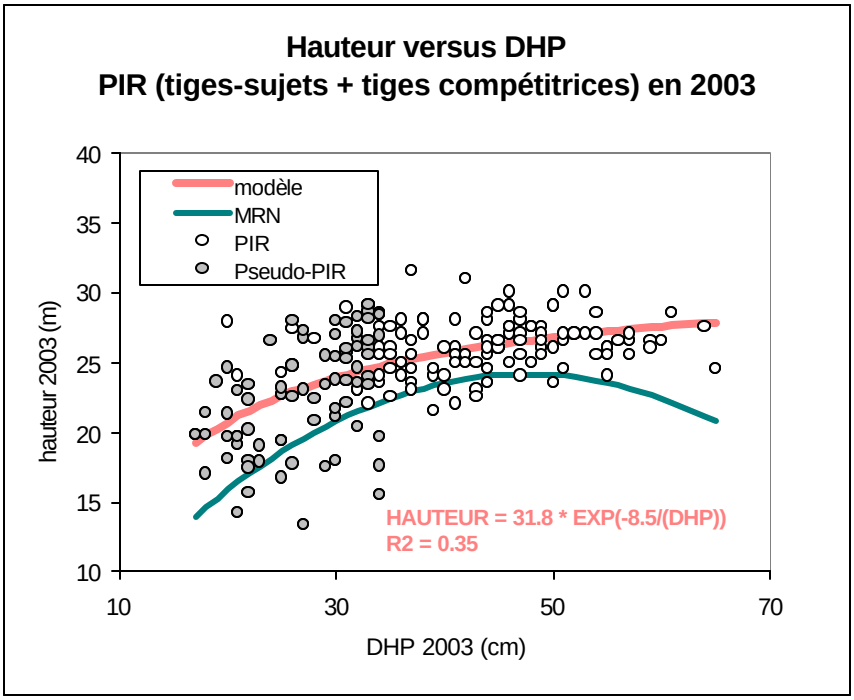


Figure 5. Équation de prédiction de la hauteur en fonction du DHP pour le pin rouge.

3.2.2 Choix des indices de compétition

Dans notre étude, différents indices représentant différentes abstractions mathématiques de la compétition ont été calculés. Parmi ces indices, tous basés de façon explicite ou implicite sur la distance des compétiteurs à la tige-sujet, on distingue les indices de type « dimension-distance », qui font intervenir directement la taille des tiges, les indices de type « somme d'angles », qui sont basés sur des relations géométriques entre la dimension et la hauteur des cimes, et les indices de type « visuels », où un observateur quantifie la compétition en évaluant visuellement les rapports de hauteur entre les tiges compétitrices et le la tige-sujet. Nous avons également fait varier la méthode de sélection des compétiteurs pour le calcul des indices : les compétiteurs étaient sélectionnés soit à l'intérieur d'un cercle de rayon fixe (1, 3, 5, 7 ou 10 m) autour de la tige sujet, soit à l'intérieur d'un prisme de facteur 4, 5, 6 ou 7 positionné à la tige sujet. Enfin, dans le but d'obtenir la meilleure prédiction possible de la croissance, on a fait varier les paramètres associés aux différents indices. Une liste exhaustive des indices testés dans les analyses de régressions pour prédire la croissance apparaît à l'Annexe 5.

3.2.3 Modèles de croissance en DHP

Les modèles ont été établis à l'aide d'analyses de régressions multiples. Les conditions d'application de ce type d'analyse ont été respectées, en portant une attention particulière à la distribution des résidus et aux observations aberrantes (les « outliers » du point de vue statistique). On a cherché à obtenir les modèles expliquant le maximum de la variabilité totale observée à l'aide du nombre minimum de variables prédictives.

3.2.3.1 Croissance avant éclaircie

Modèle pour le pin blanc

En raison de possibles effets de l'âge sur la croissance (très peu documentés dans la littérature), trois pins blancs âgés d'environ 50 ans (au lieu d'une centaine d'années pour le reste des tiges) ont été retirés de la base de données. Huit pins blancs pour lesquels la croissance des dix dernières années ne reflétait pas la croissance globale ont également été éliminés.

Le modèle de croissance annuelle en DHP pour le pin blanc avant éclaircie, établi à partir des observations faites sur 33 tiges-sujets, est le suivant :

Equation 1. $\Delta DHP = 0{,}181 + 0{,}675 * (DHP/t) - 0{,}00065 * sum_DHP6pib$

Où :

- Δ DHP = croissance annuelle en DHP
- t = âge du peuplement (après décompte des cernes sur une vingtaine de galettes de pin blanc, cet âge a été approximé à 100 en 1993)
- sum_DHP6pib = Σ (DHP_TC), avec compétiteurs = pins blancs dans un prisme de facteur 6

Le modèle de croissance du pin blanc avant éclaircie (Equation 1) reflète le modèle conceptuel suivant : la croissance sur une période future de cinq ans dépend de la croissance annuelle moyenne basée sur l'ensemble des années antérieures, exprimée par le DHP divisé par l'âge, corrigée par l'intensité de la compétition actuelle, essentiellement exercée par des tiges de pin blanc dans un rayon variable dépendant du diamètre de la tige compétitrice. Ce modèle explique 55 % de la variabilité de la croissance. Près de 50 % de la variabilité totale observée est expliquée par la croissance annuelle moyenne calculée sur l'ensemble des années antérieures (Figure 6), ce qui suggère que l'environnement de compétition actuel des tiges est hautement corrélé à l'environnement de compétition passé. Un examen qualitatif des patrons de croissance dans le temps sur les galettes des tiges-sujets confirme que la croissance passée est en effet relativement constante depuis l'établissement, en dépit de plusieurs épisodes de ralentissement[1].

L'indice de compétition qui complète le modèle explique seulement un peu plus de 5 % de la variabilité résiduelle. Considéré seul, l'indice de compétition explique cependant près de 20 % de la variation totale observée. La valeur absolue de la croissance en DHP non expliquée par le modèle se situe autour de $\pm$ 0,2 cm/an (Figure 7). L'indice retenu indique que la croissance actuelle s'éloigne de la croissance prédite à partir de la croissance annuelle moyenne calculée sur l'ensemble des années antérieures lorsque la somme des DHP des compétiteurs pins blancs dans un prisme de facteur 6 augmente. Un examen des données indique que l'augmentation de la valeur de l'indice est davantage associée à l'augmentation du nombre de compétiteurs plutôt qu'à la présence de quelques gros compétiteurs. Par ailleurs, il est intéressant de constater qu'à très petite échelle (< 100 m^2), les peuplements d'où sont issues nos données montrent de très grandes variations de densité locale, allant de 100 à 600 tiges/ha lorsque ces densités locales sont extrapolées. Ce constat donne à penser que la variabilité des DHP observée aujourd'hui est le reflet d'une distribution initiale des tiges de type contagieuse.

[1] Nous croyons que ces épisodes de ralentissement reflètent les périodes où la compétition atteint son maximum, ce qui se traduit par de la mortalité dépendante de la densité chez les tiges les plus opprimées (phénomène d'auto-éclaircie). De la même façon, les reprises de croissance observables correspondraient à la fin des phases d'auto-éclaircie.

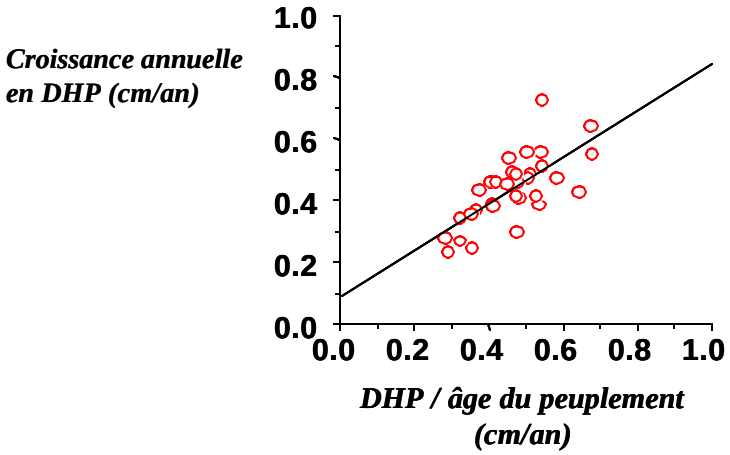


Figure 6. Relation entre la croissance annuelle en DHP chez le pin blanc et le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement.

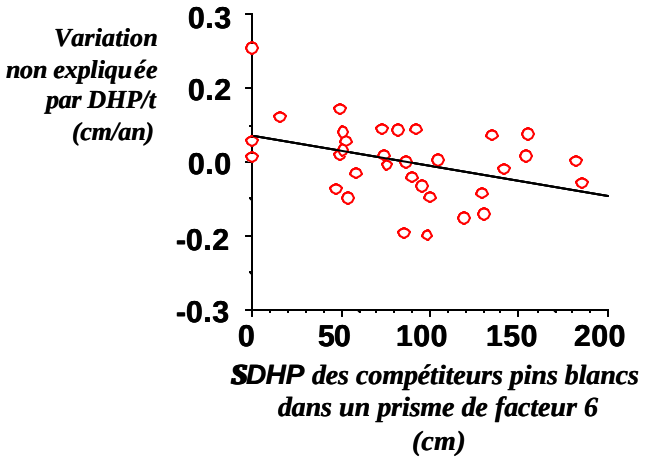


Figure 7. Variation résiduelle (non expliquée par le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement) de la croissance annuelle en DHP du pin blanc, en relation avec l'indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin blanc avant éclaircie.

Modèle pour le pin rouge

Six tiges de pin rouge très peu compétitionnées (aucune de ces tiges n'avaient de compétiteur à moins de 7 m) ont été retirées de la base de données. En effet, la croissance observée chez ces tiges était en totale discontinuité avec celle observée chez les tiges ayant au moins un compétiteur à l'intérieur d'un rayon de 7 m. Par ailleurs, les mesures observées sur trois tiges ayant des compétiteurs à l'intérieur de ce rayon étaient systématiquement aberrantes du point de vue statistique et n'ont donc pas été utilisées pour la détermination du modèle.

Le modèle de croissance annuelle en DHP pour le pin rouge avant éclaircie, établi à partir des observations faites sur 35 tiges-sujets, est le suivant :

Equation 2. $\Delta DHP = 0{,}9385 - 0{,}0769 * \sqrt{DHPmax7m} + 0{,}0238 * he7_4 - 0{,}130 * \sqrt{nbtc4}$

Où :

- Δ DHP = croissance annuelle en DHP
- $\sqrt{}$DHPmax7m = racine carrée du DHP du plus gros compétiteur dans un rayon de 7 m autour de la tige-sujet
- he7_4 = Σ (DHP_TC) / DHP_TS
- $\sqrt{}$nbtc4 = racine carrée du nombre de compétiteurs dans un prisme de facteur 4 autour de la tige-sujet

Ce modèle (Equation 2) explique 23 % de la variabilité observée dans la croissance des pins rouges avant éclaircie (Figures 8 à 10). Le modèle indique que la croissance du pin rouge est influencée par le nombre de compétiteurs dans un prisme de facteur 4 et par la présence de compétiteurs de gros diamètre dans un rayon de 7 m. Cette dernière variable n'explique à elle seule qu'un tiers de la variabilité expliquée par le modèle, alors que le nombre de compétiteurs dans un prisme de facteur 4 explique pratiquement l'essentiel du reste de la variabilité expliquée. Il faut cependant noter que l'influence du nombre de compétiteurs intervient une fois que la présence de gros compétiteurs est prise en compte. L'indice de compétition « He7_4 », égal au ratio de la somme des DHP des compétiteurs dans un prisme de facteur 4 sur le DHP de la tige-sujet, est difficilement interprétable si l'on considère le coefficient positif qui lui est associé. Cet indice, dont la contribution à la variabilité expliquée est faible mais qui permet d'inclure le nombre de compétiteurs comme variable prédictive et ainsi de mieux expliquer la variabilité observée, doit être interprété d'un point de vue statistique et non pas d'un point de vue biologique. En dernière analyse, il faut admettre qu'il nous reste encore beaucoup à apprendre sur les variables qui décrivent l'environnement de compétition du pin rouge lorsqu'il croit dans un peuplement dominé par des pins blancs matures. Rappelons ici que, contrairement à la croissance du pin blanc, la croissance actuelle des pins rouges décroît lorsque le DHP augmente, ce qui laisse penser que les plus gros pins rouges sont actuellement en train de perdre leur position sociale de dominance (hypothèse étayée par l'observation des relations hauteur-diamètre établies pour ces deux essences (Figures 4 et 5)). Cette explication est compatible avec la présence dans le modèle de croissance du pin rouge d'une variable qui tient compte des gros compétiteurs. Quant au nombre de compétiteurs, cette variable expliquerait mieux la croissance des pins rouges de petite dimension. Ainsi, si le modèle proposé n'explique qu'une faible partie de la variabilité observée, il a le mérite d'être cohérent avec des explications d'ordre biologique.

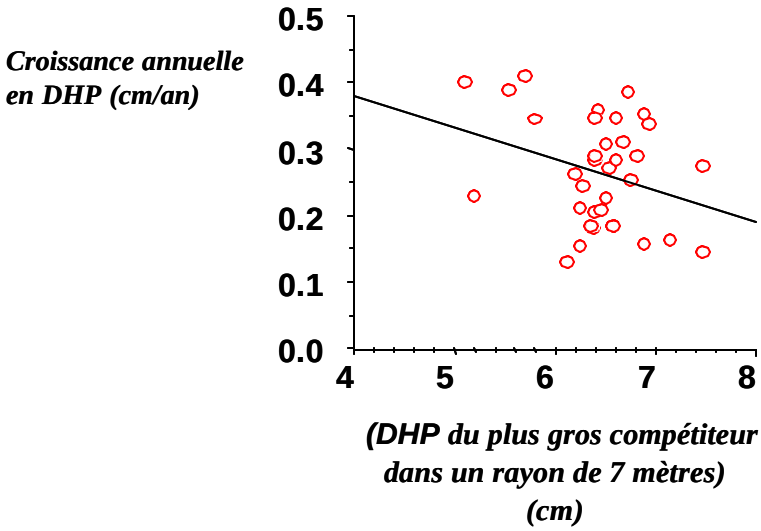


Figure 8. Croissance annuelle en DHP chez le pin rouge en fonction du premier indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge avant éclaircie.

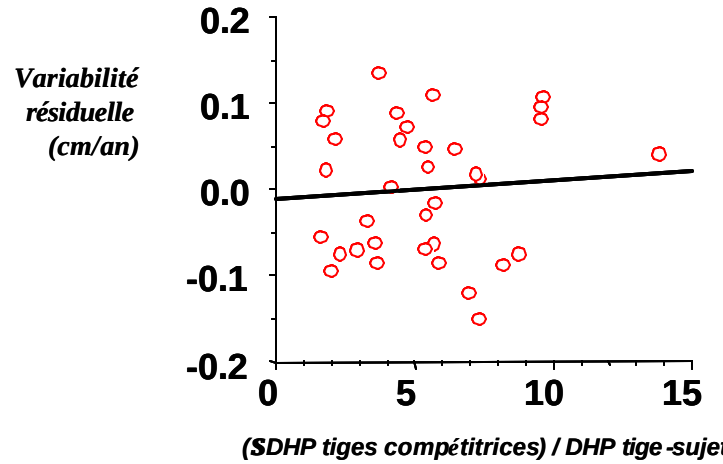


Figure 9. Variation résiduelle (non expliquée par le premier indice de compétition) de la croissance annuelle en DHP chez le pin rouge, en fonction du second indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge avant éclaircie.

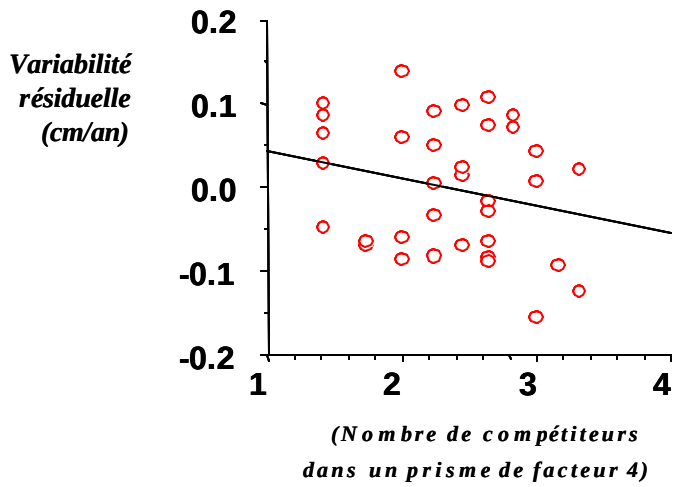


Figure 10. Variation résiduelle (non expliquée par les premier et second indices de compétition) de la croissance annuelle en DHP chez le pin rouge, en fonction du troisième indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge avant éclaircie.

3.2.3.2 Croissance après éclaircie

L'effet « bonus »

Le graphique de la croissance en DHP en fonction du temps pour le pin blanc met en évidence une brusque augmentation de croissance après éclaircie (Figure 11). Il en va de même pour le pin rouge (données non présentées). Les modèles de croissance dits « avant éclaircie », lorsqu'ils sont appliqués aux tiges éclaircies en tenant compte des changements dans les environnements de compétition après éclaircie, génèrent des croissances prédites bien en deçà des croissances observées. Les modèles de croissance « avant éclaircie » se révèlent donc inappropriés pour les tiges ayant subi un dégagement. Une explication biologique à ce constat est que, dans un peuplement complètement stocké (situation réaliste pour une pinède âgée de 100 ans), l'expansion des cimes est limitée par l'espace disponible. Ceci n'est plus vrai lorsque les tiges sont dégagées. La croissance des tiges résiduelles après éclaircie s'apparente donc à celle de tiges appartenant à un peuplement plus faiblement stocké. Des modèles différents sont donc nécessaires afin de tenir compte de cette nouvelle réalité.

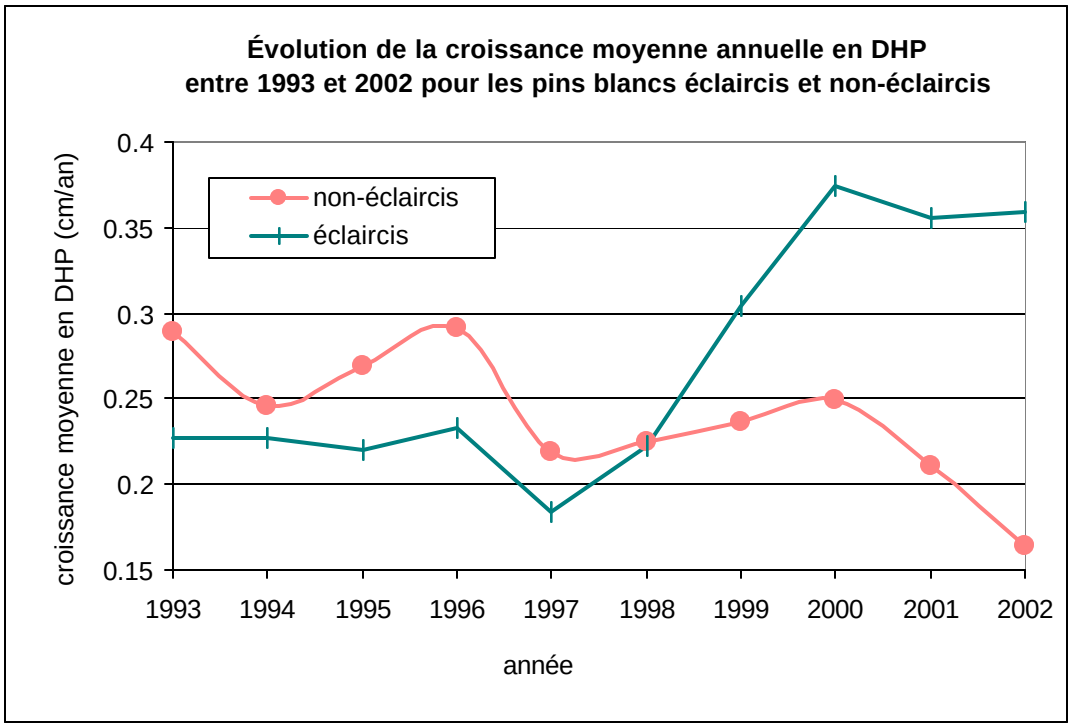


Figure 11. Évolution de la croissance moyenne annuelle en DHP entre 1993 et 2002 pour les pins blancs éclaircis et non-éclaircis.

Modèle pour le pin blanc

Les tiges retirées du set de données pour la construction de ce modèle faisaient partie du même groupe de tiges non considérées lors de la construction du modèle avant éclaircie, auxquelles s'ajoute une tige qui se comportait systématiquement de façon aberrante dans les analyses statistiques, ainsi que deux tiges dégagées lors du traitement mais pour lesquelles la croissance après éclaircie étaiet légèrement inférieure à celle avant éclaircie. Le modèle de croissance après éclaircie a donc été établi à partir de 13 observations. Il n'a pas été possible d'obtenir un modèle prédisant directement la croissance après éclaircie. Le modèle obtenu prédit plutôt le pourcentage d'augmentation de la croissance après éclaircie par rapport à la croissance avant éclaircie (Equation 3) ; cependant, une transformation mathématique simple permet d'aboutir à une formulation directe de la croissance après éclaircie (Equation 4).

Equation 3. $Ln\ (\ (croiss_ApEC\ -\ croiss_AvEC)\ *\ 100\ /\ croiss_AvEC\ )\ =\ 5{,}673\ -\ 1{,}635\ *\ Ln\ (nbtc5\ +\ 1)$

Ce qui après transformation devient :

Equation 4. $croiss_ApEC\ =\ (\ (exp(5{,}673\ -\ 1{,}635\ *\ Ln(nbtc5+1)))\ *\ croiss_AvEC/100\ )\ +\ croiss_AvEC$

Où :

- Ln = logarithme naturel
- croiss_ApEC = croissance annuelle en DHP après éclaircie à la période suivante
- croiss_AvEC = croissance annuelle en DHP avant éclaircie à la période précédente
- nbtc5+1 = nombre de compétiteurs résiduels dans un prisme 5 autour de la tige-sujet, auquel on ajoute 1 pour éviter d'appliquer une transformation logarithmique à des valeurs nulles

Ce modèle explique 54 % de la variabilité totale observée à l'aide d'un seul indice de compétition : le nombre de compétiteurs résiduels dans un prisme de facteur 5 après éclaircie (Figure 12). Il indique que l'augmentation de croissance suite à l'éclaircie croît exponentiellement avec la diminution du nombre de compétiteurs résiduels. Le nombre limité d'observations ne nous permet pas de relier la réponse à l'éclaircie, ni la variabilité non expliquée par le modèle, à des caractéristiques particulières des tiges-sujets ou des tiges compétitrices. Une précaution est de mise dans l'interprétation du modèle : en valeur absolue, la croissance en DHP peut être aussi importante pour une tige de fort diamètre qui ne bénéficie que d'un bonus faible (pour laquelle il reste encore beaucoup de compétiteurs après éclaircie) que pour une tige de moindre diamètre qui bénéficie d'un bonus élevé (pour laquelle il reste peu de compétiteurs après éclaircie).

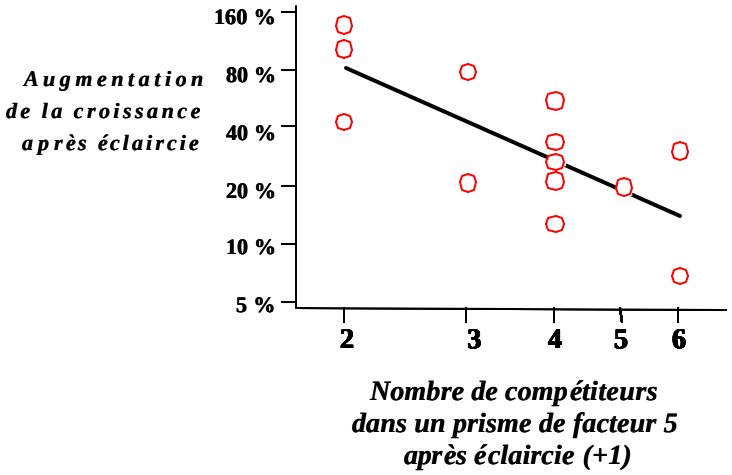


Figure 12. Pourcentage d'augmentation de la croissance du pin blanc après éclaircie par rapport à la croissance avant éclaircie en fonction de l'indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin blanc après éclaircie (noter que les échelles sont logarithmiques).

Modèle pour le pin rouge

Après élimination d'une observation aberrante du point de vue statistique, le modèle suivant, construit à l'aide d'observations relatives à 22 tiges-sujets, a été obtenu :

Equation 5. *croiss_ApEC = 0,94 - 1,13 * DHP/t - 0,034 * nbtc7m*

Où :

- *croiss_ApEC* = croissance annuelle en DHP après éclaircie
- t = âge du peuplement (après décompte des cernes sur une vingtaine de galettes de pin rouge, l'âge de toutes les tiges a été approximé à 100 ans en 1993)
- nbtc7m = nombre de compétiteurs dans un rayon de 7 m autour de la tige-sujet

Ce modèle (Equation 5) explique 63 % de la variabilité totale de la croissance après éclaircie chez le pin rouge. La croissance annuelle moyenne calculée sur la base des 100 premières années du peuplement est la première variable prédictive du modèle et explique à elle seule près de 40 % de la variabilité totale. Nous avions déjà observé lors de l'analyse du modèle de croissance avant éclaircie que les pins rouges de gros diamètre sont ceux qui ont actuellement la croissance la plus faible ; force est de constater que ce sont aussi ces tiges qui tirent le moins parti de l'éclaircie (Figure 13). La seconde variable du modèle, soit le nombre de tiges compétitrices résiduelles dans un rayon de 7 m autour de la tige-sujet (Figure 14), constitue un apport appréciable au modèle en terme d'augmentation de la variabilité expliquée ; de plus, sa nature permet de confirmer l'hypothèse que les pins rouges de gros diamètre ont subi un déclassement au niveau de leur position sociale. Si les petites tiges semblent profiter d'un dégagement qui réduit le nombre de compétiteurs dans un rayon de 7 m, il apparaît que cela est insuffisant pour les grosses tiges.

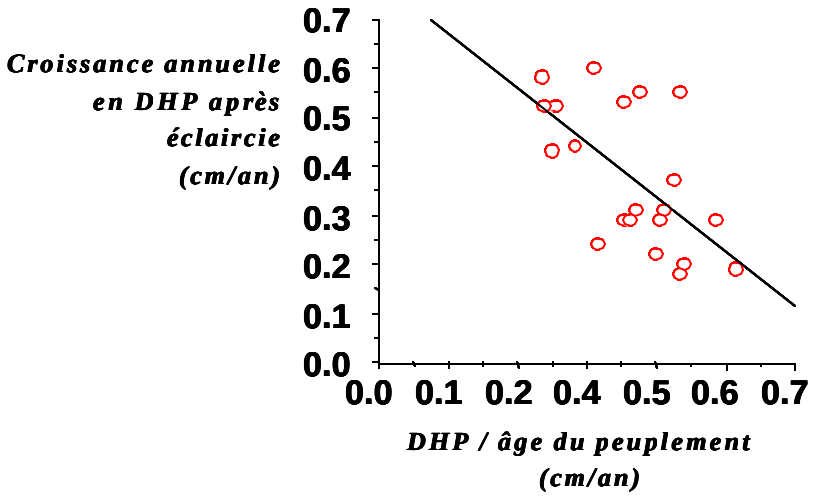


Figure 13. Croissance annuelle en DHP du pin rouge après éclaircie en relation avec le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement.

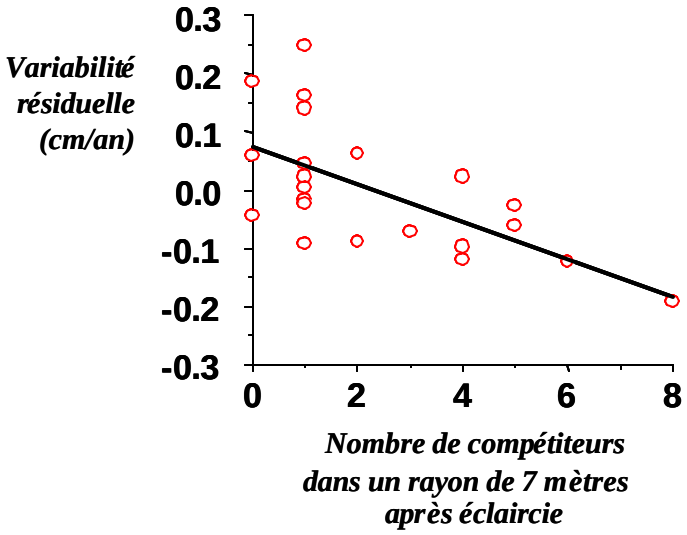


Figure 14. Variation résiduelle (non expliquée par le ratio entre le DHP et l'âge du peuplement) de la croissance annuelle en DHP après éclaircie chez le pin rouge, en relation avec l'indice de compétition inclus dans le modèle de croissance du pin rouge après éclaircie.

3.2.3.3 Validation des modèles

En raison du faible nombre de tiges disponibles, les modèles n'ont pu être validés avec un jeu de données indépendantes. Afin de pallier partiellement à cet inconvénient, nous avons testé la sensibilité des modèles par les deux techniques statistiques suivantes, basées sur un ré-échantillonnage des observations utilisées pour la construction des modèles :

1) le R^2 Press : cette technique consiste à recalculer la proportion de la variabilité totale expliquée par le modèle en retirant une à la fois chaque observation utilisée. Plus la statistique obtenue est faible comparativement à la proportion de la variabilité totale expliquée par le modèle lorsque toutes les observations sont utilisées (R^2), plus le modèle est sensible à des observations individuelles.

2) le « bootstrapping » : il s'agit d'une variante de la technique précédente, dans laquelle les paramètres du modèle sont réévalués ; des intervalles de confiance sont calculés pour ces paramètres sur des échantillons aléatoires tirés dans le jeu complet d'observations. Cette technique permet de juger de la qualité d'un modèle par l'examen de l'inclusion des valeurs des paramètres du modèle original à l'intérieur des bornes de confiance calculées à partir du « bootstrapping ». Tous les modèles satisfont à cette vérification.

Les données statistiques se rapportant à chaque modèle sont présentées à l'Annexe 6.

3.3 Durée de la réponse à l'éclaircie

Selon Hynynen (1995), la réponse à l'éclaircie commerciale du pin sylvestre est maximale entre cinq et 10 ans après traitement et se dissipe environ 30 ans après traitement. Jonsson indique que les effets de l'éclaircie se prolongent durant plus de 35 ans. Différentes fonctions de réponse à l'éclaircie ont été utilisées dans la littérature (Jonsson 1995 ; Hynynen 1995). Nolet *et al.* (1999) mentionnent que la réponse du pin blanc à l'éclaircie est immédiate et peut se maintenir pendant au moins 15 ans.

D'après notre jeu de données, il ne semble pas y avoir d'atténuation de l'effet de l'éclaircie au cours des cinq ans suivant le traitement ; en effet, la baisse de croissance observée à partir de 2001 (Figures 11 et 12) affecte aussi bien les tiges non éclaircies que les tiges éclaircies et est donc probablement due à des variations climatiques interannuelles, les années 2001 et 2002 ayant été plus défavorables que les années précédentes[2].

À défaut de données empiriques portant spécifiquement sur la forme de l'atténuation de la réponse à l'éclaircie, nous avons utilisé une fonction sigmoï de pour modéliser ce phénomène (Equation 6 et Figure 15).

Cette fonction a la forme suivante :

Equation 6. $y = 1 / (1 + \exp(-(temps-c)/b))$

Où :

- y = proportion au temps t de la croissance après éclaircie au temps 0
- temps = nombre d'années après éclaircie
- c = paramètre situant le point d'inflexion de la courbe sigmoï de
- b = paramètre influençant la vitesse de déclin de la proportion dans le temps

Il serait possible de faire varier chaque paramètre, ce qui résulterait en des comportements contrastés de la fonction d'atténuation, et d'étudier les effets de la variation de ces paramètres sur les résultats de l'optimisation. Ceci reviendrait à faire une analyse de sensibilité.

La fonction d'atténuation génère une proportion qui décroît au cours du temps, passant d'une valeur maximale de 1 à une valeur minimale de 0. La proportion obtenue est appliquée directement à la croissance prédite par les modèles après éclaircie. Comme les proportions diminuent avec le temps, le « bonus » de croissance dû à l'éclaircie s'atténue avec les années.

[2] Il aurait été utile de corriger les croissances annuelles pour diminuer l'effet des variations climatiques interrannuelles (Pukkala et al. 1998) ; cependant, une telle correction aurait nécessité des séries détrendisées par essence basées sur les anomalies et les moyennes climatiques qui, à notre connaissance, n'existent pas pour le Québec.

Pour les simulations présentées dans ce rapport, nous avons retenus des paramètres localisant le point d'inflexion (point où le « bonus » à l'éclaircie n'est plus que la moitié de la valeur initiale) à 20 ans après éclaircie et qui soutiennent l'effet du « bonus » à l'éclaircie de façon assez élevée jusqu'à l'approche du point d'inflexion (Figure 15).

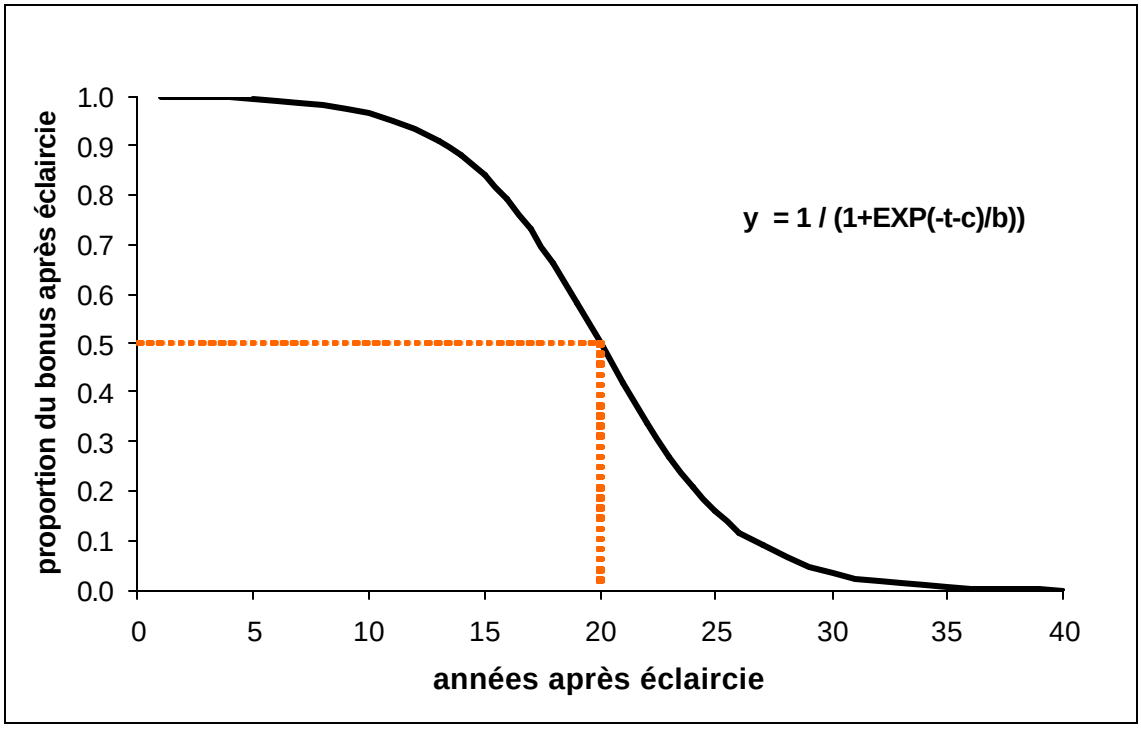


Figure 15. Fonction d'atténuation de l'effet de l'éclaircie sur la croissance en DHP.

Mentionnons que, dans l'application de la fonction d'atténuation de l'effet « bonus », la croissance prédite résultante ne deviendra jamais inférieure à celle prédite par le modèle avant éclaircie en fonction de l'environnement de compétition post-éclaircie. En effet, lorsque les deux valeurs de croissance se rapprochent, c'est le modèle de croissance avant éclaircie qui s'applique à nouveau. Conceptuellement, cela implique que la réponse à l'éclaircie est terminée ; biologiquement, cela correspond à une re-fermeture du peuplement après l'arrêt de l'expansion de la cime des tiges éclaircies dans l'espace libéré. Le comportement global de la croissance d'une tige telle que simulée par les modèles de croissance avant et après éclaircie et en utilisant la fonction d'atténuation du « bonus » à l'éclaircie est représenté à la Figure 16. Quelle que soit la forme de la fonction d'atténuation, les tiges les plus dégagées bénéficient d'un « bonus » plus élevé et qui se maintient plus longtemps dans le temps, ce qui est biologiquement réaliste.

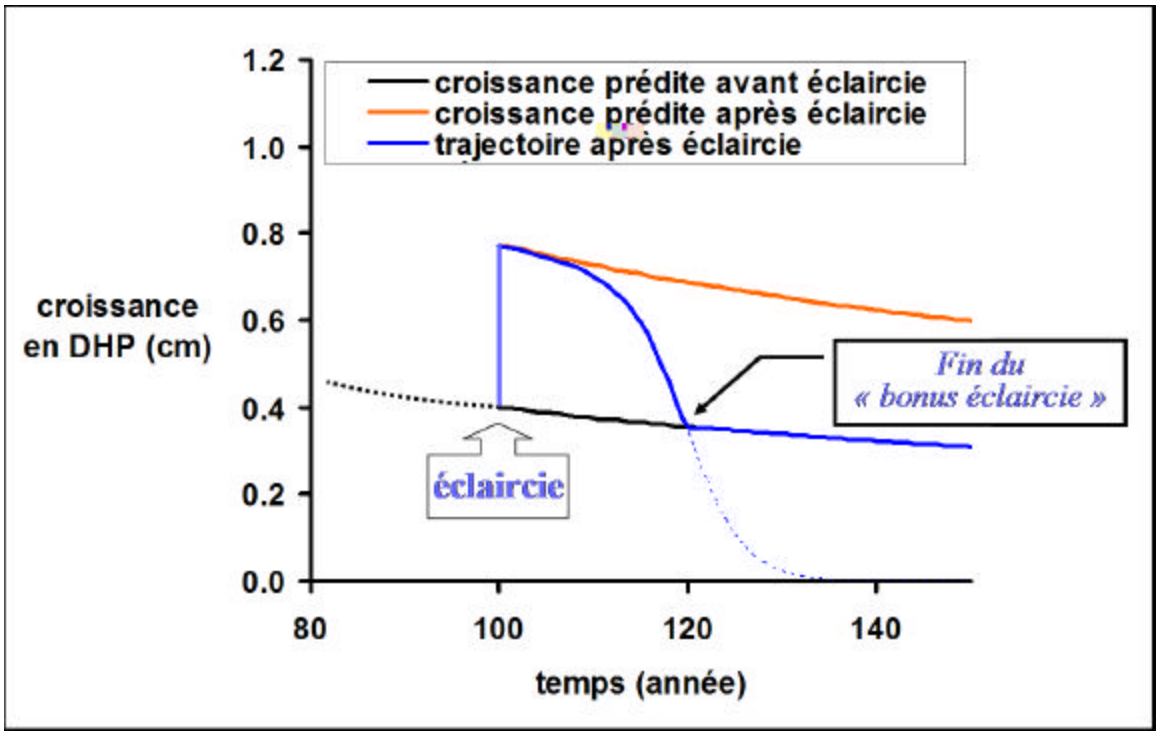


Figure 16. Exemple de trajectoire de la croissance d'une tige avant et après éclaircie telle que générée par les modèles et la fonction d'atténuation de la réponse à l'éclaircie.

4. Optimisation

4.1 Les différents éléments du système de simulation-optimisation

Les trois principaux éléments du système sont le simulateur de peuplements, le générateur de forêts virtuelles et l'optimisateur. Le simulateur est un programme permettant de projeter au cours du temps la croissance des tiges individuelles en fonction d'un régime d'éclaircie commerciale donné. Le générateur de forêts virtuelles vise à créer des forêts de départ pour les simulations. Quant à l'optimisateur, il s'agit d'un algorithme capable de trouver le maximum d'une fonction-objectif, ici le volume de sciage de pin blanc. Nous expliquons dans la partie 4.4 comment le couplage entre le simulateur et l'algorithme d'optimisation (ou optimisateur) permet de trouver le régime d'éclaircies fournissant la valeur maximale de la fonction-objectif pour une forêt initiale donnée.

4.2 Simulateur

Le simulateur contient des fonctions de croissance et de mortalité. Les fonctions de croissance proviennent des modèles développés (voir 4.2.2.1), tandis que la mortalité a été établie à partir de la littérature existante (voir 4.2.2.2). Un module distinct permet le calcul des volumes par produits récoltés à chaque éclaircie et à la coupe finale (voir 4.2.2.3).

4.2.1 Revue de la littérature

Plusieurs simulateurs de peuplements basés sur des modèles à l'échelle de l'arbre individuel sont décrits dans la littérature (Magnussen et Brand 1989 ; Hegyi 1974 ; Daniels et Burkhart 1975 ; Pukkala *et al.* 1998 ; Vettenranta et Miina 1999). Alors que le pin rouge a donné lieu à la construction de plusieurs simulateurs (Hatch 1971 ; Magnussen et Brand 1989), à notre connaissance aucun simulateur n'a été développé spécifiquement pour le pin blanc.

4.2.2 Construction du simulateur

On a choisi d'adopter une attitude conservatrice en ne faisant pas évoluer le peuplement au-delà de 200 ans. Ainsi, les simulations portent sur la période comprise entre l'âge de la forêt initiale (fixé ici à 100 ans) et 200 ans. Aucun rec rutement n'a été simulé. Les prédictions s'effectuent par périodes de cinq ans. La révolution se termine par une coupe finale, lors de laquelle l'ensemble des tiges sont récoltées.

4.2.2.1 Croissance

La croissance en DHP pour chaque période de cinq ans était prédite grâce aux modèles présentés dans la section précédente. Le modèle de croissance après éclaircie et la fonction d'atténuation de la réponse à l'éclaircie étaient utilisés dans tous les cas de disparition d'un ou de plusieurs compétiteurs d'une tige, que ce soit suite à une éclaircie ou suite à une mortalité.

En outre, des croissances maximales et minimales ont été introduites dans le simulateur afin d'éviter d'obtenir des croissances extrêmes non observées dans nos données (Tableau 1).

Tableau 1. Croissances maximales et minimales introduites dans le simulateur pour le pin blanc et le pin rouge.

Essence	Croissance minimale (cm/5 ans)	Croissance maximale (cm/5 ans)
Pin blanc	1,05	4,8
Pin rouge	0,55	3,0

4.2.2.2 Mortalité

Un pourcentage fixe de mortalité aléatoire, correspondant aux évènements stochastiques de type chablis ou maladies, peut être fixé par l'utilisateur.

La mortalité densité-dépendante a été établie à partir de l'équation de la ligne d'initiation de la mortalité des diagrammes de gestion de la densité pour le pin blanc (Smith et Woods 1997, Figure 17). En interdisant une augmentation du volume sans diminution de la densité au-delà de la ligne d'auto-éclaircie, nous avons adopté une approche conservatrice (une approche moins conservatrice aurait permis au peuplement d'évoluer entre la ligne d'auto-éclaircie et celle du maximum biologique).

Selon cette équation (Equation 7), la mortalité résultant du phénomène d'auto-éclaircie débute lorsque :

Equation 7. $1{,}7 * Ln(\text{nombre de tiges à l'hectare}) + 0{,}6 * Ln(DHPmoy) \geq 19{,}7$

Où :

- Ln = logarithme naturel
- DHPmoy = DHP moyen

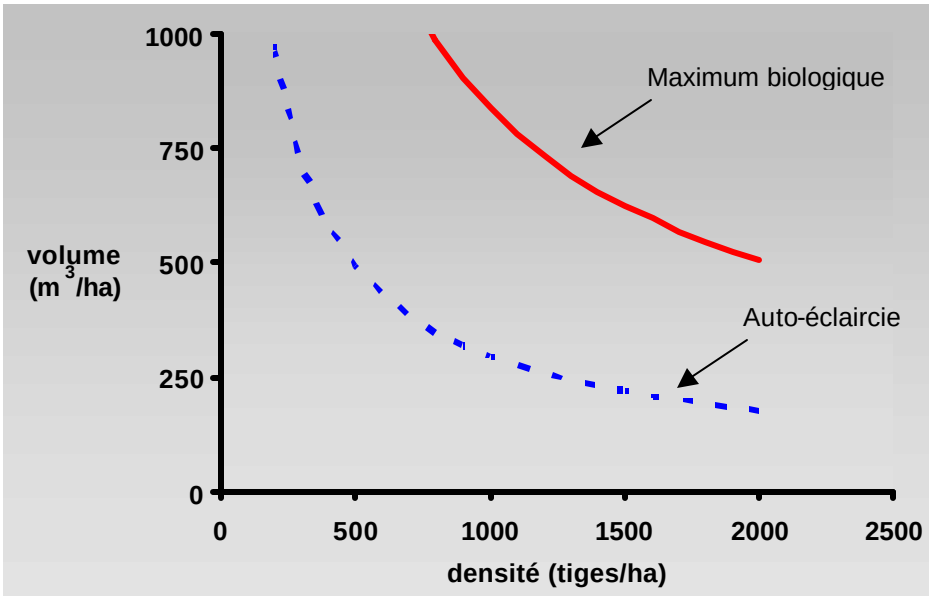


Figure 17. Ligne d'initiation de la mortalité densité-dépendante dans les diagrammes de gestion de la densité (d'après Smith et Woods 1997).

4.2.2.3 Calcul des volumes par produits

Données utilisées

- Tarifs de cubage

Le volume marchand brut de chaque arbre récolté a été calculé en utilisant les tarifs de cubage du MRN pour l'unité de gestion 73 (Equation 8 pour le pin blanc et Equation 9 pour le pin rouge).

Equation 8. $Vol = -5{,}17 * hauteur + 0{,}49 * DHP * hauteur + 0{,}024 * DHP^2 * hauteur$ *(PIB)*

Equation 9. $Vol = -0.046 * DHP * DHP - 2.12 * hauteur + 0{,}19 * DHP * hauteur + 0{,}031 * DHP^2 * hauteur$ *(PIR)*

Où le volume est exprimé en dm^3, la hauteur en m et le DHP en cm.

- Répartition par produits

Pour les tiges de pin blanc de DHP supérieur ou égal à 24 cm, nous avons utilisé des fonctions donnant la proportion de sciage et de pâte en fonction du DHP (Tableau 2, Figure 18). Ces fonctions ont été établies à partir de la longueur maximale de planches de 1'' x 3'' produites dans un m^3 pour un DHP donné.

Tableau 2. Hypothèses de répartition des volumes par produits pour le pin blanc.

DHP (cm)	Facteur inventaire-mesurage	Facteur mesurage forêt-mesurage usine	Pâte (%)	Sciage (%)
< 24	0,93	0,93	100,0	0,0
≥ 24	0,93	0,93	Fonction du DHP	Fonction du DHP

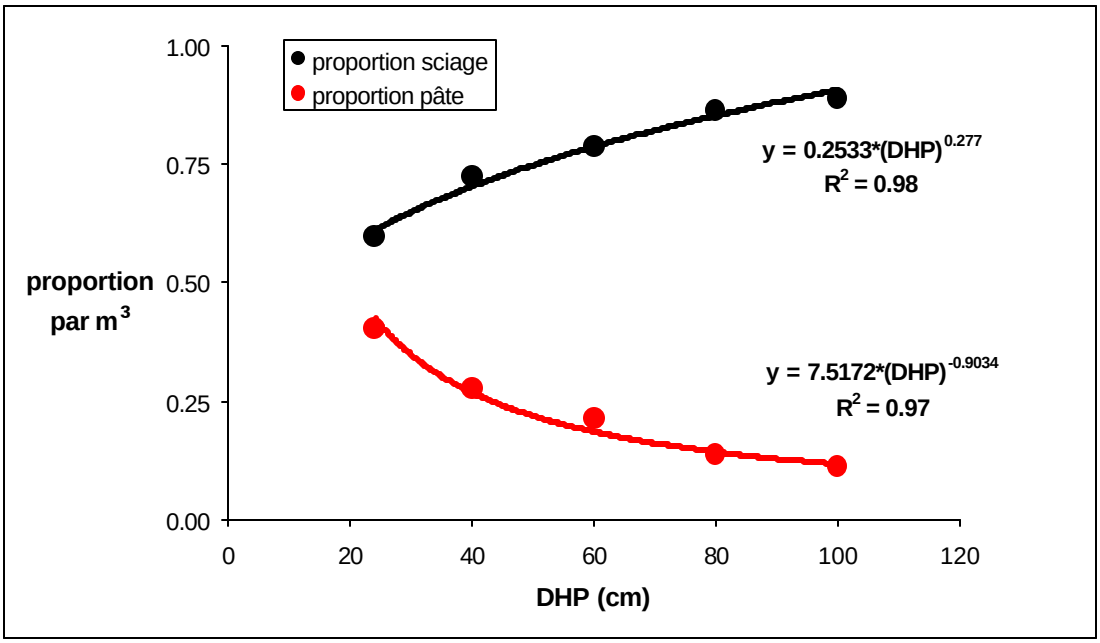


Figure 18. Proportion de bois de sciage et de bois à pâte par m^3 en fonction du DHP pour le pin blanc.

Des hypothèses simplificatrices ont été effectuées pour la répartition des volumes de pin rouge en poteaux de différentes longueurs (Tableau 3).

Tableau 3. Hypothèses de répartition des volumes par produits pour le pin rouge.

DHP (cm)	Facteur inventaire-mesurage	Facteur mesurage forêt-mesurage usine	Pâte (%)	Sciage (%)	Poteau 25-35' (%)	Poteau ≥ 35' (%)
< 21	0,97	1,10	100,0	0,0	0,0	0,0
21-29	0,97	1,10	6,6	28,4	65,0	0,0
≥ 29	0,97	1,10	6,6	28,4	32,5	32,5

Des facteurs de conversion ont été appliqués pour prendre en compte les différences de volume entre l'inventaire et le mesurage en forêt ainsi qu'entre le mesurage en forêt et le mesurage à l'usine (Tableau 2 et Tableau 3).

4.2.3 Fonctionnement du simulateur

Au début de chaque période de cinq ans, si le peuplement se trouve au dessus de la courbe d'auto-éclaircie (Figure 17), le simulateur fait mourir un nombre de tiges suffisant pour faire passer le peuplement en dessous de la courbe, en choisissant en premier lieu les tiges qui ont eu la croissance la plus faible durant la période de cinq ans précédente. Dans un deuxième temps, le pourcentage de mortalité aléatoire spécifié par l'utilisateur est appliqué. Les environnements de compétition sont ensuite calculés afin de déterminer la croissance en DHP à appliquer à chaque tige. Le simulateur garde en mémoire l'identité des tiges disparues aux étapes de mortalité et d'éclaircie, de façon à appliquer le modèle de croissance après éclaircie aux tiges voisines qui bénéficient de la suppression d'un ou plusieurs compétiteur(s) (voir section 3.3). Une fois les DHP après croissance obtenus, les nouvelles hauteurs sont calculées au moyen des équations hauteur-diamètre (voir 3.2.1.2). Les conditions de compétition sont mises à jour en utilisant ces nouvelles informations, et le cycle reprend (Figure 19).

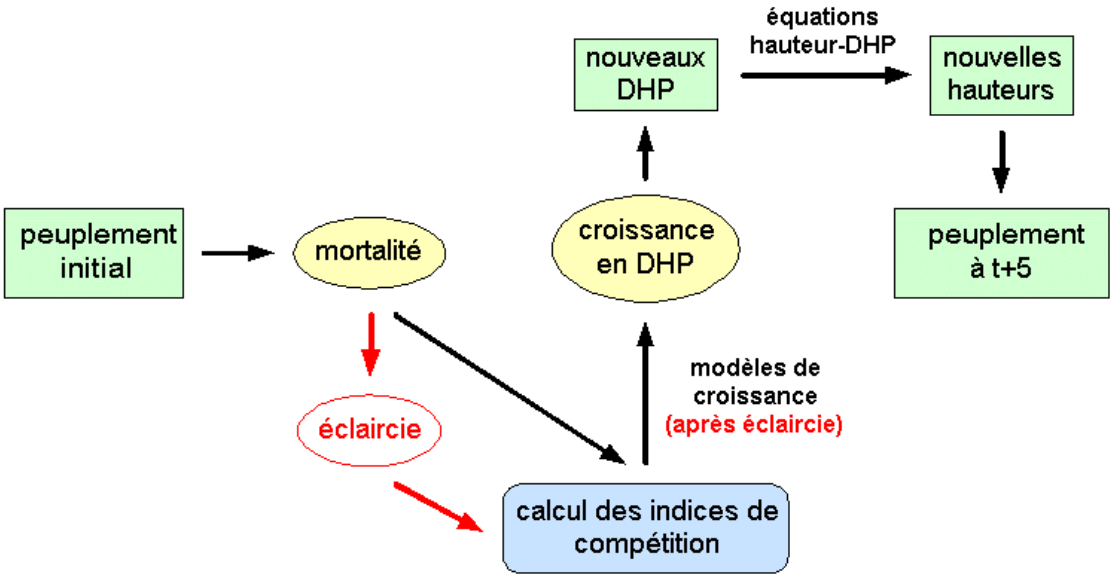


Figure 19. Étapes de fonctionnement du simulateur.

4.3 Générateur de forêts virtuelles

4.3.1 Revue de la littérature

Il était nécessaire de générer des peuplements virtuels servant de point de départ aux simulations. Ainsi, beaucoup de simulateurs de peuplements contiennent un module de création de peuplements caractérisés par différentes structures spatiales (Bella 1970 ; Hatch 1971). Les peuplements générés doivent bien entendu être « réalistes », c'est-à-dire posséder des caractéristiques structurales que l'on retrouve dans les peuplements réels (voir 4.3.3). La superficie des peuplements virtuels servant aux simulations varie, selon les études, entre 0,07 et 1 ha (Pukkala et Miina 1998 ; Miina 1996 ; Pukkala *et al.* 1998).

4.3.2 Méthodologie

L'objectif était de créer non pas un peuplement semblable en tous points à un peuplement donné, mais un peuplement présentant des caractéristiques voisines de celles des pinèdes étudiées. Les caractéristiques servant de base de comparaison pour la forêt virtuelle ont été obtenues en groupant les observations recueillies dans les trois peuplements échantillonnés à la Forêt de l'Aigle. La superficie totale du peuplement virtuel était de un hectare et comprenait une partie centrale de ¼ d'ha, constituant la partie utile de la forêt virtuelle, entourée d'une zone-tampon de 25 m de large visant à contourner le biais produit par l'absence de compétiteurs d'un côté pour les arbres situés en bordure de peuplement (Figure 20).

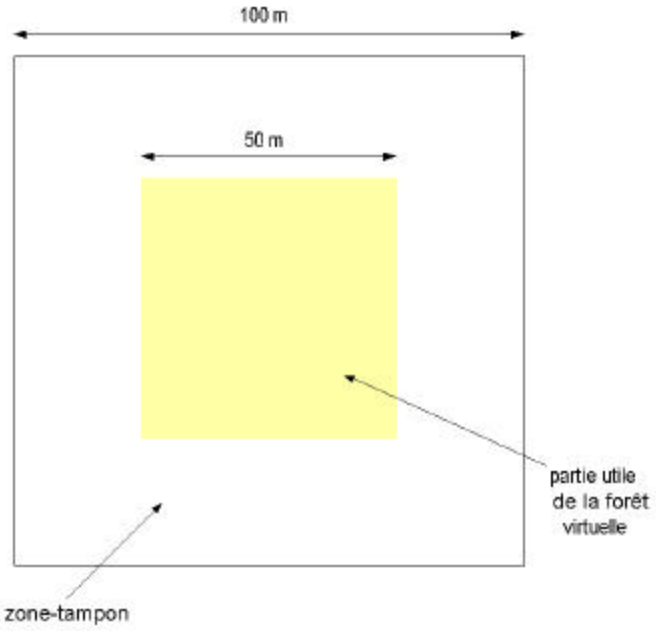


Figure 20. Forêt virtuelle : partie utile et zone-tampon.

Pour créer le peuplement virtuel, nous avons suivi la méthodologie développée par Goreaud (2000). La correspondance entre un peuplement virtuel et un peuplement réel se fait à plusieurs niveaux.

Le premier niveau correspond aux caractéristiques moyennes du peuplement. À partir du nombre de tiges par hectare, de la moyenne et de l'écart-type des DHP ainsi que du DHP minimum, une liste de tiges est générée en supposant que la distribution des DHP suit une loi normale, après quoi une essence est affectée à chaque tige de façon aléatoire en fonction des proportions d'essences à respecter.

Le deuxième niveau concerne la distribution spatiale des tiges. La structure spatiale de base, supposée aléatoire, est simulée à l'aide d'une loi de Poisson. Dans un deuxième temps, les tiges sont réorganisées à l'aide d'un processus de Gibbs (Goreaud 2000). Une telle réorganisation permet de simuler des structures spatiales uniformes ou plus ou moins agrégées.

Dans un troisième temps, il est possible de permuter les DHP des tiges afin d'obtenir un peuplement possédant une distribution spatiale de DHP donnée.

Le générateur de forêts virtuelles prend la forme d'un programme (Annexe 7).

4.3.3 Caractéristiques du peuplement virtuel

Nous avons suivi les étapes suivantes :

- estimation des caractéristiques des peuplements de la Forêt de l'Aigle,
- utilisation de ces caractéristiques pour générer le peuplement virtuel,
- vérification des similarités entre le peuplement virtuel et les peuplements de la Forêt de l'Aigle.

4.3.3.1 L'échelle d'étude : la placette de 5 m de rayon

Les caractéristiques de structure et de composition des peuplements d'où provenaient les tiges étudiées ont été analysées en se basant sur des placettes fictives de 5 m de rayon obtenues à partir de l'ensemble des tiges-sujets et des tiges compétitrices échantillonnées. 88 placettes à rayon fixe ont été dérivées à partir de l'inventaire réalisé au prisme 4 autour de chaque tige-sujet. Or, avec l'échantillonnage au prisme, les petites tiges ne sont comptées que lorsqu'elles sont proches. Ainsi, le diamètre minimal des tiges-compétition ayant été fixé à 20 cm, le rayon maximal des placettes pour éviter une sous-représentation des petites tiges était égal à 5 m (=20/4). Les caractéristiques de la Forêt de l'Aigle ont été établies à partir de 30 placettes choisies aléatoirement parmi les 88.

4.3.3.2 Densité, proportion en essences et distribution des DHP

La densité moyenne de la Forêt de l'Aigle est de 325 tiges à l'hectare et le pourcentage de pins blancs de 82 %, deux caractéristiques reproduites dans la forêt virtuelle. La moyenne et la variance du DHP moyen, du nombre de tiges moyen et de la surface terrière totale dans les placettes de 5 m pour la Forêt de l'Aigle et pour la forêt virtuelle figurent dans le Tableau 4.

Tableau 4. Comparaison entre les caractéristiques de la forêt virtuelle et celles de la Forêt de l'Aigle à partir de 30 placettes circulaires de 5 m de rayon.

	Forêt de l'Aigle			Forêt virtuelle		
	Nombre moyen de tiges	Surface terrière totale	DHP moyen	Nombre moyen de tiges	Surface terrière totale	DHP moyen
Moyenne	2,3	0,3	39,8	2,7	0,3	37,4
Variance	1,3	0,02	65,2	0,6	0,02	24,1

La distribution des DHP de la forêt virtuelle est voisine de celle des peuplements la Forêt de l'Aigle tant pour les pins blancs (Figure 21) que pour les pins rouges (Figure 22).

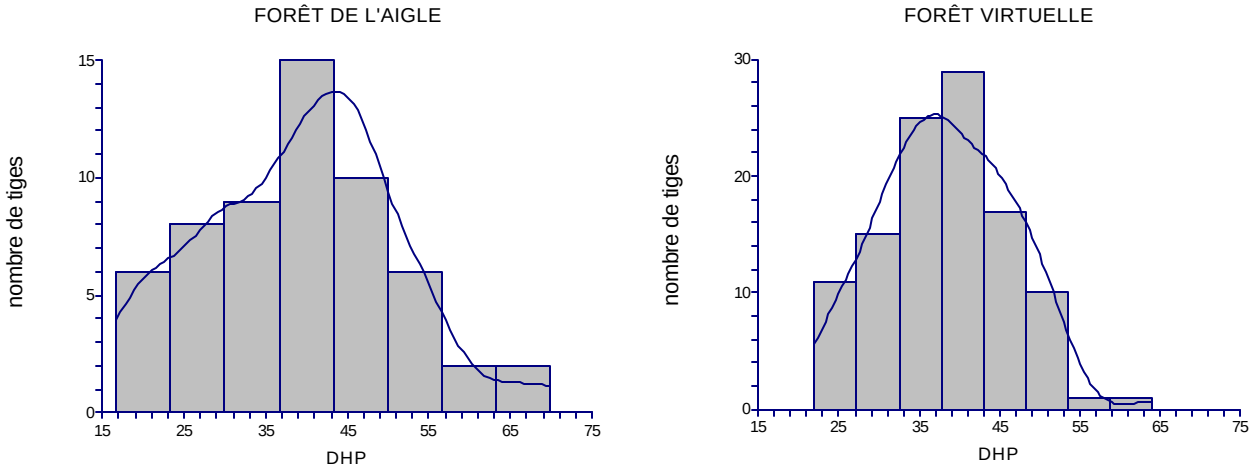


Figure 21. Histogrammes de distribution des DHP pour le pin blanc : comparaison entre la Forêt de l'Aigle et la forêt virtuelle.

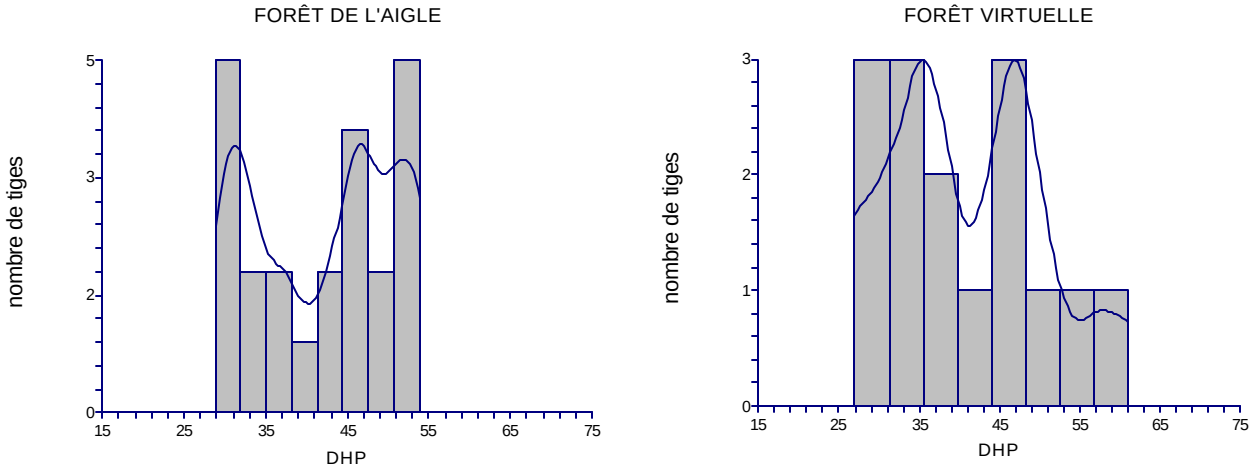


Figure 22. Histogrammes de distribution des DHP pour le pin rouge : comparaison entre la Forêt de l'Aigle et la forêt virtuelle.

4.3.3.3 Distribution spatiale des tiges

Le coefficient de dispersion, égal à la variance divisée par la moyenne du nombre de tiges dans les placettes de 5 m de rayon, vaut 0,5 pour la Forêt de l'Aigle et 0,2 pour la forêt virtuelle. Il s'agit d'une distribution relativement uniforme (Figure 23).

4.3.3.4 Distribution spatiale des DHP

Le patron de distribution des DHP dans un rayon de 5 m est aléatoire à la Forêt de l'Aigle. Par conséquent, aucune permutation des DHP n'a été effectuée (voir 4.3.2).

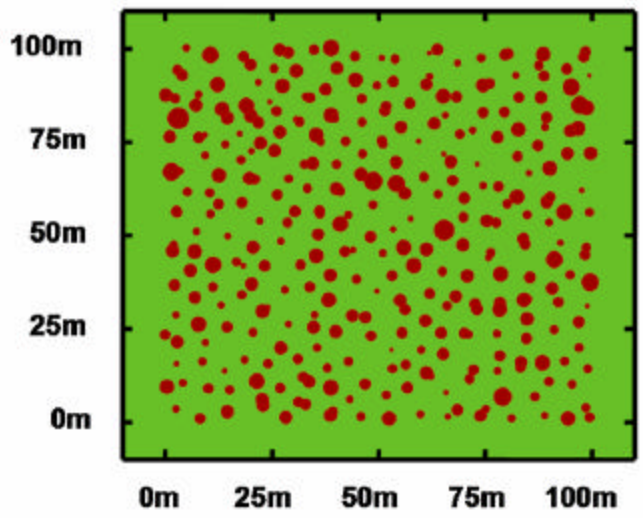


Figure 23. Représentation spatiale de la forêt virtuelle (la taille des ronds est proportionnelle aux DHP).

4.4 Algorithme d'optimisation

4.4.1 Choix de l'algorithme d'optimisation

La méthode d'optimisation choisie a été celle de Hooke et Jeeves (1984). Il s'agit d'un algorithme non linéaire de type «direct search ». Cet algorithme a déjà fait l'objet de couplages avec des modèles de croissance à l'échelle de l'arbre dépendant des distances et a été employé avec succès pour plusieurs problèmes d'optimisation dans le domaine de l'aménagement forestier, notamment en Finlande et aux États-Unis. C'est pourquoi il a été choisi de préférence à des algorithmes plus récents et plus performants (tels que les algorithmes heuristiques), pour lesquels le couplage avec le simulateur de peuplements aurait pu s'avérer extrêmement complexe.

4.4.2 Caractéristiques de la méthode de Hooke et Jeeves

Pour plus de détails concernant le fonctionnement détaillé de l'algorithme de Hooke et Jeeves, nous référons le lecteur à: Hooke et Jeeves 1961 ; Roise 1986a ; Haight et Monserud 1990 ; et Valsta 1992. L'algorithme est présenté à l' Annexe 8 et un exemple de cheminement dans l'espace d'optimisation est donné à l' Annexe 9. Lorsque la fonction à optimiser est convexe, le

maximum trouvé par ce type d'algorithme est le maximum global. Dans notre cas, la situation est plus complexe puisqu'il existe de nombreux maxima locaux ; ainsi, on ne peut pas savoir si un maximum détecté par l'algorithme est un maximum local ou s'il s'agit du maximum global (Valsta 1992). C'est pourquoi il est nécessaire d'effectuer plusieurs séquences d'optimisation en utilisant des valeurs initiales différentes pour les variables décisionnelles, ceci afin d'augmenter les chances de trouver l'optimum global (Miina et Pukkala 2002).

4.4.3 Fonction-objectif et variables décisionnelles

4.4.3.1 Fonction-objectif

La fonction-objectif choisie était le volume de sciage de pin blanc. La maximisation du volume a été jugée préférable à la maximisation de la valeur économique. En effet, une utilisation judicieuse de la valeur économique aurait nécessité une étude du contexte économique plus global, incluant le coût de création d'emplois, la prise en compte de la valeur du peuplement en tant qu'attrait touristique, etc. Des essais montrent qu'une analyse financière pure correspondant à la maximisation de la valeur actuelle nette basée sur un taux d'actualisation aurait restreint l'horizon d'exploitation à 120-140 ans (en fonction du taux d'actualisation choisi), du fait du fort capital sur pied en place à 100 ans. C'est pourquoi nous avons préféré maximiser la valeur économique par l'intermédiaire du volume de produit ayant le plus d'influence sur cette valeur, c'est-à-dire le volume de sciage de l'essence dominante du peuplement.

4.4.3.2 Variables décisionnelles

Un régime d'éclaircies donné se caractérise par le nombre d'éclaircies, le moment où interviennent ces éclaircies, le moment de la coupe finale, l'intensité des éclaircies et le type des éclaircies (par le bas, par le haut, etc.). Le choix des variables décisionnelles est issu de la nécessité d'un compromis entre une relative souplesse (possibilité de réaliser des éclaircies à intervalles irréguliers, intensité d'éclaircie variable au cours de la révolution…) et le nombre restreint de variables imposé par les capacités d'un ordinateur. Les variables suivantes ont été retenues :

- X_i : nombre d'années entre l'instant initial et la $i^{ème}$ éclaircie,
- N : nombre d'années entre l'instant initial et la coupe finale,
- Y_i : pourcentage des tiges récoltées dans la classe des petites tiges,
- Y'i : pourcentage des tiges récoltées dans la classe des grosses tiges.

(Avant chaque éclaircie, les tiges étaient séparées en deux classes contenant un nombre de tiges égales : les « petites tiges » et les « grosses tiges ».)

Du fait de la multiplication des solutions possibles si le nombre d'éclaircie était traité comme une des variables à optimiser, chaque nombre d'éclaircies différent constituait un problème différent pour l'optimisateur. Le nombre d'éclaircies était donc fixé au début de chaque simulation.

4.4 Couplage entre le simulateur et l'optimisateur

Le principe du couplage entre le simulateur de peuplements et l'optimisateur est le suivant : l'optimisateur cherche la combinaison des variables décisionnelles fournissant la valeur de la fonction-objectif la plus élevée ; pour chaque combinaison de variables décisionnelles, il fait appel au simulateur pour le calcul de la fonction-objectif (Figure 24). Ce type d'approche a été expérimentée avec succès par différents auteurs (Haight et Monserud 1990 ; Roise 1986b ; Arthaud et Klemperer 1988 ; Vettenranta et Miina 1999 ; Wikström 2000) pour optimiser l'aménagement de peuplements forestiers.

Ainsi, pour chaque régime d'éclaircie possible, l'optimisateur transfère au simulateur la valeur de chacune des variables : moment des éclaircies, intensité et type de chaque éclaircie, etc. Le simulateur fait croître la forêt en fonction du régime d'éclaircie associé à ces valeurs et calcule la valeur de la fonction-objectif (ici le volume de sciage de pin blanc) associée à ce régime d'éclaircie sur l'ensemble de la révolution. Ce volume est ensuite retourné à l'optimisateur, qui le conserve en mémoire. L'optimisateur fait alors un pas dans l'espace décisionnel, ce qui correspond à la modification de la valeur d'une ou plusieurs des variables qui définissent le régime d'éclaircie. Les nouvelles valeurs sont envoyées au simulateur, qui calcule le nouveau volume de sciage de pin blanc produit et le transmet à l'optimisateur. L'optimisateur compare ce volume au volume maximal en mémoire et en déduit son prochain déplacement. L'arrêt de l'optimisateur correspond à la détermination d'un maximum de la fonction-objectif (aucun déplacement ne produit un volume de sciage de pin blanc plus élevé) (Figure 24).

Le programme de simulation-optimisation est présenté à l' Annexe 10.

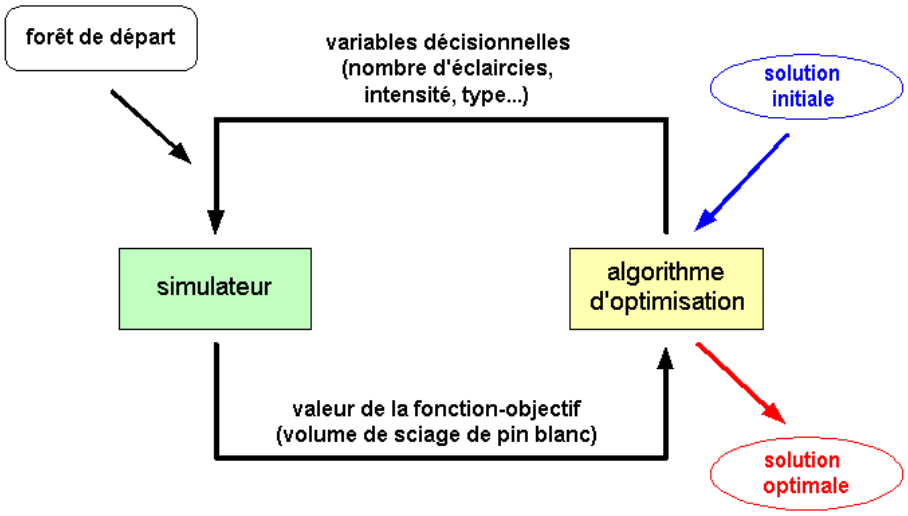


Figure 24. Couplage entre le simulateur et l'algorithme d'optimisation.

5. Résultats de l'optimisation

5.1 Approche

L'approche choisie a été d'optimiser les régimes d'éclaircie pour 0, 1, 2, 3 et 4 éclaircie(s). Rappelons que chaque nombre d'éclaircie constitue un problème d'optimisation différent qui doit être exploré séparément. Une séquence d'optimisation correspond à un point de départ donné, autrement dit à une combinaison de valeurs initiales des variables caractérisant un régime d'éclaircie. Par exemple, dans le cas d'un régime à une éclaircie, un des points de départ choisi était :

- coupe finale à 150 ans (N = 50)
- éclaircie à 125 ans (X1 = 25)
- 0 % de petites tiges prélevées lors de l'éclaircie (Y1 = 0)
- 45 % de grosses tiges prélevées lors de l'éclaircie (Y'1 = 45)

Afin d'augmenter les chances de trouver l'optimum global de la fonction-objectif, chaque problème d'optimisation a été résolu en utilisant dix points de départ différents (voir 4.4.2). Pour chaque nombre d'éclaircies, le régime optimum retenu était celui correspondant au plus élevé des dix volumes de sciage de pin blanc maximaux trouvées par l'optimisateur. Les paramètres suivants étaient fixes :

- b et c (paramètres de la fonction d'atténuation de la réponse à l'éclaircie) : respectivement -3 et 20,
- pourcentage de mortalité aléatoire : 0,
- ordre de priorité des tiges pour la mortalité densité-dépendante : par ordre de croissance croissante,
- ordre de récolte des tiges lors des éclaircies : par DHP croissant pour les petites tiges et par DHP décroissant pour les grosses tiges.

5.2 Résultats

Pour chaque nombre d'éclaircie(s) compris entre 0 et 4, les caractéristiques du régime d'éclaircie produisant le volume de sciage de pin blanc maximal sont présentées au Tableau 5. Nous présentons au Tableau 6 le volume de qualité (volume de sciage de pin blanc et pin rouge et volume de poteau de pin rouge) récolté à chaque éclaircie pour les cinq régimes optimaux. Les tendances observées pour les volumes de qualité de pin blanc et de pin rouge sont identiques à celles présentées par les volumes de sciage de pin blanc.

Les régimes avec éclaircie(s) fournissent un volume largement plus élevé que le meilleur régime dépourvu d'éclaircie (Tableau 6). De plus, pour tous les régimes avec au moins une éclaircie, le volume maximal s'obtient en effectuant la coupe finale le plus tard possible, c'est-à-dire à 200 ans (Tableau 5). Les éclaircies produisent une forte augmentation du volume de qualité récolté sur l'ensemble de la révolution, et ce même à un âge largement supérieur à 100 ans (Figure 25). Ces résultats confirment que l'allongement de la révolution est une avenue intéressante. Il suffit pour s'en convaincre de comparer le volume de qualité produit si l'on effectue une coupe finale à 100 ans, qui est de 306 m^3/ha, avec le volume de qualité produit en différant la coupe finale à 175 ans (régime sans éclaircie, Tableau 6) soit 579,4 m^3/ha, ce qui correspond à une augmentation de 90 %.

En ce qui concerne les régimes comportant au moins une éclaircie, les volumes produits diffèrent relativement peu en fonction du nombre d'éclaircie(s). Cependant, on note une légère tendance à l'augmentation du volume lorsque le nombre d'éclaircie(s) augmente.

Les pourcentages du volume total représentés par le volume de qualité sont élevés pour l'ensemble des régimes optimaux (Tableau 6). Notons qu'une variété de régimes d'éclaircie différents permettent d'obtenir des volumes de sciage de pin blanc quasiment identiques (données non présentées). Ce résultat pourra être mis à profit lors des choix effectués par l'aménagiste.

Tableau 5. Caractéristiques des régimes d'éclaircie optimaux.

Nombre d'éclaircie(s)	Âge CF	Âge EC1	Âge EC2	Âge EC3	Âge EC4	% P EC1	% G EC1	% P EC2	% G EC2	% P EC3	% G EC3	% P EC4	% G EC4
0	175												
1	200	110				15	15						
2	200	130	135			25	0	10	5				
3	200	105	110	160		0	5	5	10	5	5		
4	200	130	155	190	195	10	10	10	10	10	10	10	10

Âge CF = âge du peuplement à la coupe finale ; âge ECi = âge du peuplement à la i ème éclaircie ; % P = pourcentage des tiges récoltées dans la classe des petites tiges ; % G = pourcentage des tiges récoltées dans la classe des grosses tiges

Tableau 6. Volume de qualité (sciage de pin blanc, sciage de pin rouge et poteaux de pin rouge) produit à chaque éclaircie pour les régimes optimaux.

	0 éclaircie	1 éclaircie	2 éclaircies	3 éclaircies	4 éclaircies
1ère éclaircie		109,7 (80,7 %)	64,4 (73,6 %)	40,8 (80,2 %)	93,3 (80,5 %)
2ème éclaircie			80,8 (84,3 %)	53,4 (84,7 %)	91,6 (77,7 %)
3ème éclaircie				48,5 (86,1 %)	110,6 (84,6 %)
4ème éclaircie					106,3 (84,1 %)
Coupe finale	579,4 (85,2 %)	760,0 (85,7 %)	683,4 (86,3 %)	731,7 (84,8 %)	502,5 (88,0 %)
Total	579,4	869,7	828,6	874,4	904,3

Dans chaque case, le premier nombre représente le volume de qualité en m^3/ha et le nombre entre parenthèses le volume de qualité en pourcentage du volume total.

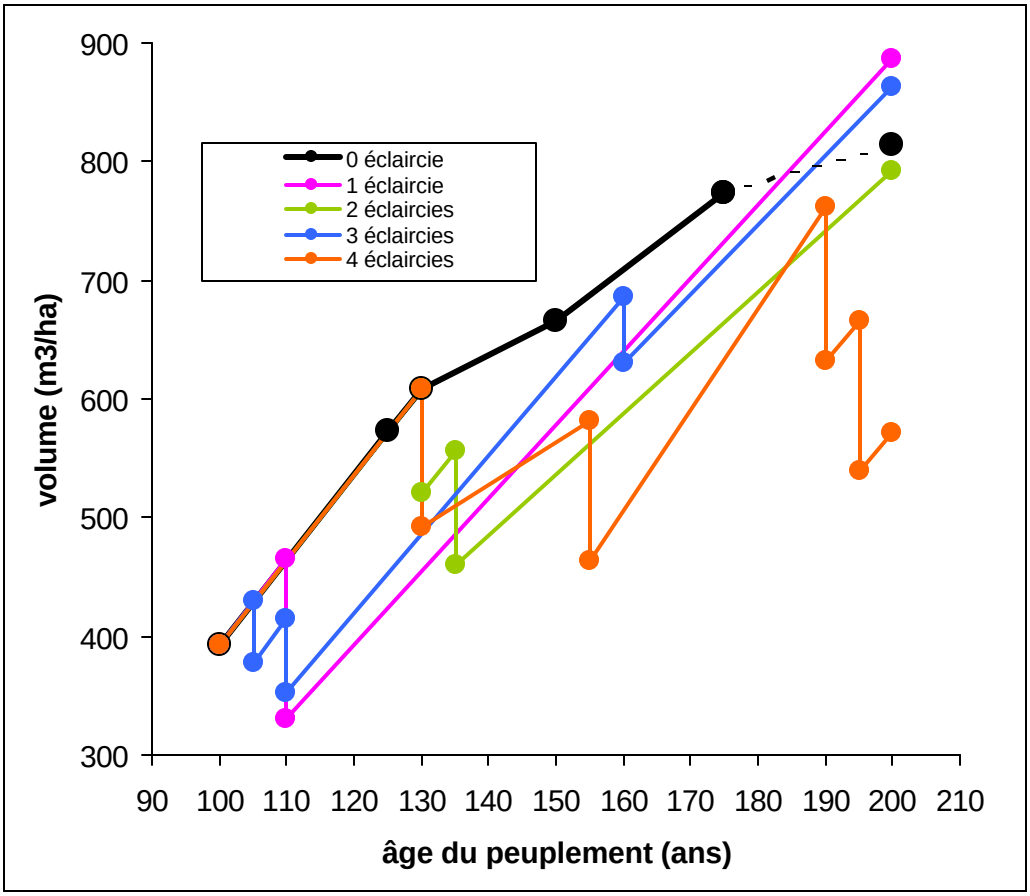


Figure 25. Évolution du volume total sur pied en fonction de l'âge du peuplement pour les régimes d'éclaircie optimaux correspondant à chaque nombre d'éclaircie.

On a comparé les volumes de sciage produits par les régimes optimaux à ceux produits par le régime actuellement employé pour l'aménagement des pinèdes de la Forêt de l'Aigle. En première approximation, on a supposé que ce régime comprenait des éclaircies mixtes avec prélèvement de 30 % des tiges (15 % de prélèvement dans les petites tiges et 15 % de prélèvement dans les grosses tiges) à 100 et 120 ans et une coupe finale à 140 ans. Il est intéressant de constater que le régime actuel fournit un total d'environ 570 m^3/ha de volume de qualité (sciage et poteau), ce qui est largement plus faible que les volumes associés aux régimes optimaux (Tableau 6).

Pour conclure, rappelons que les régimes optimaux ont été obtenus uniquement sur un critère de volume ; par conséquent, il serait nécessaire de mener une analyse revenus-coûts pour déterminer si les revenus apportés par les volumes supplémentaires engendrés par les éclaircies justifient les investissements liés à ces éclaircies.

6. Discussion et mise en application de l'outil d'optimisation

6.1 Utilisation à l'échelle de l'aménagement

L'outil développé pourra être utilisé pour optimiser la possibilité en pin. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une forêt virtuelle correspondant à chaque strate où les pins sont des essences dominantes. La création d'une forêt virtuelle peut se faire soit à partir des données d'inventaires habituelles (non spatiaux), en supposant une structure spatiale comparable à celle des pinèdes échantillonnées dans le cadre de cette étude, soit à partir d'inventaires comportant la position des tiges. Cette deuxième solution a l'avantage de permettre une meilleure caractérisation de la structure spatiale des peuplements qui composent la strate et devrait donc fournir des résultats d'optimisation plus fiables.

Si cette deuxième solution était retenue, l'unité d'inventaire pourrait être une parcelle de 25 m x 25 m, dans laquelle chaque tige serait repérée par ses coordonnées, son essence et son DHP. Une dizaine de parcelles par strate suffirait à générer une forêt virtuelle correspondant à cette strate. Soulignons que l'investissement lié à ce type d'inventaire est relativement faible. En effet, on estime que trois jours à deux personnes suffisent pour réaliser dix parcelles de 25 m x 25 m (représentant un total de 2,5 hectares) avec un équipement adéquat.

La création de chaque forêt virtuelle pourrait être réalisée par l'IQAFF en deux jours environ. Par la suite, en comptant dix points de départ différents par nombre d'éclaircie(s) (voir 4.4), il faudrait compter environ deux jours par nombre d'éclaircie(s) (comprenant le temps-ordinateur et le temps nécessaire à l'analyse des résultats) pour l'optimisation.

6.2 Utilisation à l'échelle de la sylviculture

L'outil d'optimisation peut également être utilisé pour décider de l'éclaircie à effectuer dans un peuplement donné. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un inventaire spatial du type de celui proposé au paragraphe précédent.

6.3 Développements et améliorations possibles

L'outil nécessite encore différentes améliorations.

6.3.1 Champ d'application de l'outil

Rappelons en premier lieu que les modèles de croissance n'ont pas été validés avec un set de données indépendant (voir 3.2.3.3). Une telle validation s'impose afin de confirmer la validité des modèles pour d'autres peuplements de même composition et situés sur le même type de dépôt (2BE) que les peuplements échantillonnés.

6.3.1.1 Composition des strates

Pour l'instant, l'outil développé n'est pas adapté à des peuplements comportant une proportion non négligeable d'essences autres que le pin blanc et le pin rouge. Ainsi, dans un premier temps, son utilisation devrait être restreinte à des forêts virtuelles comportant le moins possibles d'autres essences. Dans un deuxième temps, il serait tout à fait envisageable d'inclure des tiges de peuplier-faux-tremble et d'épinettes, par exemple en leur attribuant une croissance moyenne et en supposant que leur effet sur la croissance des pins est le même que celui d'un pin de diamètre identique. Ces essences étant le plus souvent récoltées lors de la première éclaircie, leur effet à long terme sera peu important.

6.3.1.2 Type de dépôt

Rappelons également que les données utilisées pour bâtir les modèles concernent seulement le type de dépôt 2BE. Or la croissance du pin blanc est grandement influencée par la qualité de site (Gillespie et Hocker 1986b). C'est pourquoi il serait important de réaliser une calibration des modèles avant d'appliquer l'outil sur les sites de type 1A par exemple.

6.3.2 Connaissances manquantes

6.3.2.1 Âge de sénescence

Des données en provenance de l'Ontario semblent indiquer que les peuplements de pin blanc peuvent se maintenir jusqu'à un âge avancé sans que survienne une mortalité importante due au phénomène de sénescence (D'Eon, communication personnelle). Il serait utile de connaître avec certitude l'âge où le volume total des forêts de pins commence à diminuer, c'est-à-dire l'âge auquel la croissance des arbres résiduels ne compense plus la perte de volume due à la mortalité. En ce sens, une analyse de données portant sur des forêts anciennes (une source possible étant les études du USDA) serait extrêmement utile pour mieux situer l'horizon sur lequel le simulateur peut être utilisé.

6.3.2.2 Modèles de croissance

La structure du couplage entre simulateur et optimisateur permet d'apporter des modifications à l'un sans que cela ait des conséquences pour l'autre : ainsi, au fur et à mesure que les modèles de croissance seront améliorés ou que des modèles de mortalité seront développés, ces

modèles pourront remplacer les modèles actuels. Notamment, des données sur l'atténuation dans le temps de la réponse à l'éclaircie pour le pin blanc et le pin rouge permettraient de préciser la fonction d'atténuation de la réponse à l'éclaircie.

6.3.3 Limites

Nous n'avons tenu compte ni des fluctuations de prix au cours du temps, ni des risques de chablis, ni d'éventuelles dépréciations de la qualité dues aux défauts.

Les prix par m^3 de poteau de pin rouge ont été supposés invariables en fonction du diamètre. Or, la valeur des poteaux de grande dimensions peut être dix fois supérieure à celle des poteaux plus petits (Brown 1992).

7. Conclusion

L'approche du couplage entre un simulateur de croissance et un optimisateur semble particulièrement prometteuse. La méthodologie développée a le mérite de mettre en évidence plusieurs lacunes dans les connaissances actuelles, notamment en ce qui concerne l'horizon d'exploitabilité du peuplement ou encore l'atténuation de la réponse à l'éclaircie au cours du temps. Sur la base des résultats obtenus à partir de notre forêt virtuelle, il apparaît que les régimes d'éclaircie optimaux identifiés permettent d'obtenir un volume de sciage et de poteau largement supérieur à celui fournit par le régime actuellement utilisé à la Forêt de l'Aigle. Par ailleurs, il existe un large éventail de régimes d'éclaircie produisant des volumes de sciage et de poteau relativement similaires, ce qui laisse une certaine flexibilité à l'aménagiste. L'outil développé peut aussi être utilisé à l'échelle de la sylviculture pour identifier les régimes d'éclaircie tirant le meilleur profit des particularités de chaque peuplement. À l'échelle de l'aménagement comme à l'échelle de la sylviculture, l'utilisation de l'outil nécessite une représentation réaliste des caractéristiques des strates et des peuplements de pins pour lesquels on vise à identifier les régimes d'éclaircie optimaux. L'effort de récolte de données sur le terrain apparaît cependant modeste en relation avec les retombées escomptées.

Références citées

Abrams, M.D. et Orwig, D. 1996. A 300-year history of disturbance and canopy recruitment for co-occurring white pine and hemlock on the Allegheny Plateau, U.S.A. Journal of Ecology 84: 353-363.

Alemdag, I. S. 1978. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce. Can. For. Serv., Forest Manage. Inst. Inf. Rep. FMR-X-108.

Anderson, P., Zasada, J. C., Erikson, G. W. et Zasada, Z. A. 2002. Thinning in mature eastern white pine : 43-year case study. The Forestry Chronicle 78: 539-549.

Arthaud, G. J. et Klemperer, W. D. 1988. Optimizing high and low thinnings in Loblolly pine with dynamic programming. Canadian Journal of Forest Research 18: 1118-1122.

Bella, I. E. 1970. Simulation of growth, yield and management of aspen. Unpublished Ph. D. thesis, Univ. British Columbia.

Benzie, J. W. 1977. Manager's handbook for red pine in the North Central States. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-33. 22p.

Bouillon, D. 2003. Preservation and restoration of white pine stands: is blister rust a threat in the context of our silvicultural approach? Proceedings of the White pine blister rust workshop, Ottawa, Ontario, March 27-28: 15-18.

Brown, J. L. 1992. Principes et normes d'aménagement des peuplements naturels de pin blanc et de pin rouge proposés pour le Québec. Note de recherche forestière MRN Numéro 46. 10 p.

Burgess, D. et Robinson, C. 1998. Canada's oldest permanent sample plots : thinning in white and red pine. The Forestry Chronicle 74: 606-616.

Daniels, R. F. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual Loblolly pine growth. Forest Science 22: 454-456.

Daniels, R. F. et Burkhart, H. E. 1975. Simulation of individual tree growth and stand development in managed Loblolly pine plantations.

Gillespie, A. R. et Hocker, H. W. 1986a. The influence of competition on individual white pine thinning response. Canadian Journal of Forest Research 16: 1355-1359.

Gillespie, A. R. et Hocker, H. W. 1986b. Thinning response of immature white pine. Northern Journal of Applied Forestry 3: 148-150.

Goreaud, F. 2000. Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et à la modélisation de peuplements complexes. Thèse de l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (Nancy).

Haight, R. G. et Monserud, R. A. 1990. Optimizing any-aged management of mixed-species stands. I: Performance of a coordinate-search process. Canadian Journal of Forest Research 20: 15-25.

Hatch, C. R. 1971. Simulation of an even-aged red pine stand in northern Minnesota. Unpublished Ph. D. thesis, University of Minnesota.

Hegyi, F. 1974. A simulation model for managing jack pine stands. J Fries. Royal College of Forestry Research note 30 : Growth models for tree and stand simulation.

Hibbs, D. E. et Bentley, W. R. 1987. White pine management: volume and value growth. Northern Journal of Applied Forestry 4: 197-201.

Hooke, R. et Jeeves, T. A. 1961. Direct search solution of numerical and statistical problems. J Assoc Comp Mach 8: 212-221.

Hynynen, J. 1995. Predicting the growth response to thinning for Scots pine stands using individual tree growth models. Silva Fennica 29: 225-246.

Jonsson, G. 1995. Thinning response functions for single trees of *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. Scandinavian Journal of Forest Research 10: 353-369.

Magnussen, S. et Brand, D. G. 1989. A competition process driven growth model for red pine. Petawawa National Forestry Institute, Information Report PI-X-89. Forestry Canada.

Martin, G. L. et Ek, A. R. 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. Forest Science 30: 731-743.

Miina, J. 1996. Optimizing thinning and rotation in a stand of *Pinus sylvestris* on a drained peatland site. Scandinavian Journal of Forest Research 11: 182-192.

Miina, J. et Pukkala, T. 2002. Application of ecological field theory in distance-dependent growth modelling. Forest Ecology and Management 161: 101-107.

Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1997. Manuel d'Aménagement Forestier. 3ème édition. Québec. 121 p. + Annexes.

Ministère des Ressources naturelles du Québec. 1999. Méthodes d'échantillonnage pour les suivis des interventions forestières, exercice 1999-2000. 201 p.

Nolet, P., Lorenzetti, F. et Ostojic, S. 1999. Étude d'accroissement après intervention dans une pinède blanche. Rapport IQAFF. 30 p.

Pukkala, T. et Miina, J. 1998. Tree-selection algorithms for optimizing thinning using a distance-dependant growth model. Canadian Journal of Forest Research 28: 693-702.

Pukkala, T., Miina, J., Kurttila, M. et Kolström, T. 1998. A spatial yield model for optimizing the thinning regime of mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. Scandinavian Journal of Forest Research 13: 31-42.

Roise, J. P. 1986a. An approach for optimizing residual diameter class distributions when thinning even-aged stands. Forest Science 32: 871-881.

Roise, J. P. 1986b. A nonlinear programming approach to stand optimization. Forest Science 32: 735-748.

Schlaegel, B. E. 1971. White pine production best at high stocking. US For. Serv. Res. Note Nth. Cent. For. Exp. Sta. No. NC-115. 2 p.

Seymour, R. S. et Smith, D. M. 1987. A new stocking guide formulation applied to eastern white pine. Forest Science 33: 469-484.

Smith, D.J. et Woods, M.E. Red pine and white pine density management diagrams for Ontario. SCSS Technical report 48. 1997.

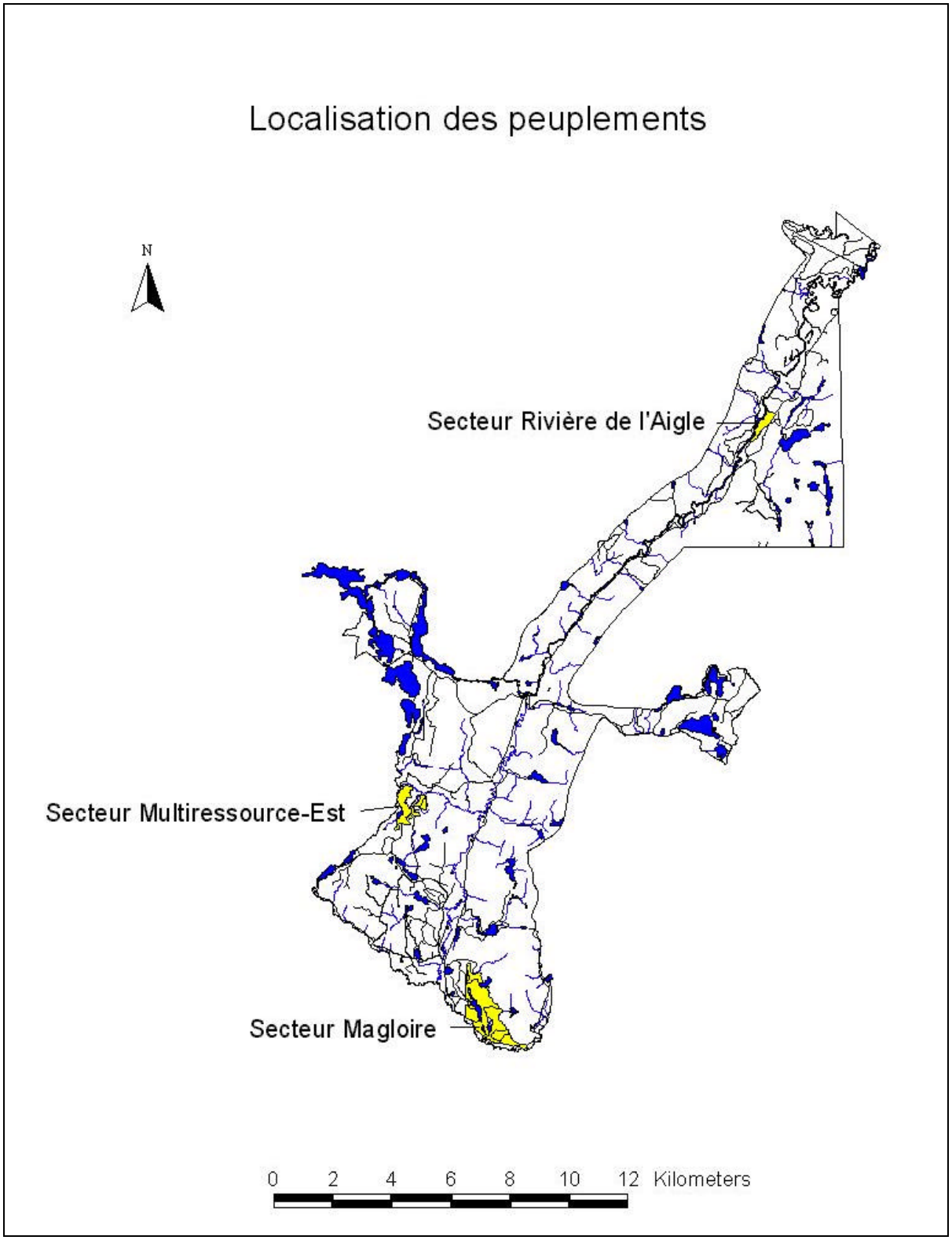
Valsta, L. 1992. An optimization model for Norway spruce management based on individual-tree growth models. Acta Forestalia Fennica 232.

Vettenranta, J. et Miina, J. 1999. Optimizing thinnings and rotation of Scots pine and Norway spruce mixtures. Silva Fennica 33: 73-84.

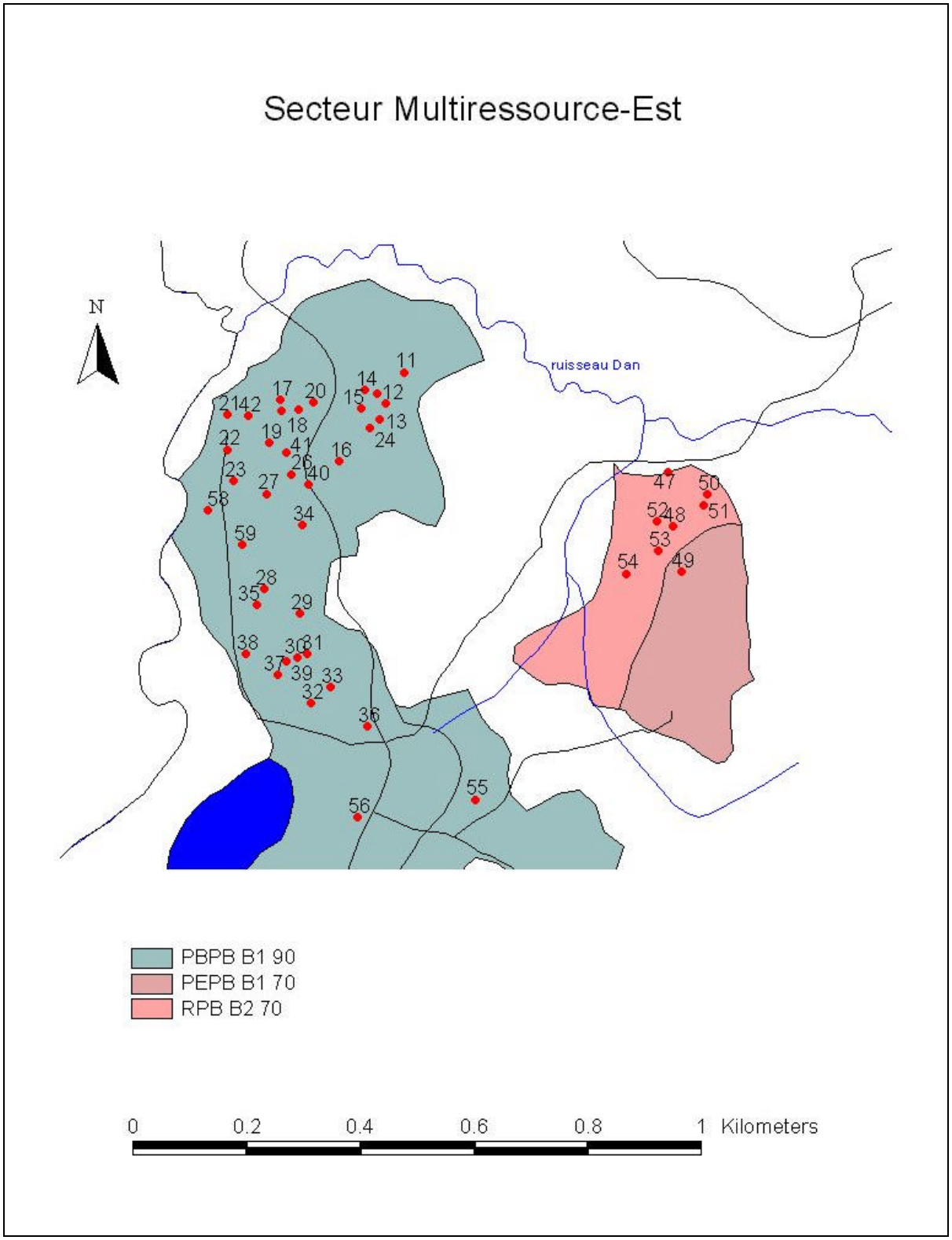
Wikström, P. 2000. Solving the stand management problem under biodiversity-related considerations. Forest Ecology and Management 126: 361-376.

ANNEXES

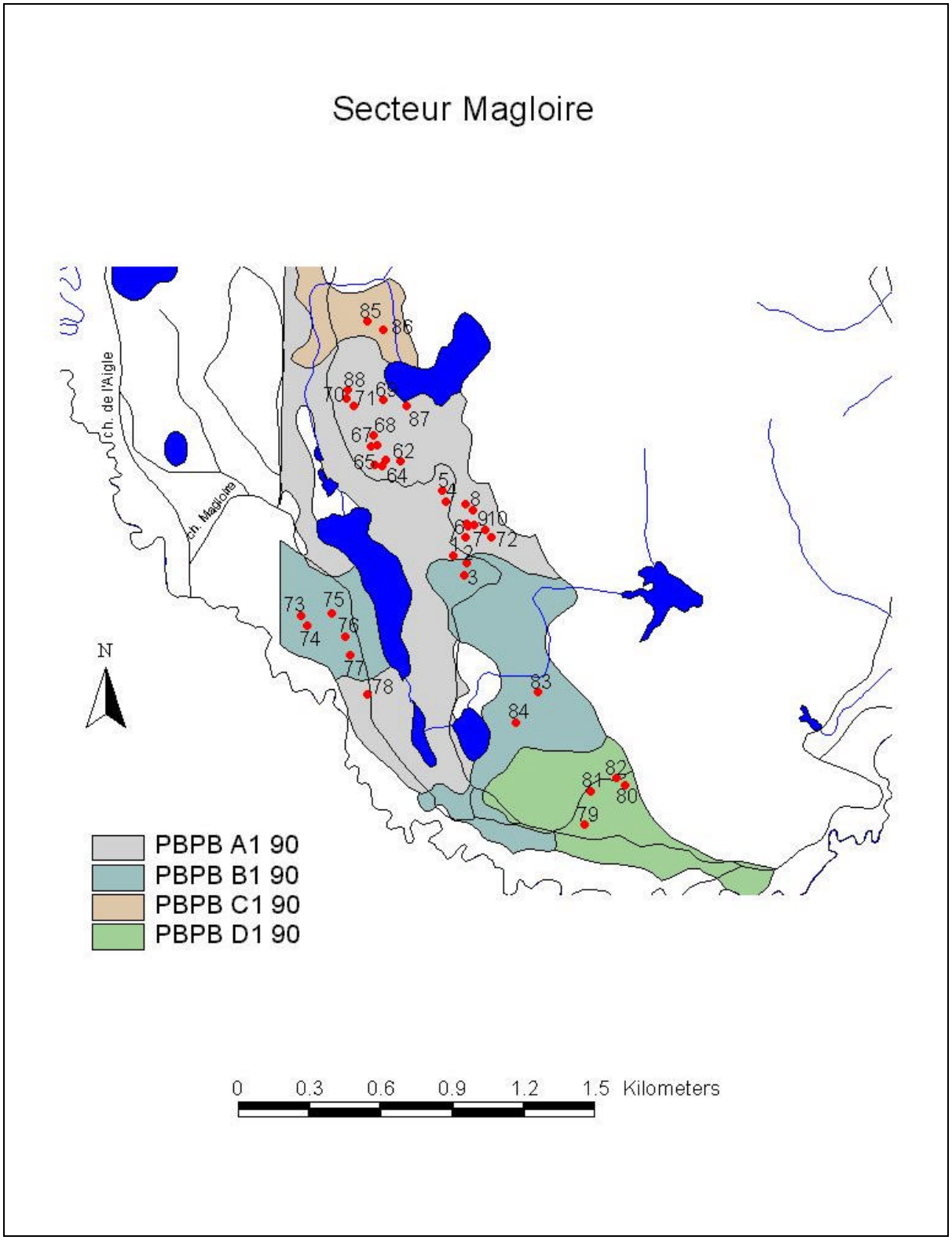
Annexe 1. Localisation des peuplements sur le territoire de la Forêt de l'Aigle.



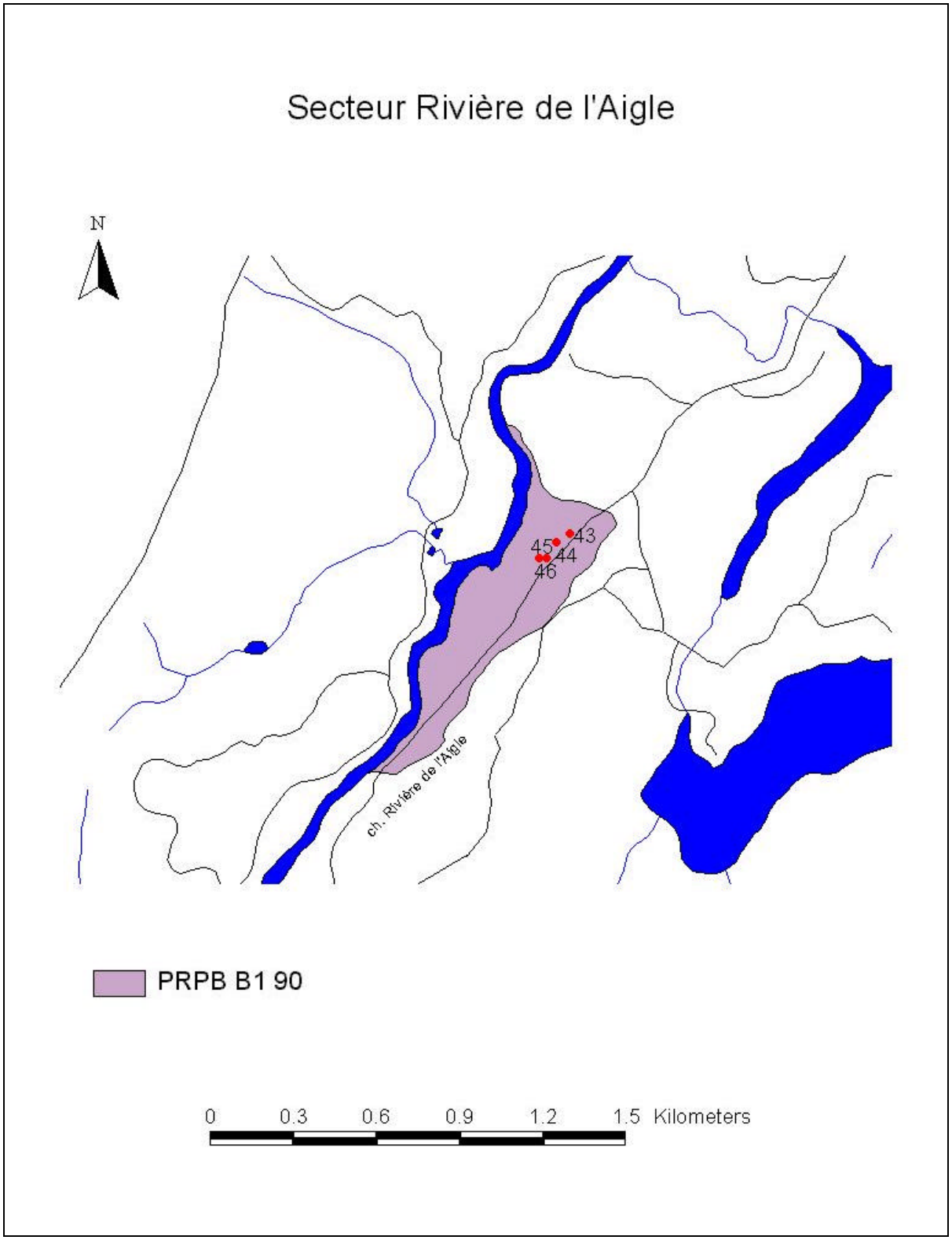
Annexe 2. Localisation des tiges-sujets, secteur Multiressource-Est.



Annexe 3. Localisation des tiges-sujets, secteur Magloire.



Annexe 4. Localisation des tiges-sujets, secteur Rivière de l'Aigle.



Annexe 5. Indices de compétition testés comme variables prédictives de la croissance en DHP.

Type d'IC	Abréviation	Expression	Rayon de recherche des compétiteurs	Caractéristiques des compétiteurs
Visuel	via	Compétition visuelle ; coefficients 0-1-2 pour TC plus petits, de même hauteur et plus grands que la TS	Facteur de prisme 4-5-6-7	
	vib	Compétition visuelle ; coefficients 1-2-3 pour TC plus petits, de même hauteur et plus grands que la TS	Facteur de prisme 4-5-6-7	
	vic	Compétition visuelle ; coefficients 1-2-4 pour TC plus petits, de même hauteur et plus grands que la TS	Facteur de prisme 4-5-6-7	
Dimension-distance	he1	$\Sigma DHP/(dist*DHP_TS)$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
	he2	$\Sigma DHP^2/(dist*DHP_TS^2)$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
	he2a	$\Sigma DHP^2/(dist*DHP_TS^2)$	Facteur de prisme 4	DHP/DHP_TS ≥ 0,5
	he2b	$\Sigma DHP^2/(dist*DHP_TS^2)$	Facteur de prisme 4	DHP/DHP_TS ≥ 0.75
	he2c	$\Sigma DHP^2/(dist*DHP_TS^2)$	Facteur de prisme 4	DHP/DHP_TS ≥ 1
	he3	$\Sigma DHP/(dist^2*DHP_TS)$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
	he4	$\Sigma DHP^2/(dist^2*DHP_TS^2)$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
	he5	$\Sigma DHP*e^{-dist}/DHP_TS$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
	he6	$\Sigma DHP^2*e^{-dist}/DHP_TS^2$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
	he7	$\Sigma DHP/DHP_TS$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
	he8	$\Sigma DHP^2/DHP_TS^2$	Facteur de prisme 4-5-6-7	(TC = PIB)
Chevauchement de cimes	cha	Distance de chevauchement coefficients 0-1-2 pour TC plus petits, de même hauteur et plus grands que la TS	Facteur de prisme 4-5-6-7	Distance de chevauchement ≥ 0
	chb	Distance de chevauchement coefficients 1-2-3 pour TC plus petits, de même hauteur et plus grands que la TS	Facteur de prisme 4-5-6-7	Distance de chevauchement ≥ 0
	chc	Distance de chevauchement coefficients 1-2-4 pour TC plus petits, de même hauteur et plus grands que la TS	Facteur de prisme 4-5-6-7	Distance de chevauchement ≥ 0
Somme d'angles	pu5	arctan((h-0,5* h_TS)/dist)	Facteur de prisme 4-5-6-7; rayon fixe 1-3-5-7-10 m	Angle ≥ 0 (TC = PIB)
	pu7	arctan((h-0,7* h_TS)/dist)	Facteur de prisme 4-5-6-7; rayon fixe 1-3-5-7-10 m	Angle ≥ 0 (TC = PIB)
	pu9	arctan((h-0,9* h_TS)/dist)	Facteur de prisme 4-5-6-7; rayon fixe 1-3-5-7-10 m	Angle ≥ 0 (TC = PIB)
	pu10	arctan((h-1,0* h_TS)/dist)	Facteur de prisme 4-5-6-7; rayon fixe 1-3-5-7-10 m	Angle ≥ 0 (TC = PIB)
Autres	DHPmax	Max(DHP)	Rayon fixe 1-3-5-7-10 m	
	h_max	Max(h)	Rayon fixe 1-3-5-7-10 m	
	ratio_min	Min(h/DHP)	Rayon fixe 1-3-5-7-10 m	
	nbtc	Nombre de TC	Facteur de prisme 4, 5, 6, 7; rayon fixe 1-3-5-7-10 m	(TC = PIB)
	Sum_DHP	ΣDHP	Facteur de prisme 4-5-6-7; rayon fixe 1-3-5-7-10 m	(TC = PIB)
	ba	ΣSurfaces terrières	Facteur de prisme 4-5-6-7; rayon fixe 1-3-5-7-10 m	(TC = PIB)
	ratioPIR	ΣDHP/h_TS	Facteur de prisme 4	TC = PIB
	DHP_gro	ΣDHP	Facteur de prisme 4	DHP ≥DHP_TS

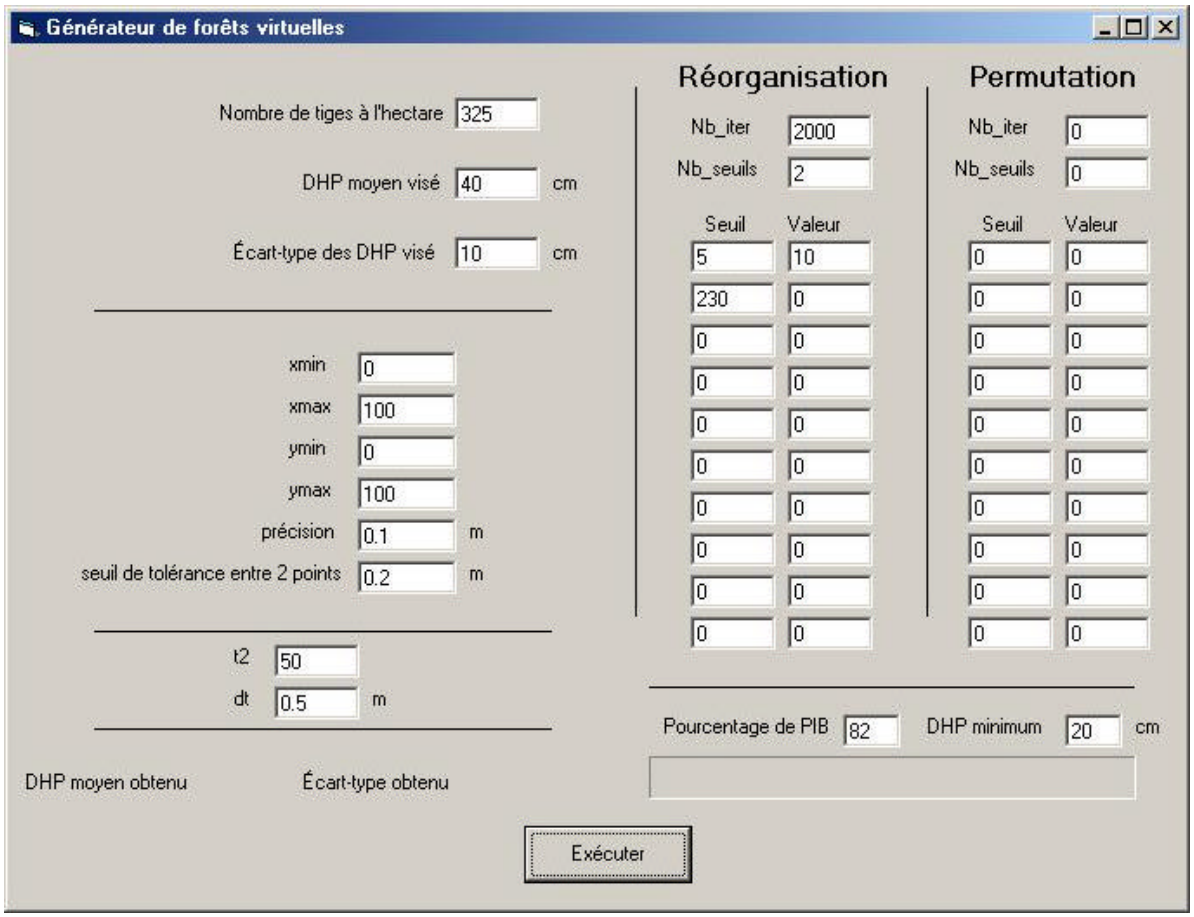
Explication des abréviations utilisées dans le tableau :

DHP et DHP_TS désignent respectivement le diamètre d'une tige compétitrice et le diamètre de la tige-sujet ; h et h_TS désignent respectivement la hauteur d'une tige compétitrice et la hauteur de la tige-sujet ; dist représente la distance entre la tige-sujet et un compétiteur ; nb est le nombre de compétiteurs. (TC = PIB) signifie que l'indice de compétition a été testé en tenant compte ou non des tiges compétitrices de pin rouge ; TC = PIB signifie que l'indice de compétition a été testé seulement en ne tenant pas compte des tiges compétitrices de pin rouge. Les facteurs de prisme sont exprimés en m^2/ha et les rayons fixes en m. Les compétiteurs étaient considérés plus petits que la tige-sujet si h_TS - h $\geq$ 2,5 et plus grands que la tige-sujet si h_TS - h $\leq$ 2.5.

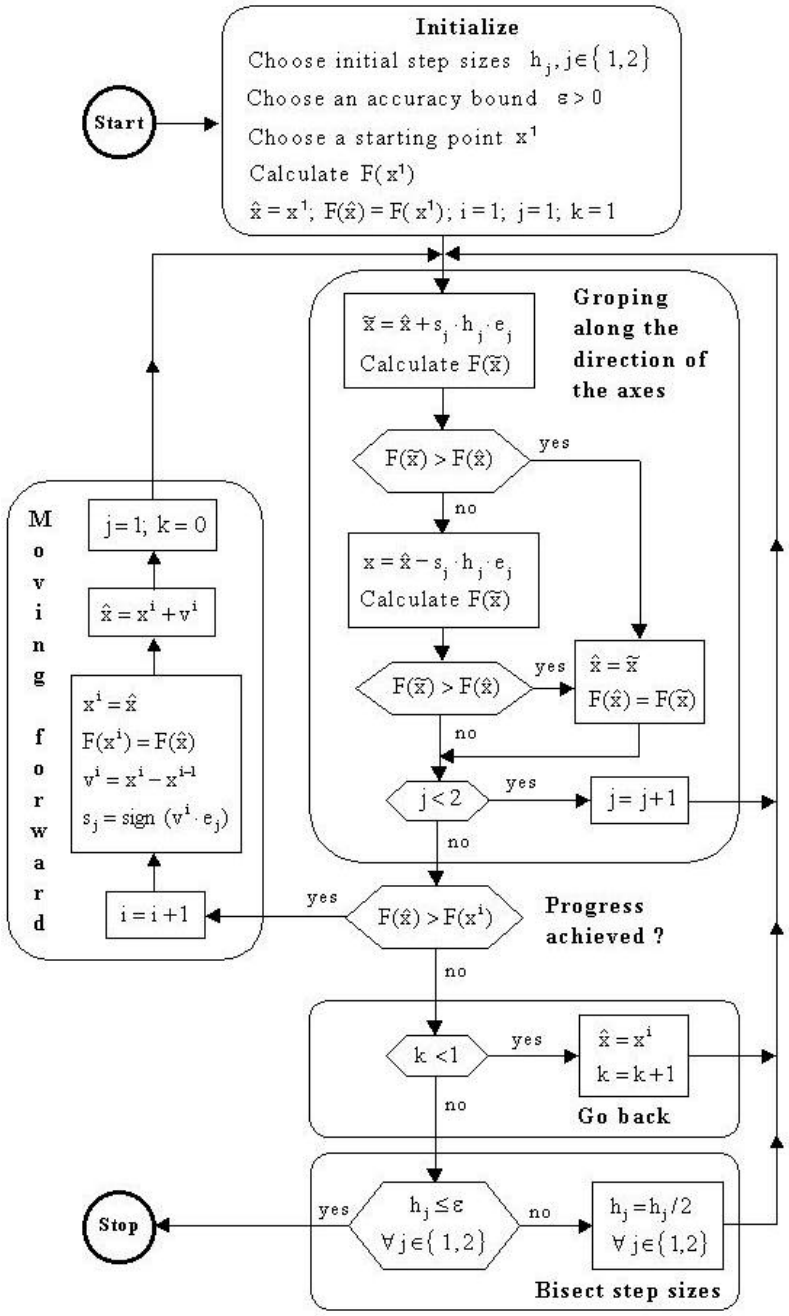
Annexe 6. Modèles de croissance en DHP pour le pin blanc avant éclaircie, le pin blanc après éclaircie, le pin rouge avant éclaircie et le pin rouge après éclaircie.

Objet	Données	Nombre de tiges	Variables prédictives	R^2	R^2 ajusté	R^2 Press	Équation de la croissance annuelle
PIB avant éclaircie	PIB éclaircis et non éclaircis 1993-1997	33	DHP/t, sum_DHP6pib	0,57	0,55	0,47	0,1807 + 0,6751 * (DHP/t) -0,000651 * sum_DHP6pib
PIR avant éclaircie	PIR éclaircis et non éclaircis 1993-1997	35	√ DHPmax7m, he7_4, √ nbtc4	0,30	0,23	0,11	0,9385 - 0,0769 * √ DHPmax7m + 0,00238 * he7_4 – 0,130 * √ nbtc4
PIB après éclaircie	PIB éclaircis 1998-2002	13	ln(nbtc5+1), croiss_avEC	0,53	N/A	0,32	((exp(5,673 – 1,635 * ln(nbtc5+1))) * croiss_AvEC/100) + croiss_AvEC
PIR après éclaircie	PIR éclaircis 1998-2002	22	DHP/t, nbtc7m	0,66	0,62	0,58	0,93 - 1,13 * (DHP/t) – 0,034 * nbtc7m

Annexe 7. Fenêtre d'accueil du générateur de forêts virtuelles.

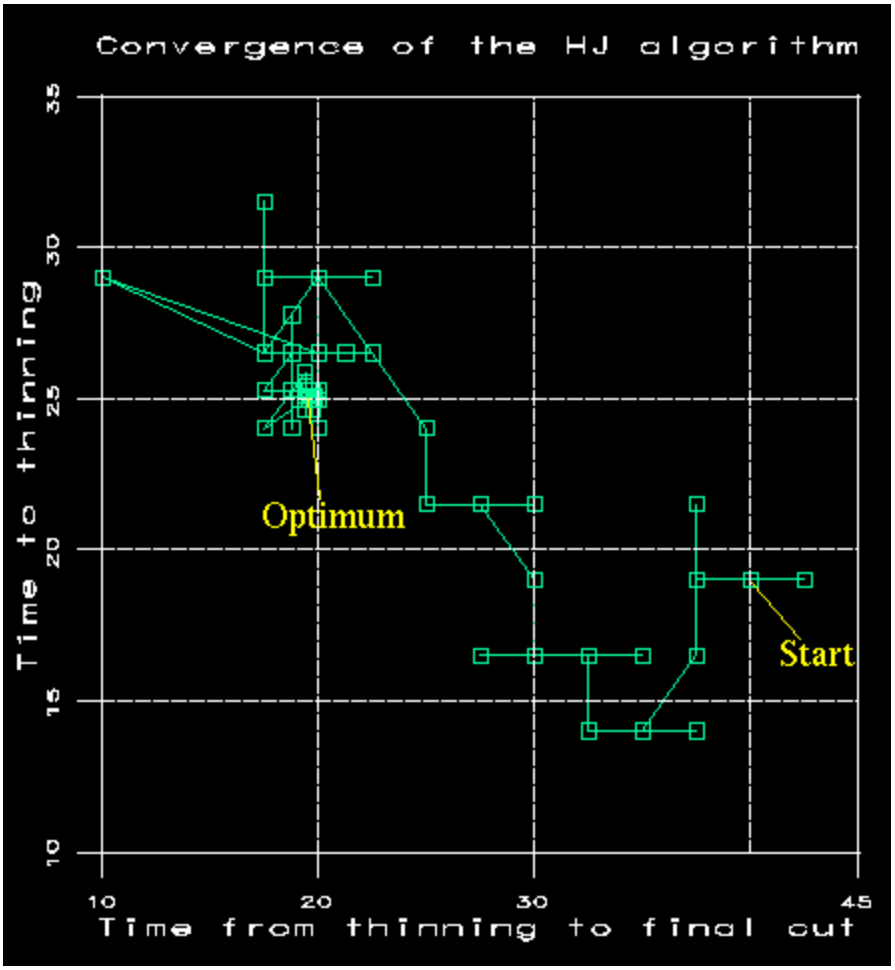


Annexe 8. Algorithme d'optimisation.



i	number of extrapolations, which took place
j	direction of the axes ($1 \rightarrow x_1$, $2 \rightarrow x_2$)
k	already moved forward ? ($0 \rightarrow$ yes, $1 \rightarrow$ no)
$\tilde{x}$	one of the possible test points after an extrapolation
$\hat{x}$	test point, which is better than the base point after an extrapolation
x^i	the best point
s_j	+/- direction vector
h_j	step size vector
e_j	unit vector
v^i	search direction vector

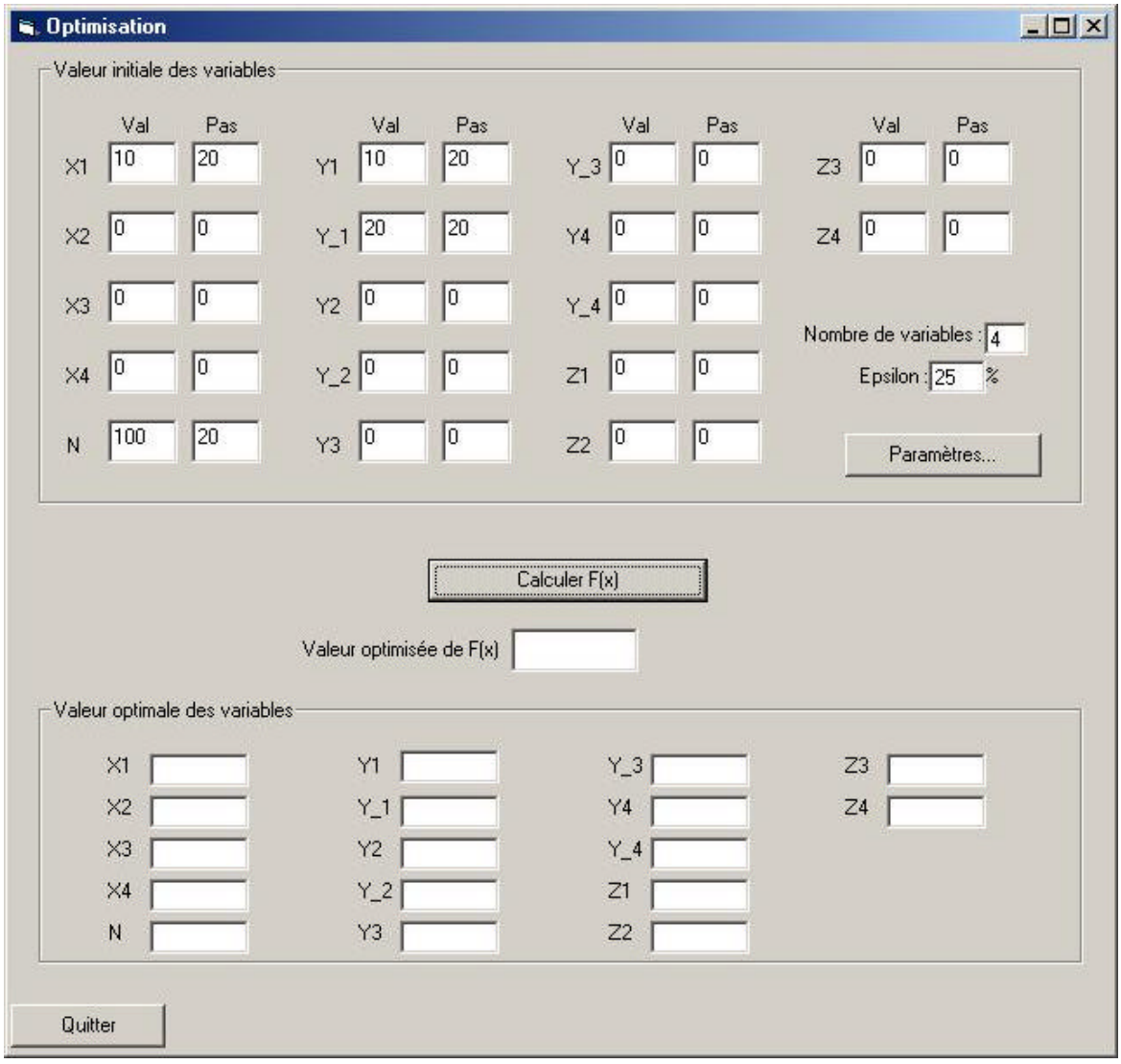
Annexe 9. Exemple de cheminement dans l'espace d'optimisation.



Source : http://metla.fi/pp/LVal/SMA/hj.html

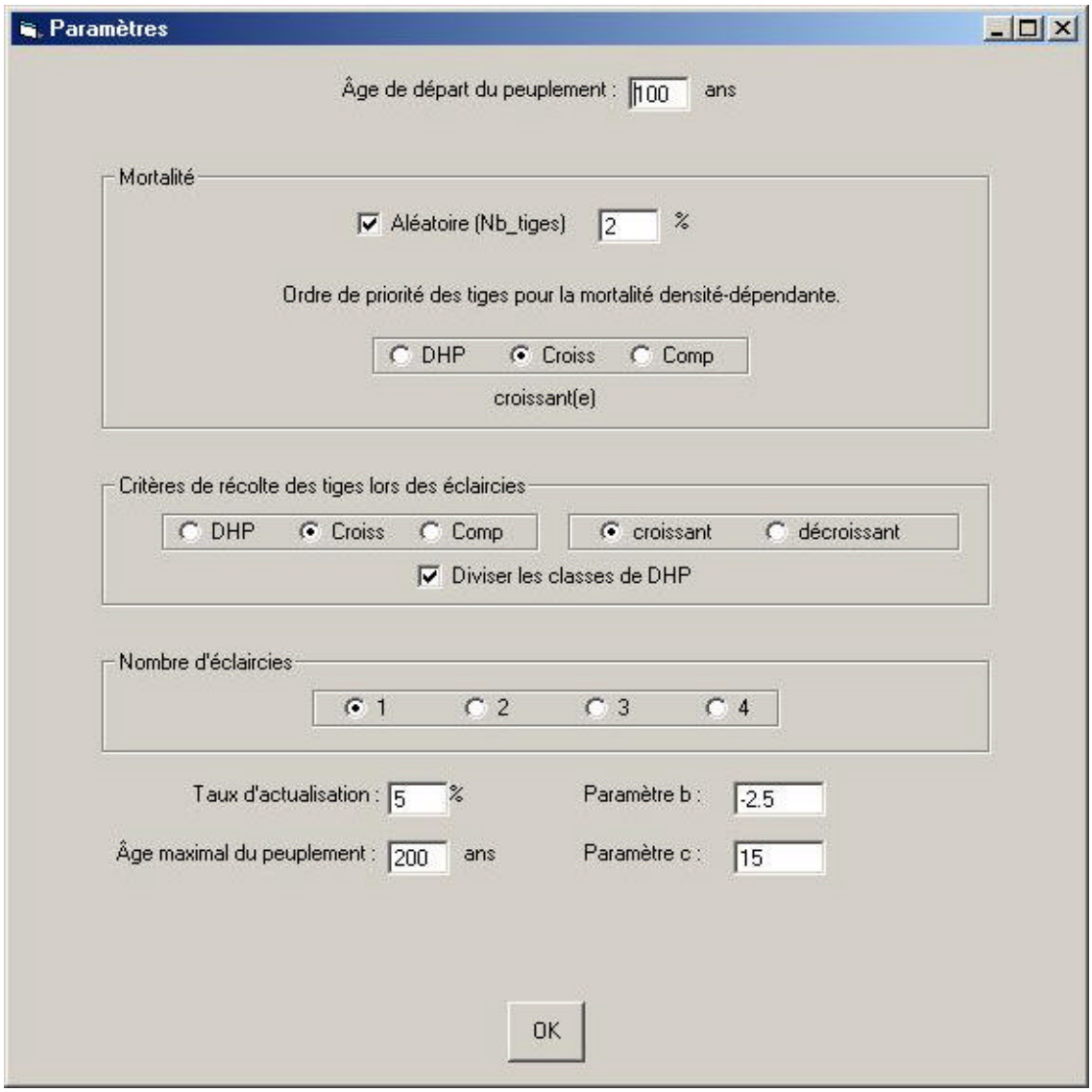
Annexe 10. Programme de simulation-optimisation.

Le simulateur et l'optimisateur sont combinés en un programme commun. La première fenêtre de ce programme, relative àl'optimisateur, permet de fixer les valeurs initiales des variables décisionnelles.



Fenêtre d'accueil du programme de simulation-optimisation.

La deuxième fenêtre, accessible en cliquant sur le bouton « paramètres », permet de fixer différents paramètres de simulation.



Fenêtre « Paramètres » du programme de simulation-optimisation.