

RAPPORT

DU COMITÉ SCIENTIFIQUE CHARGÉ D'EXAMINER LE CALCUL DE LA POSSIBILITÉ FORESTIÈRE

$$EQM(\hat{\theta}) = [\text{Biais}(\hat{\theta})]^2 + \text{Var}(\hat{\theta})$$

$$EQM(\hat{\theta}) = [\text{Biais}(\hat{\theta})]^2 + \text{Var}(\hat{\theta})$$

RAPPORT

DU COMITÉ SCIENTIFIQUE
CHARGÉ D'EXAMINER
LE CALCUL DE LA POSSIBILITÉ FORESTIÈRE

Septembre 2004



Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière

ISBN 2-550-43206-1
2004-3034

© Gouvernement du Québec
On peut citer tout ou partie de ce
texte en indiquant la référence.

COMPOSITION DU COMITÉ

Pierre BERNIER, ing.f., M.Sc., *Ph.D.*
Service canadien des forêts - Centre de foresterie des Laurentides

Michèle BERNIER-CARDOU, M.Sc. (stat.)
Service canadien des forêts - Centre de foresterie des Laurentides

Georges BLAIS, ing.f.
Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs – Direction des inventaires forestiers

Claude GAGNÉ, ing.f., M.Sc.
Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs – Direction des inventaires forestiers

Gilles GAUTHIER, ing.f., M.Sc.
(Consultant)

Robert JOBIDON, ing.f., M.Sc., *Ph.D.*
Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs – Direction de la recherche forestière

Jacques MOISAN, ing.f., M.Sc.
Ordre des ingénieurs forestiers du Québec

François PELLETIER, ing.f.,
Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs – Direction des programmes forestiers

David POTHIER, ing.f., M.Sc., *Ph.D.*
Université Laval - Faculté de foresterie et de géomatique

Guy PRÉGENT, ing.f., M.Sc.
Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs – Direction de la recherche forestière

Frédéric RAULIER, *Ph.D.*
Université Laval - Faculté de foresterie et de géomatique

Chhun-Huor UNG, ing.f., *Ph.D.*
Service canadien des forêts - Centre de foresterie des Laurentides

Sylvain VÉGIARD, B.Sc. (stat.), B.Sc. (biol.)
Institut de la statistique du Québec

Président du Comité : Robert JOBIDON, ing.f., M.Sc., *Ph.D.*
Secrétaire : François PELLETIER, ing.f.

TABLE DES MATIÈRES

Présentation et remerciements	vii
Résumé	xi
Introduction	1
Mise en contexte de l'approche de modélisation	5
SECTION A Le calcul de la possibilité forestière et ses imprécisions	11
<i>Chapitre 1</i> Calcul de la possibilité forestière	13
<i>Chapitre 2</i> Propagation de l'imprécision de l'inventaire dans le calcul de la possibilité forestière	37
<i>Chapitre 3</i> Erreur de prédiction associée au modèle de croissance « par courbes »	43
<i>Chapitre 4</i> Erreur de prédiction associée au modèle de croissance « par taux de passage »	49
<i>Chapitre 5</i> Erreur de prédiction associée au modèle de croissance « de plantations »	53
SECTION B Analyses de la sensibilité d'un calcul de la possibilité forestière à ses principales variables d'intrant	59
<i>Chapitre 6</i> Variabilité des données de l'inventaire	61
<i>Chapitre 7</i> Hypothèses d'aménagement applicables au modèle de simulation « par courbes »	65
<i>Chapitre 8</i> Hypothèses d'aménagement applicables au modèle de simulation « par taux »	75
SECTION C Analyse indépendante et avis externe	81
<i>Chapitre 9</i> Calcul de la possibilité forestière par une approche indépendante	83
<i>Chapitre 10</i> Avis scientifique exprimé par un expert indépendant	91
Conclusion et recommandations	95
Glossaire	99
Liste des figures	108
Références	109

PRÉSENTATION

Dans le rapport déposé à l'Assemblée Nationale en novembre 2002, la Vérificatrice générale (p.i.) du Québec soulignait certaines lacunes apparentes dans le processus de calcul de la possibilité forestière (CPF) dont le résultat conduit à fixer le niveau de récolte dans les forêts publiques québécoises. Pour répondre aux interrogations de la Vérificatrice générale, le sous-ministre du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec s'engageait en février 2003, lors d'une Commission parlementaire sur l'administration publique, à examiner la méthode du calcul de la possibilité forestière.

À la demande des sous-ministres associés, un comité scientifique a été formé afin de procéder à un examen du calcul de la possibilité forestière du Québec. Il s'agit d'un premier examen de la sorte réalisé au Québec et à notre connaissance au Canada. Plus particulièrement, le mandat confié par les sous-ministres associés consiste essentiellement à réaliser :

- une étude visant à établir la sensibilité et la précision des principales variables qui influencent un CPF, notamment l'inventaire forestier et les modèles de prédiction de la croissance (tables de rendement) ;
- une étude visant à établir l'effet de l'application des stratégies d'aménagement sur les résultats du CPF à partir de cas types.

Une équipe de spécialistes appartenant à plusieurs disciplines, chacune contribuant à un aspect de l'analyse du calcul de la possibilité, a donc été rassemblée pour répondre aux nombreuses questions et difficultés analytiques qu'un tel mandat soulevait.

Le Comité a entrepris formellement ses travaux en septembre 2003 et s'est rapidement divisé en quatre « cellules » abordant des aspects différents du problème : la cellule « inventaire forestier », la cellule « modélisation », la cellule « scénarios d'aménagement » et la cellule « approche indépendante du calcul ». À leur tour, ces cellules de travail ont mis à contribution bon nombre de personnes que je remercie au passage. Il importe aussi de souligner que cet examen critique a pu être mené à terme parce que le Comité pouvait s'appuyer sur d'importantes assises en matière d'information et de connaissances scientifiques. Par exemple, soulignons la qualité de l'information forestière provenant des inventaires successifs dont dispose le Québec.

Au terme de ses travaux, j'estime que les recommandations du Comité incluses dans ce rapport sont susceptibles d'améliorer autant la précision que l'ensemble du processus du calcul de la possibilité forestière et qu'elles permettront de rendre son résultat davantage crédible tant auprès de la communauté d'experts, des organismes non gouvernementaux préoccupés par l'aménagement de nos forêts, que du public en général.

Le Comité n'a certes pas la prétention d'avoir répondu à toutes les questions — en fait il en soulève également plusieurs — mais il estime avoir porté un premier regard critique sur cet exercice de toute première importance qu'est, dans la perspective d'un aménagement durable des forêts, l'évaluation la plus juste possible de la possibilité forestière. Il importe de souligner que les ingénieurs forestiers qui ont à réaliser des calculs de possibilité forestière prennent bon nombre de décisions fondées tantôt sur des connaissances scientifiques et techniques, tantôt sur l'expérience et le jugement professionnel. Mais tous ont un souci commun : celui de ne ménager aucun effort pour minimiser le plus possible la part d'incertitude qui fait et fera sans doute toujours partie de ce type d'exercice. Les travaux du Comité se veulent une contribution à un tel effort.

Je désire ici souligner l'exceptionnelle qualité des contributions et des échanges qu'ont maintenus les membres du Comité au cours d'une année de travail ponctuée de multiples rencontres, en comité ou en cellules, de discussions et de questionnements entre spécialistes de plusieurs disciplines. Il a fallu, par exemple, convenir d'une approche de travail, en définir les méthodes, procéder aux analyses détaillées, à l'interprétation des résultats, à la rédaction des rapports et, bien entendu, trouver des solutions aux nombreuses embûches rencontrées au cours d'un tel examen.

Pour mener à bien ses travaux, le Comité a pu profiter de la contribution des firmes d'ingénieurs-conseils suivantes à qui des mandats spécifiques ont été confiés :

- Consultants forestiers DGR, Inc. ;
- Les Entreprises Gauthier Parent, Ltée ;
- Del Degan, Massé et Associés.

Le Comité souhaite, en particulier, exprimer sa plus vive reconnaissance à messieurs Gaétan Laberge, ing.f., M.Sc., François Plante, ing.f., et Pierre Dupuis, ing.f., de ces firmes de consultants, pour la très grande qualité de leur travail.

Le Comité a aussi pu profiter, au début de ses travaux, des précieux conseils de messieurs Guy Lessard, ing.f., M.Sc., et Pascal Gauthier, ing.f. du CERFO, que nous remercions sincèrement.

Le Comité exprime aussi toute sa reconnaissance à mesdames Isabelle Auger, M.Sc. (stat.), Josianne DeBlois, M.Sc. (stat.) et Lise Charette, B.Sc. (stat.), de la *Direction de la recherche forestière* du Ministère, qui ont réalisé un travail à la fois remarquable et inédit, principalement pour le développement d'une approche analytique qui a permis d'évaluer les erreurs des modèles de prédiction de la croissance, ainsi qu'à mesdames Marie-Claude Lambert, M.Sc. (stat.) et Xiao Jing Guo, M.Sc. (stat.) qui ont développé le modèle de croissance et le programme pour les travaux de la cellule « approche indépendante du calcul ». En cela, elles ont reçu une collaboration unique de messieurs Jean Noël et Denis Hotte, techniciens forestiers à la *Direction de la recherche forestière*, qui ont su valider les données des placettes permanentes des trois inventaires décennaux, lesquelles ont servi à la calibration des modèles.

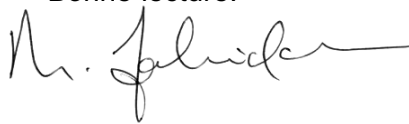
Le Comité est également très redevable à monsieur Louis Duchesne, ing.f., M.Sc., chercheur à la *Direction de la recherche forestière*, qui a accepté avec enthousiasme de contribuer de manière soutenue et très significative à un examen critique de l'approche méthodologique de modélisation. Les travaux réalisés par madame Mélanie Gaudreault, biol., et monsieur Daniel Mailly, ing. f., *Ph.D.*, de la *Direction de la recherche forestière*, sont très appréciés. Enfin, nous tenons à souligner la contribution de monsieur Jean-Pierre Saucier, ing.f., D.Sc., de la *Direction des inventaires forestiers* du Ministère.

À une étape de ses travaux, le Comité a consulté un chercheur scientifique externe, le Dr J. Buongiorno de la *Wisconsin University*, sur la question du calcul de la possibilité forestière tel qu'il est réalisé au Québec. Nous lui exprimons toute notre reconnaissance d'avoir accepté cette tâche.

Nous sommes redevables à monsieur Raymond Bonin (*Plume-Art*, Saint-Alexis-de-Matapédia) pour son travail remarquable de révision et d'édition.

Le présent rapport est une synthèse et le lecteur curieux d'en savoir davantage pourra consulter le rapport détaillé.

Bonne lecture.



Robert Jobidon,
Président du Comité

RÉSUMÉ

Un « COMITÉ SCIENTIFIQUE D'EXAMEN DU CALCUL DE LA POSSIBILITÉ FORESTIÈRE » a été constitué afin de donner suite au plan d'action du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec déposé à la Commission parlementaire sur l'administration publique tenue en février 2003, concernant le rapport de 2002 de la Vérificatrice générale du Québec sur la gestion de la ressource forestière.

Le calcul de la possibilité forestière repose principalement sur l'information en provenance des inventaires, sur des modèles de croissance de la forêt et sur des hypothèses d'aménagement. On a demandé au Comité d'examiner l'imprécision d'un calcul de la possibilité forestière et la sensibilité de certains de ses intrants. Le présent rapport fait état des résultats des travaux de ce comité scientifique.

Il existe deux types de méthodes d'estimation de l'imprécision d'un estimateur (c'est-à-dire de son erreur quadratique moyenne) comme celui de la possibilité forestière : les méthodes analytiques classiques et les méthodes basées sur des calculs intensifs. Des analyses initiales ont révélé que les imprécisions ne pouvaient être propagées analytiquement ni dans les systèmes d'équations des modèles de croissance ni dans *Sylva II*, à cause notamment de la complexité de ces modèles et de la nécessité où se trouve l'aménagiste de faire des choix. Par conséquent, les méthodes du premier type n'ont pu être appliquées dans le cadre des travaux qui font l'objet de ce rapport. La seconde approche, basée sur l'utilisation de calculs intensifs, a donc été appliquée à un sous-ensemble d'une aire commune. Dans ces analyses, la méthode du *bootstrap* a permis d'estimer une partie de l'imprécision associée à l'estimation d'une possibilité forestière. Cette imprécision ainsi estimée reflète essentiellement l'erreur d'échantillonnage des inventaires et ses répercussions à travers les modèles de croissance. Dans l'un des groupes de calcul étudiés, les résultats révèlent l'existence d'un biais de -2,9 % (surestimation de la possibilité annuelle), avec un intervalle de confiance à 95 % de $\pm 6,3$ % de la possibilité forestière estimée. Le présent rapport fait état des limites d'interprétation de ce résultat. En particulier, l'intervalle de confiance et l'estimation de l'erreur quadratique moyenne ne tiennent pas compte des imprécisions associées aux tarifs de cubage, aux modèles de croissance et aux décisions des aménagistes. Le rapport suggère une méthode qui permettrait d'estimer les bornes

d'un intervalle de confiance qui intègre pratiquement toutes les sources d'imprécision dans un calcul de la possibilité forestière.

Le Comité a examiné et documenté de nombreuses sources d'imprécision associées aux diverses étapes du calcul de la possibilité forestière. Les sources imputables aux inventaires forestiers ont ainsi été étudiées. Les travaux suggèrent certaines révisions, notamment au niveau du plan d'échantillonnage.

Les trois modèles de prédiction de la croissance du volume marchand utilisés au Québec ont fait l'objet d'un examen approfondi pour en évaluer les erreurs de prédiction (au sens statistique). L'erreur de prédiction des modèles de croissance a été analysée à partir de réseaux de placettes permanentes du Ministère (*Direction des inventaires forestiers* et *Direction de la recherche forestière*) dont le suivi peut atteindre 30 ans.

Le modèle de croissance « par courbes » s'avère biaisé et ce biais s'accroît à mesure que l'horizon de prédiction s'allonge. Le biais est considéré comme négligeable pour un horizon de prédiction de 5 ans, mais atteint 5,4 m³/ha en sous-estimation pour un horizon de 25 ans. L'imprécision augmente aussi avec l'horizon de prédiction et double quand cet horizon passe de 5 à 25 ans. L'erreur associée à l'indice de densité relative explique la plus grande part de l'erreur de prédiction du volume marchand. De plus, l'arrondissement de l'indice de densité relative et de l'indice de qualité de station semble n'avoir que peu d'effet sur l'estimation de la possibilité, de même que l'utilisation du modèle pour des peuplements mixtes. Enfin, l'évaluation de l'erreur due à la compilation des données d'inventaires par strate plutôt que par placette engendre une surestimation moyenne de 1,0 m³/ha.

Le modèle de croissance « par taux » prédit le volume marchand disponible d'une période de simulation en additionnant le volume disponible de la période précédente avec l'accroissement net entre ces deux moments. L'imprécision de l'estimation de l'accroissement net en volume est expliquée à 71 % par celle de la mortalité. L'accroissement net estimé est non biaisé pour les peuplements de volume moyen, mais il est inférieur (biaisé) à l'accroissement net dans les peuplements de faible volume et il lui est supérieur (biaisé) dans les peuplements de fort volume. Le biais observé s'accroît à mesure que l'horizon de prédiction s'allonge. Pour les petits volumes, la sous-estimation du volume exploitable passe de 3,9 m³/ha pour un horizon de 5 ans, à 15,3 m³/ha pour un horizon de 30 ans ; pour les peuplements à fort volume, la surestimation du volume exploitable passe de 8,8 m³/ha à 5 ans, à 32,9 m³/ha à 30 ans.

Tous volumes confondus, l'imprécision augmente aussi avec le temps, triplant d'un horizon de 5 ans à un horizon de 30 ans. Les analyses n'ont pas permis d'expliquer de manière satisfaisante l'imprécision associée à la mortalité. Pour chacun des deux modèles de croissance, on explique comment les imprécisions de prédiction se compensent, du moins en partie.

Les modèles de croissance « de plantations » qui prédisent le volume marchand montrent des biais lorsque le modèle est appliqué par essence avec des surestimations d'accroissement en volume de l'épinette de Norvège (2,6 m³/ha/an), du pin gris (2,3 m³/ha/an) et de l'épinette noire (0,7 m³/ha/an) et une sous-estimation de celui de l'épinette blanche (4,0 m³/ha/an). L'ampleur des biais s'explique par le faible nombre de plantations disponibles au moment de l'étalonnage des modèles, des prédictions faites à partir d'un jeune âge, ce qui rend les prédictions plus difficiles, et par la productivité généralement plus élevée des plantations. Néanmoins, le sens opposé des biais réduit leur importance puisque la possibilité est calculée pour toutes les espèces d'un même territoire. Les travaux actuellement en cours permettront d'améliorer les modèles existants.

Une analyse de la sensibilité du calcul de la possibilité à la variabilité des données de l'inventaire (âge, hauteur et volume) révèle un niveau de sensibilité relativement élevé pour le territoire étudié. Par exemple, un changement du volume à l'hectare par essence produit, sur le calcul de la possibilité, un effet d'égale proportion et de même signe que le changement lui-même. Cette analyse illustre l'importance de recourir à des procédures d'inventaire qui génèrent des résultats sans biais.

Plusieurs hypothèses d'aménagement propres au modèle de croissance « par courbes » ont fait l'objet d'analyses de la sensibilité. Chaque analyse a été réalisée pour neuf territoires différents représentant toutes les combinaisons de trois structures de forêts (anormale par surabondance de stock mûr, anormale par insuffisance de stock mûr, et irrégulière) et de trois compositions forestières (peuplements résineux, mélangés et de feuillus intolérants). Les variables étudiées sont : les priorités de récolte, l'âge d'exploitabilité, les superficies de plantations, d'éclaircie précommerciale et d'éclaircie commerciale, la proportion de feuillus dans les strates de retour, et l'âge appliqué aux strates de retour (délais de régénération). Dans toutes les simulations, la possibilité se stabilise avant 150 ans, ce qui suggère que cet horizon de simulation permet de bien évaluer la possibilité. La possibilité forestière est très sensible aux modifications des valeurs de toutes les variables testées dans le cas des

forêts résineuses anormales par surabondance de stock mûr, mais cette sensibilité s'avère modérée dans les autres types de peuplement. Ce résultat met en évidence l'importance pour l'aménagiste de réaliser des analyses de sensibilité lors de l'exercice du calcul de la possibilité afin de lui permettre d'identifier les variables auxquelles la possibilité affiche une sensibilité élevée. Il traduit aussi l'effet sur le calcul de possibilité des écarts entre le plan d'aménagement et sa mise en application.

Plusieurs hypothèses d'aménagement propres au modèle de croissance « par taux », incluant les scénarios d'évolution, ont aussi fait l'objet d'une analyse de la sensibilité. Les variables étudiées pour la simulation de coupes partielles à long terme sont : l'étalement (le nombre de périodes nécessaires pour réaliser un traitement), la durée des rotations, les taux de passage et le nombre de calculs. Les variables étudiées pour la simulation avec prépondérance de scénarios d'évolution sont : le nombre de coupes partielles avant la coupe finale et le choix de scénarios pour sites riches ou pauvres. La possibilité forestière s'est avérée particulièrement sensible à la durée des rotations. Les analyses font ressortir l'importance que le plan d'aménagement doit accorder aux contraintes opérationnelles et le soin que les exploitants doivent mettre à le réaliser le plus fidèlement possible.

Le problème de la propagation des imprécisions dans l'estimation de la possibilité forestière a été partiellement contourné par la création d'un nouvel outil de calcul qui respecte les postulats de base de SYLVA II. Plus précisément, cette approche indépendante a permis de propager une part des imprécisions liées à la variabilité du volume marchand à l'intérieur de la strate, à l'estimation de sa croissance et, plus partiellement, à la composition de la strate de retour, jusque dans le calcul du volume exploitable et de la possibilité. Les résultats de cette analyse montrent que l'imprécision des volumes exploitables estimés augmente avec le temps de simulation et varie entre les groupes de calculs. L'imprécision moyenne à la période critique est d'environ 30 % pour les quatre groupes de calcul utilisés. Elle révèle aussi que l'information contenue dans les inventaires ne permet généralement pas de procéder au calcul de la possibilité avec la finesse de stratification couramment employée lors de la confection des plans d'aménagement.

Finalement la consultation avec un expert international sur le bien-fondé de la méthodologie du calcul et des hypothèses générales sous-jacentes a permis de mettre en lumière les forces et faiblesses de la méthode utilisée au Québec. Celle-ci paraît généralement appropriée. La répétition du calcul aux 5 ans est

perçue comme un élément très positif de l'approche québécoise. Par contre, l'expert consulté considère l'absence de prise en compte des imprécisions, des événements stochastiques et des aspects économiques (autant des coûts que des opportunités) et sociaux dans le calcul de la possibilité comme autant de lacunes à combler.

Notre analyse de la méthode du calcul de la possibilité forestière révèle que celle-ci est raisonnable étant donné les contraintes et la nature des informations disponibles. Cependant, cette méthode est très complexe. De plus, elle fait appel à de nombreuses hypothèses qui reposent sur des jugements d'experts, notamment sur l'évolution des strates de moins de 7 m et des strates de retour après perturbations. Cette complexité et ces hypothèses ne sont pas des défauts en elles-mêmes, mais elles constituent des embûches majeures si l'on veut estimer l'imprécision de l'estimation de la possibilité forestière, car nous sortons alors du cadre pour lequel de tels estimateurs peuvent être développés.

Compte tenu des considérations qui précèdent, nous recommandons :

1. que le plan de sondage et les estimateurs des inventaires forestiers soient révisés à la lumière des développements récents en théorie de l'échantillonnage ;
2. que les modèles de croissance soient simplifiés, afin que les imprécisions de leurs intrants puissent être propagées aux prédictions qu'ils génèrent ;
3. que les efforts investis aux différentes phases du calcul soient répartis afin que le niveau de précision des estimateurs atteint à une étape quelconque s'harmonise avec celui des autres étapes ;
4. que le calcul de la possibilité forestière se prête à l'analyse de sa sensibilité aux décisions de l'aménagiste et permette d'estimer et de propager les imprécisions de ses composantes ;
5. que la recherche soit encouragée dans les domaines suivants :
 - la théorie de l'échantillonnage et le développement de méthodes d'estimation adaptées aux inventaires forestiers ;
 - la modélisation de la succession forestière ;
 - la modélisation de la croissance des peuplements, et la prédiction à long terme de leur volume ;
 - la dynamique des perturbations naturelles (leur étendue, leur intensité, leur fréquence), et son impact sur la possibilité forestière ;
 - l'impact des contraintes sociales et opérationnelles et des opportunités économiques sur la possibilité forestière.

INTRODUCTION

« Nous voulions d'abord évaluer si le Ministère voit à ce que la possibilité forestière soit établie dans une perspective d'aménagement durable de la forêt publique.... Nos travaux portant sur l'établissement des calculs de possibilité forestière inclus dans les derniers plans généraux ont révélé ... l'utilisation d'outils pas toujours adéquats. » (Rapport de la Vérificatrice générale du Québec 2001-2002)

L'aménagement forestier durable est un processus complexe qui doit tenir compte à la fois de valeurs sociales et économiques en évolution constante ainsi que des conditions variées propres à un grand nombre d'écosystèmes dynamiques. Le calcul de la possibilité forestière — une activité essentielle à la base de l'aménagement forestier —, est fondé sur l'information provenant de la stratification cartographique des peuplements forestiers, des inventaires terrain, des modèles de croissance en volume marchand et des interactions entre ces composantes et les hypothèses d'aménagement. Chaque composante de ce calcul comporte une dose d'imprécision qui se propage nécessairement au calcul de la possibilité. La stratification des peuplements est basée sur une interprétation de photographies aériennes par des spécialistes, mais elle implique néanmoins une part de subjectivité. Les inventaires procèdent par échantillonnage de la forêt, ce qui suppose un certain degré d'imprécision. Les modèles de croissance postulent des propriétés et des trajectoires de croissance dont l'ajustement empirique aux données d'inventaire est imparfait. Enfin, les réponses des arbres aux traitements sylvicoles demeurent difficiles à quantifier en raison des nombreuses interactions avec l'environnement physique et biotique. Ce constat d'imprécision, commun à toutes les juridictions responsables de gérer des forêts, est d'autant plus vrai que le territoire est vaste et diversifié. Le défi du calcul de la possibilité forestière est de prendre en compte ces imprécisions et, si possible, de les traduire en informations utiles aux décideurs et aux gestionnaires de la forêt.

L'une des méthodes les plus importantes et reconnues par plusieurs juridictions pour tenir compte de cette incertitude consiste à réviser et à analyser fréquemment les données et les plans d'aménagement pour s'assurer qu'ils intègrent les informations et les connaissances les plus récentes. Au Québec, le calcul de la possibilité forestière est refait à tous les 5 ans. Une telle gestion du risque permet de corriger ou de minimiser les effets négatifs à long

terme d'une décision antérieure, laquelle a été forcément prise avec un niveau plus restreint d'information ou de connaissance. Ainsi, le nouveau calcul permet d'intégrer les mises à jour portant sur les hypothèses d'aménagement, les volumes récoltés et disponibles sur un territoire, les superficies et leur affectation, les changements dans les politiques d'aménagement et les améliorations apportées aux modèles de croissance. En d'autres termes, une certaine forme de gestion de l'incertitude fait partie des processus en cours. De plus, la poursuite des inventaires décennaux et l'amélioration constante des connaissances sur les effets des pratiques sylvicoles et sur les régimes des perturbations sont autant de moyens qui permettront au Québec d'améliorer de façon continue le calcul de la possibilité forestière.

Une autre façon de tenir compte de l'incertitude consiste à procéder par analyse de sensibilité pour vérifier comment la possibilité forestière peut varier lorsqu'une information de base, comme les hypothèses et les scénarios choisis par l'aménagiste, comporte une part d'imprécision. Les hypothèses sont des estimations d'expert décrivant le résultat de processus peu ou mal connus, résultats dont il est impossible, par conséquent, d'estimer l'imprécision. Les scénarios d'aménagement correspondent aux choix de l'aménagiste et sont liés, le plus souvent, à des interventions sylvicoles prévues dans l'avenir ou à des jugements sur les effets escomptés de ces interventions. Dans les deux cas, une analyse de sensibilité permet de quantifier l'effet sur le calcul de la possibilité forestière de variations dans les valeurs des hypothèses et dans les scénarios. Par exemple, une analyse de la sensibilité peut révéler qu'une faible variation de la valeur d'une variable engendre un effet marqué sur la possibilité ou, inversement, qu'une variation importante n'a que peu d'impact. D'un autre point de vue, une analyse de la sensibilité peut aussi servir à évaluer l'impact du non-respect de la stratégie d'aménagement. Les résultats d'une analyse de la sensibilité permettent de préciser les priorités en matière d'actions à entreprendre pour abaisser le niveau d'incertitude ou appuyer les processus décisionnels, liés à la gestion du risque.

2 La complexité des tâches qui sous-tendent le calcul de la possibilité forestière et l'évolution constante des requêtes soumises à cette méthodologie ont fait en sorte que la structure inhérente à ce calcul n'a que peu été remise en question depuis ses débuts, il y a maintenant presque 30 ans. À la suite du rapport 2001-2002 de la Vérificatrice générale, on a confié au présent Comité scientifique le mandat d'examiner les sources d'imprécision susceptibles d'affecter le calcul de la possibilité forestière et la sensibilité de ce calcul à ses variables d'intrant. Le travail, échelonné sur près de 12 mois, a permis d'évaluer le

processus actuel et de mettre en lumière de nombreuses pistes d'amélioration. Les travaux du Comité se sont concentrés sur quatre aspects distincts : les imprécisions liées à l'inventaire, celles liées aux trois modèles de croissance utilisés dans le calcul de la possibilité forestière, la sensibilité de celle-ci aux principales hypothèses d'aménagement, et finalement l'utilisation d'une approche indépendante pour valider l'approche actuelle. Ces analyses ont été réalisées sur les principales structures d'âge et sur les principaux mélanges d'essences de manière à bien représenter la diversité des forêts à l'échelle du territoire québécois.

En plus d'examiner ces éléments techniques, le Comité s'est penché sur une évaluation plus globale du bien-fondé de l'approche utilisée pour calculer la possibilité forestière, notamment par une revue de littérature, ainsi que d'une consultation auprès d'un expert international en matière d'aménagement forestier. Finalement, le Comité propose un ensemble de recommandations couvrant chaque composante du calcul ainsi que des aspects structurels et conceptuels du processus global.

MISE EN CONTEXTE DE L'APPROCHE DE MODÉLISATION

La planification forestière est une tâche complexe parce que les objectifs d'aménagement sont nombreux et parfois contradictoires. Au cours des dernières décennies, un nombre important d'outils prévisionnels ont été développés pour satisfaire les exigences de la planification forestière, c'est-à-dire pour fournir aux gestionnaires forestiers l'information nécessaire à l'atteinte des objectifs en fonction des contraintes identifiées. Au Québec, la possibilité forestière est évaluée à l'aide d'un outil de simulation des volumes exploitables dont la dernière version, *Sylva II*, a été développée par le Ministère en 1997. Cet outil permet, sur un horizon de 150 ans, de simuler la progression dans le temps des volumes exploitables par groupe d'essences en fonction de diverses stratégies sylvicoles, et ainsi de calculer la possibilité forestière.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Un examen du sujet, jumelé à des communications avec certaines autorités en la matière, a permis de décrire et d'évaluer les choix du Québec dans le domaine du calcul de la possibilité forestière. L'approche retenue par le Québec a été décrite et comparée à d'autres approches semblables afin d'en élaborer une vision critique.

CONSTATS

OUTILS DE PLANIFICATION FINANCIÈRE

Les approches utilisées pour l'estimation de la possibilité forestière varient d'une juridiction à l'autre. Cette variabilité indique qu'il n'y a pas d'outil unique pour répondre aux besoins de la planification forestière. À l'échelle mondiale, on retrouve trois types d'approche, soit : la simulation, l'optimisation et l'utilisation des techniques propres à l'intelligence artificielle.

Les modèles de simulation sont utilisés pour prédire l'état de la forêt au cours du temps, en fonction de sa condition initiale, de sa croissance et de son aménagement. L'utilisateur de tels modèles procède par essais et erreurs de façon à parvenir à une solution répondant aux objectifs poursuivis. L'optimisation, par contre, est une approche mathématique qui permet d'estimer une possibilité forestière optimale définie en fonction d'un ensemble d'objectifs et de contraintes. Finalement, les modèles utilisant les techniques propres à l'intelligence artificielle recourent à des formalismes qui permettent d'allier aux

fonctions quantitatives d'optimisation d'autres fonctions capables de manier des éléments moins quantifiables comme les conflits d'intérêt, l'imprécision des objectifs, les changements dans les préférences du public ou le fait que les informations requises varient constamment en quantité et en qualité.

LE CHOIX DU QUÉBEC

Au Québec, le calcul de la possibilité forestière repose sur la stratification du territoire, c'est-à-dire sur la confection de strates forestières regroupant des peuplements homogènes sur les plans écologique et dendrométrique. À partir des données écoforestières, chacune des strates est orientée vers la production d'un groupe d'essences dites prioritaires. Le choix du groupe d'essences prioritaires, des objectifs de production et de la stratégie sylvicole pour atteindre ces objectifs débouche sur les séries d'aménagement, lesquelles regroupent des strates forestières de mêmes composition et dynamique naturelle, et qui sont soumises à une même stratégie sylvicole et aux mêmes contraintes d'aménagement. *Sylva II* effectue les calculs à un niveau plus élevé, celui du groupe de calcul, qui regroupe plusieurs séries d'aménagement et qui forme une unité distincte du point de vue de l'aménagement et de l'approvisionnement. La figure 1 illustre le processus de planification stratégique de l'aménagement au Québec.

Le Québec a choisi d'élaborer son propre outil de simulation (*Sylva II*) qui contient deux principaux modules, l'un permettant de simuler l'aménagement des strates forestières de *structure équienne* et l'autre, celui des strates de *structure inéquienne*. Ces deux modules reposent sur des approches de simulations bien documentées dans la littérature.

La planification de l'aménagement des peuplements de structure équienne concerne les quelque 90 % du domaine forestier public dont chacune des strates est composée par des tiges ayant approximativement le même âge. Connaissant la superficie du territoire occupée par les strates de chaque classe d'âge, la simulation consiste à les faire vieillir pour prédire les volumes que comporteront les superficies une fois ces strates parvenues à maturité. Le volume marchand disponible pour la récolte est estimé en multipliant les superficies arrivées à maturité par le volume fourni par les tables de production. Ce calcul est répété à chaque pas de simulation de cinq ans sur un horizon de simulation de 150 ans. Naturellement, la récolte réalisée à chaque pas de simulation influence l'évolution des strates sur le territoire. La possibilité de coupe à rendement soutenu correspond alors au volume marchand du pas de simulation dont le volume disponible à la récolte est le plus petit parmi les

trente de l'horizon de simulation. Le terme « équation de conservation » est actuellement d'usage au Québec pour décrire cette approche. Cette procédure est aussi appelée « contrôle aire-volume » étant donné que le volume proposé est en lien avec la capacité de production d'une superficie donnée.

Environ 10 % du territoire productif est constitué de strates ayant une structure inéquienne. Les arbres qui composent chacune de ces strates appartiennent à plusieurs classes d'âge. La fréquence des tiges pour chaque classe de diamètre est alors la variable clé à la base de la simulation. En connaissant la répartition des tiges par classe de diamètre, leur accroissement, leur mortalité ainsi que la récolte effectuée parmi celles-ci, il est possible de simuler l'évolution des peuplements au cours d'une période donnée et de déterminer ainsi la possibilité annuelle de coupe à rendement soutenu.

ANALYSE DE L'OUTIL DE PLANIFICATION UTILISÉ AU QUÉBEC

1. *Module de simulation adapté aux peuplements de structure équienne*

LIMITES DU MODÈLE UTILISÉ

Bien qu'elles soient prises en considération dans l'exercice de planification via les diverses affectations du territoire, les contraintes économiques, opérationnelles, sociales et environnementales ne font pas partie intégrante du modèle de planification. L'approche adoptée par le Québec exige de procéder par essais et erreurs. Par conséquent, seul un nombre limité d'alternatives peuvent être analysées, ce qui n'assure pas que les solutions trouvées soient « optimales » pour l'ensemble des objectifs fixés et des contraintes d'aménagement. Le chapitre 1 décrit comment la croissance est simulée à l'aide du modèle « par courbes ».

LE CONCEPT DE FORÊT NORMALE

L'équation de conservation commande, soit un niveau constant, soit un niveau croissant de récolte, en priorisant généralement la récolte des peuplements matures. En d'autres termes, l'application de l'équation de conservation tend à normaliser la forêt, ce qui façonne la distribution des classes d'âge des peuplements pour un territoire donné. Cette démarche est en apparence contraire au concept d'aménagement écosystémique dans lequel le maintien de la biodiversité et des fonctions des écosystèmes forestiers est possible grâce à un aménagement qui privilégie une composition et une structure des peuplements semblables à celles qui caractérisent les milieux naturels. Toutefois, l'interaction entre la méthode usuelle de planification des opérations de récolte et les événements ou

conditions plus aléatoires telles les perturbations naturelles et les contraintes liées à l'accessibilité du territoire ne favorise pas nécessairement la normalisation de la forêt. Cette interaction permet donc un certain degré d'intégration du concept d'aménagement écosystémique. Une intégration complète de ce concept passerait cependant par la mise au point d'une nouvelle approche de modélisation capable de prendre les perturbations naturelles en compte dans le calcul de la possibilité forestière.

LES EFFETS DE POSSIBILITÉ

Les effets de possibilité se définissent comme étant des augmentations immédiates de la possibilité forestière sur la base de gains anticipés de croissance qui découlent de stratégies sylvicoles particulières. Les effets de possibilité participent de façon automatique au processus de maximisation de la possibilité. Cependant, le recours à des effets de possibilité liés à des traitements sylvicoles est réglementé. Par contre, d'autres effets de possibilité restent possibles, notamment ceux reliés aux hypothèses de succession forestière et de priorités de récolte. L'utilisation de ces effets devrait reposer sur une connaissance précise des incertitudes et des erreurs inhérentes aux hypothèses qui y conduisent.

LA MODÉLISATION DE LA SUCCESSION FORESTIÈRE

Lors de l'élaboration du scénario d'aménagement, le planificateur doit déterminer les effets des traitements sylvicoles sur la succession forestière. Bien qu'orientée par les caractéristiques de station, la détermination de la succession forestière est laissée à la discrétion du planificateur. La famille de courbes à appliquer sur la strate de retour, ainsi que les délais de régénération, les baisses de productivité ou les pertes éventuelles en superficies productives sont donc déterminés par des choix d'expert. Ces choix peuvent avoir des effets non négligeables sur la disponibilité en matière ligneuse et conséquemment sur la possibilité forestière.

LES ÉVÉNEMENTS CATASTROPHIQUES

Le logiciel *Sylva II* intègre un mécanisme d'altération des courbes de production pour tenir compte d'un épisode de défoliation par la tordeuse des bougeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* Clem.). Toutefois, les événements d'ordre catastrophique comme les feux, les chablis et les épidémies d'insectes autres que la tordeuse des bougeons de l'épinette, de même que les maladies forestières ne sont pas pris en compte par l'outil de simulation.

LA CRÉATION DES FAMILLES DE COURBES

Pour les peuplements plurispécifiques, la courbe d'évolution du volume marchand total est estimée en additionnant les volumes des courbes de référence provenant de peuplements monospécifiques en fonction de la composition de la strate. Cette approche génère un risque que soient négligées les interactions possibles entre les espèces. Le chapitre 3 aborde notamment cette question.

2. Module de simulation adapté aux peuplements de structure inéquienne

LE CONTRÔLE DE LA RÉCOLTE

Présentement, le contrôle de la récolte pour les peuplements de structure inéquienne est fonction de divers critères mentionnés au *Manuel d'aménagement forestier*. Ces critères se rapportent principalement à la surface terrière avant coupe, à la surface terrière résiduelle et à la surface terrière prélevée, sans toutefois orienter la répartition du prélèvement dans les différentes classes de diamètre. Cette approche ne respecte pas entièrement les principes sous-jacents au modèle de simulation. Peu de modèles ont été développés pour orienter la récolte dans les peuplements de structure inéquienne. Toutefois, des outils de planification visant le façonnage d'une structure diamétrale optimale ont été développés afin d'uniformiser le rendement des peuplements, de stabiliser le recrutement d'arbres marchands et d'assurer la conservation des valeurs écologiques de ces peuplements.

LE RECRUTEMENT

Dans le cas des peuplements de structure inéquienne, le recrutement d'arbres marchands est simulé de façon arbitraire sans égard à la dynamique de ces peuplements ou aux perturbations provoquées par la récolte. Le recrutement est principalement fonction de la structure des peuplements. Le fait qu'on ne tienne pas compte de la structure pour définir le recrutement engendre potentiellement, à moyen et à long terme, une disparité importante entre la planification de l'aménagement et sa mise en œuvre sur le terrain.

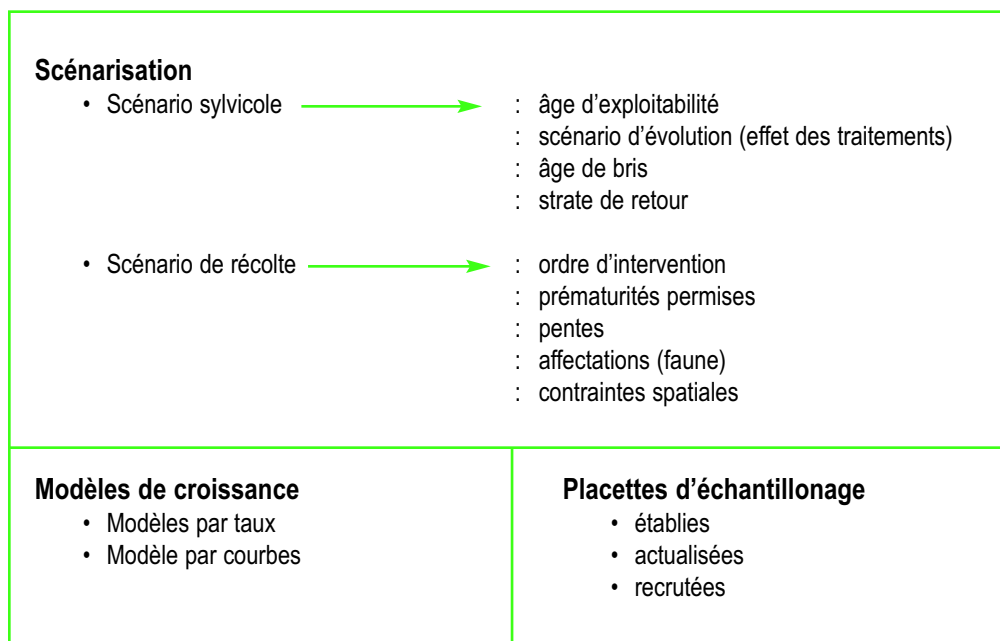
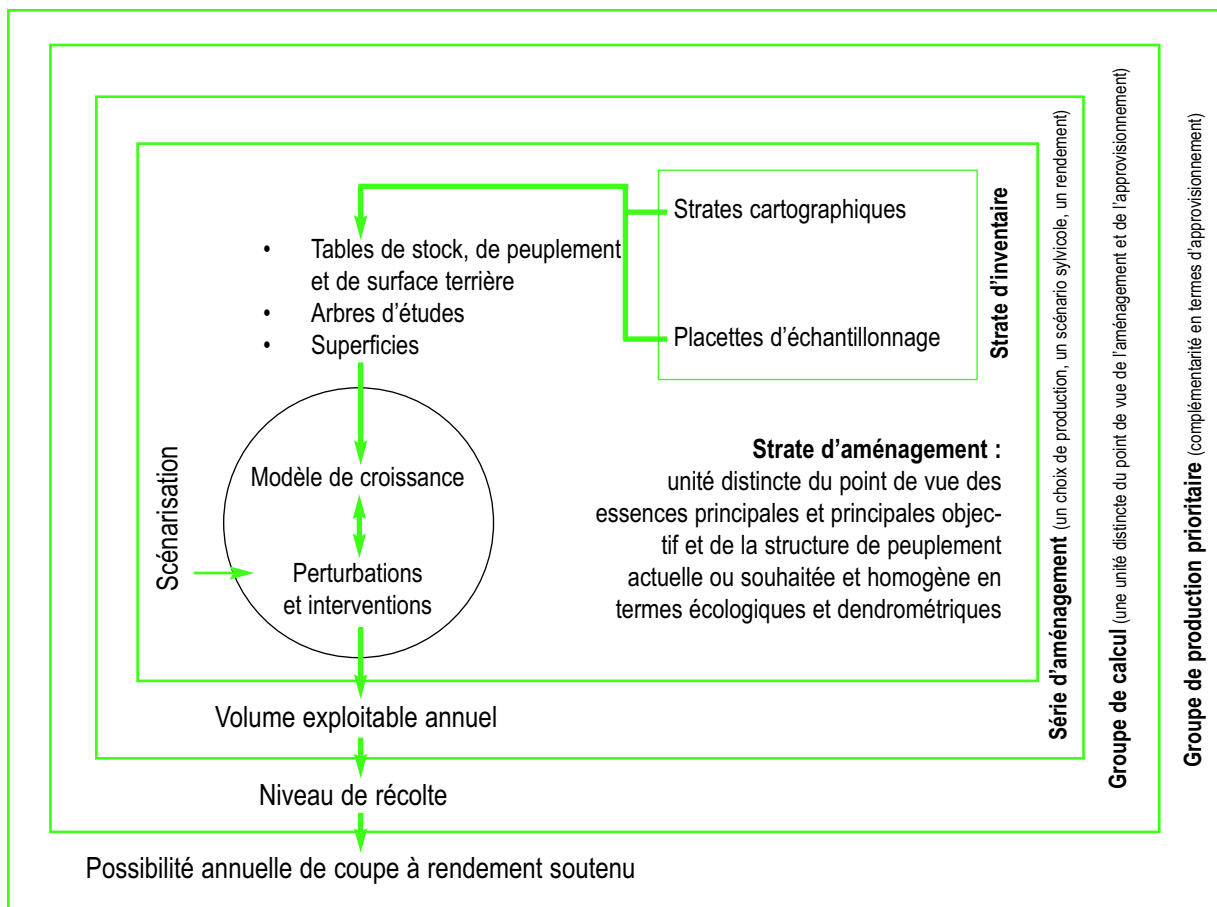


FIGURE 1. Schéma de la planification stratégique de l'aménagement forestier au Québec

SECTION A

LE CALCUL DE LA POSSIBILITÉ FORESTIÈRE ET SES IMPRÉCISIONS

Le processus du calcul de la possibilité forestière (CPF) pour une aire commune a été examiné. Trois étapes le composent : les inventaires forestiers, la simulation de la croissance et le calcul de la possibilité proprement dit. Selon la nature des peuplements, trois modèles sont utilisés pour simuler la croissance. Le modèle « par courbes » permet de simuler la croissance en volume marchand à l'hectare à l'aide de courbes donnant ce volume en fonction de l'âge du peuplement, de l'essence, de la classe de qualité de station et de la classe de densité relative. Il est approprié aux peuplements équiennes de feuillus intolérants mélangés ou non aux résineux, et aux peuplements résineux, soit sur la plus grande partie du territoire forestier du Québec (90 %). Le modèle « par taux » permet de simuler la croissance en volume par tige selon l'essence de celle-ci, son diamètre à hauteur de poitrine (dhp) et sa qualité. Il est habituellement réservé à la modélisation de la croissance de peuplements équiennes ou inéquiennes de feuillus tolérants, mélangés ou non avec des résineux. Il existe un modèle propre aux plantations qui décrit leur croissance en début de révolution, mais lorsqu'elles atteignent un certain âge, leur croissance est simulée comme celle de forêts naturelles à l'aide du modèle « par courbes ». Ce chapitre décrit principalement les calculs basés sur le modèle « par courbes ». La documentation relative au modèle « par taux » était trop fragmentaire pour que l'on puisse en donner un compte rendu détaillé. Les buts de la présente analyse étaient les suivants :

- a) identifier les diverses sources de biais et de variation qui affectent un CPF, et
- b) déterminer si l'erreur quadratique moyenne associée à l'estimation de la possibilité forestière peut être estimée.
Si oui, on désirait
- c) trouver un estimateur de cette erreur.
Si non, on chercherait à
- d) identifier les changements nécessaires pour en produire un estimateur scientifiquement valide et crédible.

Les trois étapes du calcul de la possibilité forestière sont décrites en 1.1. Les sources de biais et de variation sont énumérées et commentées dans la partie 1.2. Les conclusions de la section 1.4. sont discutées et justifiées en 1.3.

1.1 DESCRIPTION

1.1.1 INVENTAIRES FORESTIERS

Le troisième inventaire forestier du Québec fournit à l'aménagiste responsable du calcul de la possibilité forestière des estimations du volume de bois marchand sous écorce par essence et par strate regroupée pour le territoire forestier formé de peuplements dont les arbres dominants font plus de 7 m de hauteur. Outre ces volumes, l'inventaire produit des estimations de certains intrants des modèles de croissance comme l'âge de l'essence et sa densité en nombre de tiges à l'hectare par strate regroupée.

Un inventaire forestier complet dure environ 10 ans. Le Québec est divisé en une centaine d'*unités de sondage* dont le dixième est échantillonné au cours d'une année. Le territoire de chaque unité de sondage est survolé par avion et photographié un ou deux ans avant l'inventaire au sol. Le cadre de sondage est constitué de cartes photo-interprétées, issues des photos aériennes, de tous les peuplements forestiers de chaque unité de sondage. La photo-interprétation fournit des données sur 16 variables qualitatives pour chaque peuplement forestier identifié et délimité par un polygone tracé sur la carte. Une strate *cartographique* est un ensemble de peuplements dont les 16 caractéristiques photo-interprétées sont identiques (p. ex. mêmes type de couvert, groupe d'essences, classe de densité du couvert, classe de hauteur, classe d'âge du peuplement, classe de pente, type de perturbation, etc.). Les peuplements d'une même strate cartographique ne sont pas nécessairement adjacents. Une unité de sondage est constituée de strates dites *regroupées*, elles-mêmes formées de la réunion de plusieurs strates cartographiques dont, notamment, le type de couvert, le groupe d'essences, la classe de densité-hauteur, l'âge et le type écologique sont apparentés.

Un cycle complet de l'inventaire comporte environ 100 000 placettes circulaires de 400 m². Il existe des placettes temporaires et des placettes permanentes. Ces dernières, au nombre de 12 000 environ, font l'objet de mesures plus détaillées que les placettes temporaires et, comme leur nom l'indique, sont mesurées à chaque cycle d'inventaire, donc environ tous les 10 ans. Dans les placettes temporaires, mesurées une seule fois, on note l'essence de chaque arbre marchand (dhp $\geq$ 9 cm) et on mesure son dhp (cm). On mesure aussi la hauteur (m) et l'âge (années) de quelques arbres échantillons (3 par placette, dans les temporaires), dominants ou codominants, des essences qui définissent le type de peuplement. Les 16 caractéristiques obtenues par

photo-interprétation sont aussi évaluées sur le terrain. Dans une sous-placette de 40 m² centrée sur la placette principale, on dénombre les gaules (dhp < 9 cm) par classe de dhp de 2 cm, par essence.

Le plan de sondage prévoit généralement au moins 15 placettes par strate regroupée. La répartition des placettes s'y fait au *prorata* des superficies par classe de densité du couvert et des superficies productives par feuillet parmi ceux qui composent la carte de l'unité de sondage. Un certain nombre de ces placettes sont mesurées lors d'un inventaire donné; ce sont les placettes *établies*. Parmi celles-ci, on compte les placettes permanentes. Les données des placettes temporaires établies lors d'inventaires antérieurs (dhp, mortalité et passage de la classe des gaules à celle des arbres marchands) sont mises à jour à l'aide de modèles de croissance (MODÉLISA); ces placettes *actualisées* contribuent prioritairement pour un minimum de 15 placettes par strate regroupée au même titre que les placettes établies. Seules les plus grandes strates regroupées, dont la somme des superficies constitue 80 % de celle de l'unité de sondage, sont effectivement sondées lors d'un inventaire. Le reste de l'unité de sondage est composé de nombreuses strates de petite superficie qui font l'objet d'imputation : dans ces strates, des placettes (au moins 15) sont importées de strates de mêmes caractéristiques cartographiques d'autres unités de sondage, soit du même inventaire, soit d'inventaires antérieurs. Ces placettes sont dites *recrutées*. Le recrutement se fait selon des règles précises et exigeantes qui ont pour but d'assurer que les placettes imputées représentent bien la strate dont elles serviront à estimer les volumes marchands et la composition en essences. Le recrutement et l'actualisation de placettes sont deux mécanismes importants dans la génération de l'information pour le CPF. À titre d'exemple, sur les 10 225 placettes de l'unité de sondage U28A du troisième inventaire, notre région test, 9 080 sont des placettes recrutées, 941 des placettes actualisées et 204 des placettes établies, dont 39 permanentes. Sur le terrain, les placettes temporaires sont regroupées en virées de 2 à 7 placettes le long d'un parcours, généralement en droite ligne, qui traverse plusieurs strates de telle sorte qu'au plus deux placettes d'une même virée se trouvent dans des peuplements d'une même strate regroupée. Une virée de placettes permanentes comporte deux placettes seulement. Une virée correspond à une journée de travail d'une équipe de techniciens forestiers.

Dans chaque placette, les volumes des arbres sont estimés grâce aux tarifs de cubage généraux (Perron, 1985) et locaux. Le tarif local d'une essence permet d'estimer la hauteur d'un arbre de cette essence connaissant son dhp

et la hauteur moyenne et le dhp moyen des arbres échantillons (toutes essences) de la placette où l'arbre se trouve. Il est construit à l'aide des couples hauteur-dhp des arbres échantillons de l'essence dans l'unité de sondage et, sauf pour certaines essences, des hauteurs et des dhp moyens de tous les arbres échantillons de la placette. Le dhp et la hauteur prédite de chaque arbre sont ensuite introduits dans le tarif de cubage général de l'essence pour prédire son volume. Les volumes des arbres marchands sont sommés par essence et par placette. Le volume à l'hectare de l'essence dans la strate regroupée est la moyenne des volumes de l'essence par placette, pondérée par la superficie des classes de densité dans la strate regroupée. La superficie de la strate est estimée à l'aide des cartes photo-interprétées. Les inventaires produisent aussi, par strate regroupée, l'âge moyen par essence des principales essences, mesuré à l'aide d'une carotte prélevée sur les arbres échantillons à une hauteur déterminée (1 m, 1,3 m ou 15 cm selon le cycle d'inventaire), et la densité en nombre de tiges à l'hectare par essence. Le volume et la densité toutes essences sont obtenus par des méthodes analogues. Une variance est calculée pour le volume à l'hectare toutes essences, mais elle n'est pas pondérée par les superficies par classe de densité comme l'est le volume moyen, parce que le nombre de placettes par classe de densité à l'intérieur d'une strate regroupée est trop petit.

1.1.2 SIMULATION DE LA CROISSANCE

La possibilité forestière est habituellement calculée pour une aire commune ou unité d'aménagement. Ce territoire est parfois complètement inscrit dans une seule unité de sondage, comme l'aire commune 8285B de l'unité de sondage U28A. Parfois il en chevauche plusieurs. L'aménagiste qui entreprend un CPF dresse une liste des strates regroupées qui composent l'aire commune. Il détermine les superficies exploitables de chaque strate regroupée dans l'aire commune. Ces strates réduites à leurs dimensions de zone exploitable dans l'aire commune deviennent des *unités de simulation*. Le calcul de la possibilité forestière n'utilise que les données d'inventaire des strates regroupées présentes dans l'aire commune, mais lorsqu'une strate regroupée d'une unité de sondage est présente dans une aire commune, toutes les placettes d'inventaire qui se trouvent dans cette strate regroupée contribuent à l'estimation des volumes et au calcul de la possibilité forestière de cette aire commune, que ces placettes soient ou non dans l'unité de simulation correspondante de l'aire commune. La superficie d'une unité de simulation est donc généralement plus petite que celle de la strate regroupée correspondante de

l'unité de sondage ou que celle de la strate regroupée qui se trouve dans l'aire commune. Les unités de simulation d'une unité d'aménagement sont souvent rassemblées en séries d'aménagement composées de strates présentant les mêmes caractéristiques écologiques, les mêmes contraintes à l'aménagement et pour lesquelles l'aménagiste formule les mêmes objectifs de production. L'aménagiste répartit les séries d'aménagement du territoire en groupes de calcul, des ensembles mutuellement exclusifs d'unités de simulation dans lesquels on souhaite produire en rendement soutenu certaines essences appelées *essences principales objectif* afin d'alimenter les usines de transformation du territoire.

1.1.2.1 Modèle « par courbes »

Dans un groupe de calcul donné, l'aménagiste choisit une courbe de croissance pour chaque essence commerciale présente selon une méthode développée par Pothier et Savard (1998, Chapitre 3) pour des peuplements purs, et adaptée à des peuplements mélangés. Pour ce faire, deux valeurs sont nécessaires : l'indice de qualité de station de l'essence (IQS_{ess}) et l'indice de densité relative actuel de l'essence dans la strate ($IDR_{0,ess}$). Pour déterminer à quel stade de son développement se trouve l'essence dans la strate actuelle, on calcule l'âge moyen des arbres échantillons de cette essence, corrigé pour la hauteur à laquelle les carottes pour le mesurer ont été prélevées, si cette hauteur diffère de 1 m.

Le texte qui suit présente quelques équations qui permettent de saisir le mécanisme du système de modèles. Il illustre aussi la complexité de l'estimation des volumes et, par conséquent, celle de l'estimation de leur imprécision. En effet, chaque fois qu'une quantité est estimée, une imprécision est introduite dans le système. Pour pouvoir estimer l'imprécision de l'estimateur de la possibilité forestière, il faudrait non seulement estimer l'erreur quadratique moyenne associée à chacune de ces imprécisions, mais également la propager correctement dans l'ensemble du calcul. Les dhp de tous les arbres des placettes de la strate regroupée à l'origine de l'unité de simulation sont compilés pour former une *table de peuplement* qui donne le nombre d'arbres à l'hectare par classe de dhp de 2 cm. La hauteur dominante de l'essence ($\bar{H}_{100}$) est obtenue par :

$$\bar{H}_{100} = 1,3 + \left[\frac{\overline{dhp}_{100}}{\left(\frac{\overline{dhp}_{ess}}{\bar{H}_{ess} - 1,3} \right) + \beta_{2,ess} \left(\overline{dhp}_{100} - \overline{dhp}_{ess} \right)} \right] \quad (1)$$

où $\overline{dhp}_{100}$ désigne le dhp moyen (cm) des 100 arbres qui ont les plus gros dhp dans un hectare (excluant les vétérans, toutes essences), selon la table de peuplement, $\bar{H}_{ess}$ et $\overline{dhp}_{ess}$ sont la hauteur et le dhp moyens des arbres échantillons de l'essence dans la strate, respectivement, et $\beta_{2,ess}$, l'estimation du paramètre de l'équation de hauteur dominante pour l'essence (Pothier et Savard, 1998, Tableau 2, p. 36). Un IQS provisoire pour l'essence ($IQS_{0,ess}$) est estimé par :

$$IQS_{0,ess} = b_1 \bar{H}_{100}^{-b_2} \left(1 - e^{-b_3 \bar{A}}\right)^{b_4 \bar{H}_{100}^{-b_5}} \quad (2)$$

où $\bar{A}$ est l'âge moyen non corrigé des arbres échantillons de l'essence dans la strate, et $b_1, \dots, b_5$ sont des paramètres estimés pour l'essence (Pothier et Savard, 1998, Tableau 4, p. 38). Le temps nécessaire à un arbre de l'essence concernée pour atteindre 1 m de hauteur est estimé par :

$$T_{1,ess} = b_1 IQS_{0,ess}^{b_2} \quad (3)$$

où b_1 et b_2 sont des paramètres estimés propres à l'essence¹ (Pothier et Savard, 1998, Tableau 3, p. 36). L'âge corrigé (à 1 m du sol) est alors estimé par :

$$A_c = A + T_{1,ess} (1 - h_0) \quad (4)$$

où A est l'âge mesuré à la hauteur h_0 de prélèvement (0,15, 1, ou 1,3 m). L'IQS définitif pour l'essence dans la strate peut alors être estimé (IQS_{ess}) en remplaçant $\bar{A}$ par l'âge corrigé moyen des arbres échantillons de l'essence dans la strate ($\bar{A}_c$) dans l'équation (2).

L'indice de densité relative actuel de l'essence ($IDR_{0,ess}$) est donné par :

$$IDR_{0,ess} = \frac{N_{0,ess}}{\left(\frac{\bar{D}_{q_i}}{10^{b_1}}\right)^{-\frac{1}{b_2}}} \quad (5)$$

où $N_{0,ess}$ est l'estimation du nombre de tiges à l'hectare de l'essence dans la strate (gaules et arbres marchands), $\bar{D}_{q_i}$, le diamètre quadratique moyen toutes essences (gaules et arbres marchands), et b_1 et b_2 , des paramètres estimés, spécifiques à l'essence (Pothier et Savard, 1998, Tableau 5, p. 38). L' IQS_{ess} et l' $IDR_{0,ess}$ permettent de choisir une courbe de croissance pour

¹ À moins d'indication contraire, les coefficients b_i ($i = 1, 2, \dots$) d'une équation lui sont propres, même si, d'une équation à une autre, ces paramètres ont la même notation.

chaque essence et l'âge corrigé indique à quel moment de son évolution cette essence se trouve, l'année de l'inventaire. Pour simuler la croissance du peuplement, on simule la croissance de chacune des essences qui le composent. On suppose les IQS_{ess} constants dans le temps, mais les $IDR_{r,ess}$ dépendent de l'âge r ($r = 1, 2, \dots$). Pour faire évoluer ces IDR, on estime d'abord l' $IDR_{100,ess}$, soit l'IDR à 100 ans de l'essence, à l'aide de l' $IDR_{0,ess}$ actuel :

$$IDR_{100,ess} = \frac{1}{b_{11}} \left[\bar{A}_c \log(IDR_{0,ess}) - b_{10} \right] \quad (6)$$

où b_{10} et b_{11} sont des paramètres estimés propres à l'essence (Pothier et Savard, 1998, Tableau 10, p. 44). L' $IDR_{r,ess}$ à un âge r quelconque est estimé par :

$$IDR_{r,ess} = \exp \left[\frac{1}{r} (b_{10} + b_{11} IDR_{100,ess}) \right] \quad (7)$$

où tous les symboles sont déjà définis et les coefficients b_{10} et b_{11} sont les mêmes que dans l'équation (6).

Les équations 12, 13, 14 et 15 de Pothier et Savard (1998, p. 26) donnent la hauteur dominante, le diamètre quadratique moyen, la surface terrière et le volume à l'hectare, respectivement, par essence en fonction de l'âge corrigé (r). Ce système d'équations dépend de l' IQS_{ess} , de l' $IDR_{0,ess}$, et de 19 paramètres estimés. Le volume de l'essence dans l'unité de simulation peut donc être prédit à tout âge r . Quel que soit r , ce volume prédit est ajusté par un facteur constant $V_{0,ess} / \hat{V}_{0,ess}$ où $V_{0,ess}$ est le volume actuel, estimé par les inventaires, de l'essence dans l'unité de simulation, et $\hat{V}_{0,ess}$ est le volume prédit par la courbe, de telle sorte qu'au début de la simulation, le volume total (toutes essences) et la composition en essences estimés par les inventaires soient les mêmes que ceux que prédisent les courbes de croissance, respectivement.

L'âge où l'accroissement annuel moyen d'une essence atteint un maximum, appelé *âge d'exploitabilité*, est obtenu pour les essences principales objectif d'une unité de simulation. L'*âge d'exploitabilité absolu* de l'unité de simulation est une moyenne pondérée par les volumes actuels des âges d'exploitabilité des essences principales objectif de l'unité de simulation. C'est l'âge à partir duquel l'unité de simulation peut être récoltée. L'âge auquel le volume des essences principales objectif passe en-deçà de 50 m³/ha est appelé l'*âge de bris*. Si une unité de simulation atteint son âge de bris, son volume est considéré comme une perte, car sa récolte n'est plus rentable.

Dans les unités de simulation dont les peuplements font moins de 7 m de hauteur, l'aménagiste doit poser des hypothèses sur le peuplement qui émerge. Il s'aide en cela des suivis après traitement prescrits par le Ministère et effectués par les compagnies forestières, s'ils existent. La superficie de ces territoires peut facilement atteindre 25 % de celle d'une aire commune.

1.1.2.2 Modèle « par taux »

Dans le modèle « par taux », des taux de passage sont estimés pour deux périodes de prédiction : une période de 5 ans et une période de 10 ans. Si l'on veut prédire un volume dans 25 ans, on applique deux fois une série de taux de passage pour une période de 10 ans, puis une série de taux pour une période de 5 ans. Une série de taux comporte un taux de mortalité, un taux de passage de la strate des gaules à celle des arbres marchands et autant de taux de passage des arbres marchands d'une classe de dhp à la suivante qu'il y a de classes de dhp de 2 cm au-dessus de 9 cm. Ces séries de taux ont été estimées à l'aide des données des placettes permanentes par zone d'accroissement, par type de couvert, par groupe d'essences, par classe de densité, par classe de perturbation (présence ou non), par classe de qualité des tiges (feuillus) et par classe de défoliation (sapin et épinette seulement).

1.1.3 POSSIBILITÉ FORESTIÈRE

Dans certains groupes de calcul, il n'y a qu'une essence principale objectif; dans d'autres, il y en a plusieurs (p. ex. sapin, épinette, pin, mélèze). Pour alléger le texte de ce chapitre, l'expression « groupe d'essences principales objectif » est utilisée pour désigner l'ensemble des essences principales objectif d'un groupe de calcul, qu'il y en ait une seule ou plusieurs.

Pour chaque groupe d'essences principales objectif correspondant à un groupe de calcul, le volume marchand annuel moyen disponible est prédit pour 30 périodes consécutives de 5 ans, soit 150 ans. Traditionnellement, la récolte d'un certain volume constant des essences principales objectif est simulée dans le groupe de calcul selon les priorités de récolte (p. ex. 50 % du volume alloué est prélevé dans des unités de simulation en stagnation ou en sénescence afin de minimiser les pertes, et 50 %, dans les unités de simulation qui affichent le plus fort volume à l'hectare). Avant d'être comptabilisés, les volumes récoltés prédits par les modèles sont corrigés par des facteurs inférieurs à 1 afin d'en défalquer le volume de bois carié et les pertes dues aux perturbations (p. ex. les feux de forêts). Ces facteurs peuvent dépendre de l'essence,

de l'âge du peuplement et d'autres caractéristiques de l'unité de simulation. Les facteurs propres à la carie peuvent être spécifiques aux régions selon les essences en cause.

Dans les unités de simulation récoltées ou perdues par sénescence, et dans les peuplements de moins de 7 m, l'aménagiste doit poser des hypothèses sur le peuplement successeur (p. ex. type de peuplement, composition en essences, délai de régénération, densité, qualité de station) ou émergent, et en simuler la croissance, puis la récolte dans les périodes qui suivent.

Pour chaque groupe de calcul, le volume disponible en essences principales objectif est ainsi obtenu pour les 30 périodes successives de 5 ans. Il est composé du volume disponible dans les peuplements non récoltés à la période précédente, si ces peuplements n'ont pas atteint l'âge de bris au cours de la période, de l'accroissement en volume dans ces territoires, ainsi que du volume disponible dans les unités de simulation qui ont atteint leur âge d'exploitabilité absolu au cours de la période. Le minimum de ces 30 volumes est une approximation du volume en essences principales objectif récoltable en rendement soutenu. L'aménagiste réalise quelques itérations à l'échelle du groupe de calcul en testant différents prélèvements stables afin d'atteindre l'équilibre entre la capacité de production du groupe de calcul et la récolte.

Quand une unité de simulation est récoltée, des arbres des essences principales objectif du groupe de calcul sont récoltés, mais aussi des arbres d'essences secondaires. Or, ces essences peuvent être considérées comme essences principales objectif dans d'autres groupes de calcul de l'aire commune. Pour obtenir la possibilité forestière d'un groupe d'essences principales objectif sur l'ensemble d'une aire commune, le volume de ces essences récolté dans leur groupe de calcul (en général, un volume constant sur les 30 périodes de 5 ans) est ajouté aux volumes de ces mêmes essences récoltés dans les autres groupes de calcul où elles sont des essences secondaires, et ce, pour chaque période de 5 ans de la simulation. La possibilité forestière du groupe d'essences principales objectif, exprimée en m^3/an , est déterminée par le palier le plus faible sur l'horizon de simulation.

21

Le CPF est un exercice itératif au sens où l'on doit supposer qu'un certain volume de récolte en rendement soutenu a été effectivement alloué pour un groupe de calcul. Or, ce volume alloué dépend étroitement de la possibilité forestière du groupe d'essences principales objectif pour l'ensemble de l'aire commune. L'aménagiste procède par essais et erreurs en exécutant *Sylva II*

plusieurs fois jusqu'à ce que le processus converge. Il doit donc intervenir à chaque itération car cette optimisation n'est pas automatisée dans *Sylva II*.

1.2 SOURCES DE BIAIS ET DE VARIATION

Les sources de biais ou de variation susceptibles d'affecter un calcul de possibilité forestière sont énumérées et commentées dans cette section. Auparavant, il serait utile de rappeler certaines notions d'échantillonnage et d'estimation.

L'un des premiers problèmes à résoudre, lorsque l'on entreprend un sondage, est la construction d'un *cadre de sondage*, c'est-à-dire d'une liste de tous les éléments de la population cible. Cette liste permet de tirer au hasard, dans cette population, un échantillon représentatif dont la probabilité de sélection est connue. Tout élément de la population doit avoir une probabilité non nulle de faire partie d'un échantillon.

Pour tout estimateur $\hat{\theta}$ d'un paramètre θ (p. ex. le volume de bois marchand total d'un territoire donné), on définit l'erreur quadratique moyenne (EQM) comme la moyenne du carré de la différence entre l'estimation et la valeur réelle du paramètre sur tous les échantillons possibles sous le plan de sondage, pondérée par la probabilité, p_i , de sélection de l'échantillon :

$$EQM(\hat{\theta}) = \sum_i p_i (\hat{\theta}_i - \theta)^2 \quad (8)$$

où $\hat{\theta}_i$ désigne l'estimation du paramètre quand l'échantillon i est choisi ($i = 1, 2, \dots$). Un échantillon est constitué d'un ensemble d'unités d'échantillonnage (p. ex. des placettes), choisies selon des règles telles que les p_i soient connus. On peut démontrer que

$$EQM(\hat{\theta}) = [\text{Biais}(\hat{\theta})]^2 + \text{Var}(\hat{\theta}) \quad (9)$$

où $\text{Biais}(\hat{\theta}) = \theta - E_p(\hat{\theta})$, $E_p(\hat{\theta}) = \sum_i p_i \hat{\theta}_i$ est la moyenne des $\hat{\theta}_i$ sur tous les échantillons possibles selon le plan de sondage, et la variance de l'estimateur est définie par :

$$\text{Var}(\hat{\theta}) = E_p \left[\left(\hat{\theta} - E_p(\hat{\theta}) \right)^2 \right] = \sum_i p_i \left(\hat{\theta}_i - E_p(\hat{\theta}) \right)^2. \quad (10)$$

Si la moyenne de l'estimateur n'est pas égale au paramètre que l'on cherche à estimer ($E_p(\hat{\theta}) \neq \theta$), l'estimateur est *biaisé*. Si la moyenne de l'estimateur

est égale au paramètre, l'estimateur est *sans biais*, et son erreur quadratique moyenne est égale à sa variance. Un biais négatif correspond à une surestimation. Le biais est une erreur systématique de l'estimateur par rapport à sa cible. La variance est composée de déviations aléatoires par rapport à la moyenne de l'estimateur (sa cible réelle), que celle-ci soit la bonne (l'estimateur est alors sans biais) ou non.

Dans la suite de ce document, le terme *variation* est utilisé pour désigner les déviations qui contribuent à la variance, le terme *biais* pour désigner celles qui contribuent au biais tel que défini ci-dessus, et le terme *imprécision* pour désigner une contribution à l'erreur quadratique moyenne.

Lorsque l'on estime un paramètre ou une quantité à l'aide d'un modèle de prédiction, son erreur quadratique moyenne est appelée *l'erreur quadratique moyenne de prédiction*. Elle est composée d'un terme associé à la prédiction et d'un terme associé à l'estimation des paramètres du modèle.

Un bon estimateur devrait toujours être sans biais. Mais on préférera parfois un estimateur biaisé dont le biais tend vers zéro quand la taille de l'échantillon augmente si l'EQM d'un tel estimateur est plus petite que celle de l'estimateur sans biais concurrent, car la probabilité qu'un tel estimateur produise une estimation proche du paramètre est plus grande, surtout si la taille de l'échantillon est grande. Toute estimation et toute prédiction engendre des imprécisions qui contribuent à l'EQM.

Voici la liste des sources d'imprécision selon le modèle « par courbes ».

1.2.1 DANS LES INVENTAIRES FORESTIERS

1) Le cadre de sondage

Les cartes photo-interprétées constituent le cadre de sondage des inventaires forestiers du Québec. Cet excellent cadre de sondage couvre bien toute la population des peuplements forestiers de la province et il permet une stratification précise du territoire. Les superficies des unités de simulation sont estimées à l'aide des cartes photo-interprétées. Elles sont donc sujettes à une erreur de mesure, mais que l'on suppose faible par rapport aux variations provenant d'autres sources. Certains peuplements, comme ceux qui sont situés sur des terrains en forte pente, sont exclus de l'inventaire dès l'étape de la cartographie. Toute erreur de classification d'un peuplement peut engendrer des erreurs dans les superficies des strates cartographiques.

2) L'échantillonnage des inventaires

Malgré ce que suggère leur nom, les inventaires ne recensent pas la population. Au contraire, les placettes mesurées ne représentent qu'une petite fraction du territoire forestier car elles ne sont pas choisies selon un mécanisme aléatoire rigoureux. La fraction du territoire représentée par l'échantillon de placettes est d'autant plus petite que seul 80 % du territoire est échantillonné et que dans le territoire effectivement échantillonné, les virées d'inventaire doivent être accessibles et traverser plusieurs strates, ce qui exclut de l'échantillonnage une grande partie des peuplements, même dans la partie dite échantillonnée du territoire. En choisissant ainsi l'emplacement des virées, les placettes d'une strate regroupée pourraient se retrouver majoritairement dans des zones de transition entre les peuplements. Les estimations du volume actuel et de la composition en essences des peuplements pourraient s'en trouver biaisées. C'est la principale lacune du plan de sondage.

3) L'actualisation des placettes

Un ensemble de modèles prédit le taux de mortalité, le taux de passage des gaules à la classe des arbres marchands et la croissance en diamètre de ces derniers dans les placettes d'inventaires antérieurs. On suppose ces modèles sans biais. Ces prédictions sont une source d'imprécision qui s'ajoute à celle de l'échantillonnage. Actuellement, ces erreurs de prédiction sont négligées dans le calcul de la variance des volumes par strate regroupée, ce qui contribue à sous-estimer cette variance. D'autres façons d'utiliser l'information des inventaires antérieurs dans les estimateurs du volume actuel pourraient être explorées.

4) Le recrutement de placettes

Les règles d'imputation selon l'appellation cartographique de la strate sont certes raisonnables et les responsables de l'inventaire ont fait preuve d'une profonde connaissance forestière et d'une grande ingéniosité dans l'élaboration de ces règles. De plus, les strates concernées par le recrutement sont de petite superficie : ensemble, elles ne forment que 20 % de la superficie d'une unité de sondage. Cependant, l'imputation pourrait avoir pour effet de mal estimer la composition en essences des peuplements, particulièrement quand des placettes recrutées au sud doivent être imputées à des strates regroupées d'unités de sondage plus au nord ou vice versa. De façon plus générale, ces méthodes ne peuvent pas fournir des estimateurs du volume marchand et de la composition en essences des peuplements dont on connaît les propriétés et dont on peut estimer l'EQM. Actuellement, ces placettes recrutées contribuent à l'estimation au même titre que des placettes établies. Le biais potentiel et la variation dus à l'imputation sont ignorés.

5) La mesure des dhp

La variation sur la mesure du dhp vient de la variabilité de la hauteur à laquelle la circonférence de l'arbre est mesurée (1,3 m à partir du sol le plus haut autour de la souche) et de celle de la tension appliquée au ruban. Généralement, cette mesure est considérée sans biais et sa variance, faible par rapport à celle d'autres sources.

6) L'estimation de la hauteur à l'aide du tarif local

Les tarifs locaux peuvent introduire des biais et ils sont une source de variation supplémentaire dans l'estimation des volumes par arbre. Cette variation comporte un terme qui vient de la prédiction elle-même et un autre terme qui vient de l'erreur d'estimation des paramètres du tarif. La variation augmente à mesure que le dhp de l'arbre dont on prédit la hauteur s'éloigne du dhp moyen des arbres échantillons de l'unité de sondage. Actuellement, cette variation est ignorée. De plus, dans ces tarifs locaux, on utilise la hauteur moyenne des arbres échantillons (toutes essences) par placette comme variable prédictive, alors que l'erreur sur cette moyenne est corrélée à l'erreur résiduelle du modèle. Ceci invalide l'estimation des paramètres de l'équation par la méthode des moindres carrés pondérés (Kmenta, 1996, p. 334-341). Un modèle mixte avec des effets aléatoires de placette serait probablement plus approprié.

7) L'estimation du volume des arbres à l'aide du tarif de cubage général à deux entrées (Perron, 1985)

Une variation supplémentaire s'ajoute lorsque le volume est estimé à partir du dhp mesuré de l'arbre et de sa hauteur prédite par le tarif local. On suppose le tarif général sans biais. L'erreur de prédiction augmente à mesure que le dhp et la hauteur de l'arbre s'éloignent du centre de leur distribution jointe. L'examen des données de Perron (1985) indique que l'erreur de prédiction est particulièrement grande pour les gros arbres et pour les arbres trapus. Les tarifs généraux sont des équations de régression polynomiales en dhp (D) et en hauteur (H) dont les variables explicatives sont des termes en D , H , D^2 , H^2 , DH , D^2H . Dans un modèle de régression polynomiale à plusieurs variables où le coefficient d'une variable comme D^2H diffère significativement de 0, on devrait conserver dans le modèle toutes les variables explicatives de puissance inférieure à ce terme comme DH , D^2 , H , et D , même si leur coefficient de régression ne diffère pas significativement de 0 (Draper et Smith, 1998, p. 268-271). Cela réduit le biais de prédiction. La régression polynomiale souffre d'un défaut important : les prédictions qu'elle produit à la périphérie du domaine des hauteurs et des dhp sont souvent biaisées parce que la surface polynomiale a tendance à se tordre davantage dans ces régions pour mieux s'ajuster aux données du centre du domaine. Il serait sans doute possible de produire, avec les données de Perron (1985), de meilleurs tarifs de cubage généraux grâce à des techniques de régression modernes (p. ex. régression non paramétrique, régression robuste).

8) Le choix des arbres échantillons

Ces arbres sont choisis parmi les dominants et les codominants dans chaque placette. Ceci fait en sorte que les hauteurs des arbres intermédiaires et supprimés sont surestimées et, par conséquent, leurs volumes aussi, car les paramètres du tarif local sont estimés à l'aide des arbres échantillons. Des analyses sur les données de Perron (1985) ont permis de vérifier que c'était bien le cas. Ce biais est modeste par rapport à ceux d'autres sources, mais il affecte tous les arbres de toutes les strates regroupées. Le choix d'arbres dominants et codominants avait pour but de fournir de meilleures estimations de l'IQS par placette. Les arbres échantillons doivent, semble-t-il, répondre à deux objectifs : l'estimation des paramètres des tarifs locaux et l'estimation de l'IQS. Des analyses seraient nécessaires pour vérifier si ces objectifs sont conciliables.

9) Les essences pour lesquelles nous n'avons pas de tarif de cubage général

Le tarif de ces essences est remplacé par celui d'une autre essence, ce qui peut engendrer des biais. Il y a environ 45 essences commerciales au Québec. Perron (1985) donne les tarifs d'une trentaine d'entre elles. Les tarifs qui font défaut sont surtout ceux de feuillus rares (chênes, cerisiers, ormes) et d'essences utilisées en plantation.

10) Les peuplements de moins de 7 m

Ces peuplements n'ont pas été inventoriés de manière systématique dans le troisième programme décennal. L'aménagiste doit donc poser des hypothèses pour simuler la croissance des peuplements futurs ou émergents de ces territoires.

Parmi les sources d'imprécision liées aux inventaires forestiers, la plus susceptible de biaiser les estimations nécessaires au calcul de la possibilité forestière est la source (2). Celles qui nous empêchent d'estimer l'imprécision de la possibilité forestière sont les sources (10), (4) et (3) et celles sur lesquelles nous pourrions agir pour réduire l'imprécision des estimations sont les sources (10) et (2).

1.2.2 DANS LES MODÈLES DE CROISSANCE

11) L'estimation des volumes, des âges moyens, des IQS et des IDR par essence pour une fraction d'une strate regroupée à l'aide des données de toute la strate

Les variations entre les volumes estimés actuels, par essence et par placette, se compensent lorsque l'on somme ces volumes pour obtenir le volume à l'hectare de l'essence dans l'unité de simulation, de telle sorte que la variation de ce dernier tend vers zéro quand le nombre de placettes de l'unité de sondage correspondante augmente. Implicitement toutefois, on suppose que les strates regroupées sont homogènes et que la pratique d'estimer le volume de l'essence dans l'unité de simulation à l'aide des placettes de toute la strate d'origine n'engendre pas de biais. Elle améliore la précision des estimations. Si l'unité de simulation diffère de façon systématique de la strate regroupée dont elle est issue (p. ex. si elle est composée uniquement des peuplements les plus denses de la strate), le volume estimé actuel sera biaisé, ainsi que les volumes prédits pendant toute la vie du peuplement.

12) L'exclusion des vétérans

Pour construire les modèles de croissance, Pothier et Savard (1998) ont exclu de leurs ensembles de données les placettes où il y avait des arbres dont la hauteur prédite était plus du double de la hauteur moyenne des arbres échantillons de la placette. En pratique, la notion de placette disparaît lorsqu'un aménagiste fait ses calculs pour identifier la courbe de croissance qu'il appliquera

à une unité de simulation. Ainsi, le *Diagnostic sylvicole*, un logiciel utilisé dans certaines régions du Québec, semble contenir des critères d'exclusion des vétérans basés sur le dhp (*Diagnostic sylvicole*, 2003). Or cette exclusion devrait dépendre de la hauteur des arbres individuels relativement à la hauteur moyenne des arbres échantillons de la placette. Le modèle de hauteur (équation (1)) étant non linéaire dans ses variables explicatives, des critères basés sur la hauteur et sur le dhp ne peuvent s'équivaloir. Les critères d'exclusion dans l'application des modèles ne sont donc pas clairs. Ceci dit, des erreurs d'exclusion se produisent, quels que soient ces critères. Leur impact sur le calcul de possibilité est-il négligeable ?

13) L'estimation de l'IQS_{ess}

L'estimation de l'IQS est un processus itératif : on estime un $IQS_{0,ess}$ provisoire à l'aide d'une estimation de la hauteur dominante et de l'âge moyen non correction de l'âge afin qu'il corresponde à une hauteur uniforme de 1 m. Finalement on estime l' IQS_{ess} à l'aide de l'estimation de la hauteur dominante et de l'âge corrigé. Les variations associées à l'IQS sont dues à l'échantillonnage, à la prédiction à l'aide des deux modèles (équations (2) et (3)) et à l'estimation des paramètres de ces modèles. Supposer l'IQS constant est une source potentielle de biais et de variation. Un certain biais résulte de l'estimation de la hauteur dominante à l'aide du dhp moyen des plus gros arbres. L'équation (1) pour la hauteur étant non linéaire, cela ne donne pas la même estimation que la moyenne des hauteurs estimées de ces arbres.

14) L'estimation de l'indice de densité relative ($IDR_{r,ess}$)

L'estimation de l'indice de densité relative actuel, $IDR_{0,ess}$, par l'équation (5) est une approximation, même pour des peuplements purs, car le dénominateur estime le nombre de tiges à l'hectare maximum (arbres marchands et gaules) que peut atteindre le peuplement et le numérateur est une estimation du nombre de tiges à l'hectare actuel, donc soumise à la variabilité d'échantillonnage. Des variations de deux ordres affectent le diamètre quadratique moyen : la variation d'échantillonnage due à l'estimation de la distribution des dhp des arbres marchands à partir des placettes de 400 m² pour l'ensemble de la strate, et une variation supplémentaire due à l'extrapolation de la distribution des dhp des gaules dénombrées dans les petites placettes de 40 m² à l'ensemble de la strate. L'estimation de la densité de l'essence au numérateur de l'équation (5) a aussi une variance composite. L'effet d'appliquer des méthodes conçues pour des peuplements purs à des peuplements mélangés est étudié à la section A3. L' $IDR_{0,ess}$ adapté à des peuplements mélangés reflète une densité relative probablement plus faible que celle dont l'essence subit l'effet dans un tel peuplement. Le numérateur de l'équation 5 est le nombre de tiges à l'hectare de l'essence seulement. Son dénominateur est une estimation de la densité maximum du peuplement toutes essences confondues. En peuplement mélangé, la courbe paramétrée par un $IDR_{0,ess}$ ainsi sous-estimé risque de surestimer le volume de l'essence.

27

15) L'arrondissement de l'IQS et de l'IDR

Les IQS effectivement choisis dans *Sylva II* sont des multiples de 3 (p. ex. 9, 12, 15, 18, 21, etc.), et les densités relatives sont, elles aussi, divisées en trois

classes (faible, moyenne, forte), car le logiciel utilise des tables de peuplement plutôt que les équations des courbes. L'effet de cette variation est étudié au chapitre 3.

16) L'estimation des paramètres des équations des tables de rendement

Ces estimateurs incluent non seulement ceux des quatre équations principales (Hauteur dominante, Diamètre quadratique moyen, Surface terrière et Volume), mais aussi ceux de toutes les équations d'appoint en amont (Pothier et Savard, 1998). Au cours de nos travaux, nous avons essayé de reproduire l'estimation des paramètres des quatre équations principales de Pothier et Savard (1998) avec les mêmes programmes et les mêmes fichiers de données. Les programmes de régression non linéaire à plusieurs équations n'ont pas convergé. Il semble que cela soit dû à une amélioration des algorithmes de la procédure MODEL du logiciel SAS entre les versions 6 et 8. Cela indique qu'il y a trop de paramètres dans ce système d'équations non linéaires et qu'il serait possible de le simplifier. Exécuter à nouveau le programme qui a permis d'estimer les paramètres des modèles « par courbes » est essentiel pour estimer la matrice de variance-covariance des paramètres et l'erreur de prédiction d'un volume à un âge r étant donné l' IQS_{ess} et l' $IDR_{r,ess}$.

Parmi les sources d'imprécision liées à la modélisation de la croissance des peuplements, les plus susceptibles de biaiser les volumes prédits sont les sources (14) et (11). Celle qui nous empêche d'estimer leur imprécision est la source (16) et celle sur laquelle nous pourrions agir pour réduire cette imprécision est la source (14).

1.2.3 DANS LA SIMULATION DE LA CROISSANCE ET DE LA RÉCOLTE

17) Le choix de la courbe

Ayant estimé un IQS_{ess} et un $IDR_{0,ess}$, on force la courbe de volume de l'essence à passer précisément au point $(\bar{A}_c, V_{0,ess})$ où $\bar{A}_c$ est l'âge moyen actuel des arbres de l'essence et $V_{0,ess}$ est le volume de l'essence dans l'unité de simulation estimé par les inventaires. On suppose ainsi implicitement que la variation due à l'échantillonnage présente dans ce volume estimé est négligeable et que la courbe réelle s'écarte de la courbe prévue par l' IQS_{ess} et l' $IDR_{0,ess}$. Si cette pratique engendre un biais, il est propagé à tous les volumes prédits pour ce peuplement au cours de sa vie. L'effet est commenté à la section A du rapport détaillé.

28

18) La prédiction de l'indice de densité relative en fonction de l'âge du peuplement. (cf. Chapitre 3)

19) La prédiction du volume par essence depuis l'âge actuel jusqu'à la récolte ou la perte du peuplement

Si l'on ne choisit pas « la bonne courbe » à l'âge actuel, les volumes à l'hectare prédits sont biaisés pendant toute la vie du peuplement. Or ces volumes sont

multipliés par la superficie de l'unité de simulation. Quand ils sont sommés sur l'ensemble des unités de simulation du groupe de calcul, rien ne garantit que les biais, s'ils existent, s'annulent. De plus, la variation associée à la prédiction est d'autant plus grande que l'âge de prédiction est loin de l'âge moyen des placettes de cet IQS et de cette densité relative qui ont servi à estimer les paramètres des courbes.

20) L'estimation de l'âge d'exploitabilité (cf. Chapitre 7).

21) L'âge du début et de la fin de la sénescence

Ces âges sont estimés à l'aide des placettes temporaires, mais leur choix dépend en partie du jugement d'un expert.

22) La modélisation des volumes en période de sénescence des peuplements

Ces parties des modèles de croissance ne sont pas des modèles de régression. Des données sur la sénescence font défaut parce que les peuplements sont souvent récoltés avant d'atteindre cet âge ou de le dépasser. Le jugement du modélisateur entre en jeu à cette phase de la simulation.

23) L'estimation de l'âge de bris (cf. Chapitre 7).

Cette estimation dépend en partie du jugement d'un expert.

24) La simulation de la croissance dans les peuplements de moins de 7 m, et après récolte d'une unité de simulation

Dans les deux cas, s'il n'existe pas de données d'inventaire et si les compagnies forestières ont exécuté des suivis dans ces peuplements, l'aménagiste choisit une courbe de croissance en s'appuyant sur les données de ces suivis. En l'absence de suivis et parfois même si de tels suivis existent (p. ex. s'ils indiquent une abondance d'érable à épis), il doit poser des hypothèses au meilleur de sa connaissance. Sans modèles de succession, il est impossible d'estimer l'erreur quadratique moyenne des volumes ainsi prédits. Ce type de peuplement occupe pourtant une assez grande partie du territoire et génère des volumes importants loin sur l'horizon de simulation. (cf. Chapitre 7)

25) Les corrections pour la carie et pour les pertes dues aux perturbations

L'estimation et l'application des taux de pertes par la carie ou les perturbations sont sources potentielles de biais et de variation. Les facteurs de corrections appliqués relèvent du jugement d'experts.

26) L'estimation du volume, récoltable en rendement soutenu, des essences principales objectif du groupe de calcul dans les unités de simulation de ce groupe

Une imprécision est associée à l'identification du minimum parmi les 30 volumes disponibles prédits par période de 5 ans de l'horizon de simulation.

27) L'adéquation entre les récoltes prévues par la simulation et leur exécution sur le terrain

La récolte prévue d'une unité de simulation n'est pas toujours réalisable parce que certains peuplements peuvent être inaccessibles. *Sylva II* ne tient pas compte de ce type de contrainte.

28) Le calcul de la possibilité à tous les 5 ans

La possibilité forestière est recalculée tous les 5 ans. On ne sait pas dans quelle mesure ce nouveau calcul permet de corriger les imprécisions du calcul précédent.

Parmi les sources d'imprécision liées au calcul de la possibilité forestière proprement dit, les plus susceptibles de biaiser l'estimation de la possibilité forestière sont les sources (27), (22) et (25). Celles qui nous empêchent le plus d'estimer son imprécision sont les sources (24), (17) et (25); et celles sur lesquelles nous pourrions agir pour réduire cette imprécision sont les sources (24) et (25).

1.3 DISCUSSION

La complexité du calcul de la possibilité forestière sous sa forme actuelle et sa nature même sont telles qu'il est impossible d'estimer son erreur quadratique moyenne. Il existe deux types de méthodes d'estimation de l'EQM d'un paramètre. Les méthodes classiques, exactes ou approximatives, où une formule mathématique donne explicitement l'estimateur en fonction des observations, et les méthodes de calcul intensif comme le *bootstrap* ou le *jackknife*, lesquelles reposent sur de nombreuses simulations de l'échantillonnage. Les méthodes classiques sont inapplicables au CPF, car les modèles sont trop complexes pour que l'imprécision puisse être estimée au fur et à mesure où elle se propage dans le système. Le chapitre 2 de ce rapport illustre la méthode du *bootstrap* pour un CPF restreint à une partie choisie de l'aire commune 8285B ; ce calcul ne tient compte que de la variabilité associée à l'échantillonnage. Une EQM plus riche de la possibilité forestière pourrait être estimée par la méthode du *bootstrap* si l'on disposait d'estimations des EQM pour les sources de biais ou de variation qui s'y prêtent (Sources 2 à 7 et 12 à 15). En posant des hypothèses minimales sur leur distribution, leur effet pourrait être simulé pour chaque nouvel échantillon *bootstrap*. En plus de la variabilité d'échantillonnage, l'EQM ainsi obtenue refléterait les variations et les biais attribuables aux sources de variation modélisées. Cependant, une grande partie de la variabilité ou du biais d'un CPF est attribuable aux choix du modélisateur (Sources 21 à 23) ou à ceux de l'aménagiste (Sources 24 et

25). En l'absence de modèles de succession, cette partie de l'imprécision d'un CPF ne peut être intégrée dans un calcul d'erreur quadratique moyenne, même par simulation.

Le démographe se base sur des données de recensement et des modèles (taux de natalité, de mortalité et de migration) pour prédire la population humaine d'un pays ou d'une province, mais concrètement, il doit poser certaines hypothèses. Il en va de même d'un CPF. Les inventaires fournissent des données de base, les modèles simulent la croissance du peuplement actuel, et le reste du calcul est constitué essentiellement d'hypothèses, y compris la naissance, la croissance et la récolte ou la perte des peuplements futurs. Il semble donc inévitable qu'une partie de l'évaluation de la variabilité d'un CPF prenne la forme d'une étude de sensibilité. Dans cette perspective, les hypothèses pourraient même être divisées en groupes dont chacun refléterait une tendance particulière. Ainsi, on pourrait imaginer un groupe d'hypothèses « maintien de la tendance actuelle », un groupe « optimiste », un groupe « catastrophe d'ici 100 ans », et ainsi de suite. L'aménagiste calculerait alors plusieurs possibilités forestières reflétant différents scénarios comme aide à la décision dans l'allocation des volumes de bois, comme font les démographes, reconnaissant ainsi que toute prédiction, même à court terme, est entachée d'imprécisions considérables. Si l'aménagiste doit faire plusieurs calculs de possibilité pour chaque allocation des volumes de bois, il devient important que le calcul soit relativement simple, qu'il se fasse rapidement et que la partie de son erreur quadratique moyenne qui peut être estimée le soit tout aussi rapidement. Dans ce contexte, une simplification du calcul de la possibilité paraît essentielle.

L'inventaire forestier repose actuellement sur un échantillon par quotas « jugé adéquat » (*judgment sample*). Des contraintes d'ordre économique et pratique forcent la disposition des virées dans des endroits accessibles où la composition des peuplements forestiers varie rapidement puisqu'une équipe de terrain doit traverser plusieurs strates regroupées dans une même journée de marche en forêt parfois dense. Une certaine représentativité est assurée par la répartition des virées dans plusieurs classes de densité du couvert et dans plusieurs feuillets de la carte. Cependant, l'échantillon n'est pas strictement aléatoire. La méthode de répartition des placettes est telle que les zones de transition entre les peuplements pourraient y être surreprésentées. Les volumes estimés pourraient s'en trouver biaisés, mais aussi, et peut-être surtout, la composition en essences. Pour estimer les volumes à l'aide d'échantillons non probabilistes, comme celui de l'inventaire, il faut poser le postulat que

l'échantillon se comporte comme si les placettes avaient été placées au hasard dans chaque classe de densité et dans chaque feuillet d'une strate regroupée.

L'allocation de 15 placettes par strate regroupée n'est pas optimale. Il existe des techniques pour optimiser la répartition des placettes parmi les strates regroupées d'une unité de sondage en fonction des coûts et de la variance des estimateurs de volume. Il vaudrait la peine d'examiner comment ces techniques peuvent être adaptées aux inventaires.

Le mécanisme de recrutement de placettes appliqué à 20 % du territoire pourrait sans doute être amélioré grâce aux développements récents dans ce domaine. Il existe maintenant des méthodes qui permettent d'estimer une erreur quadratique moyenne qui tient compte de ces imputations (p. ex. méthodes du *cold deck*, du *hot deck*). Les estimateurs pour les petits domaines et les 16 variables qui définissent les strates cartographiques permettraient peut-être de remplacer le système d'imputation actuel par des estimations des volumes des strates regroupées non échantillonnées. Pour cela, il faudrait qu'il y ait un minimum de placettes dans des strates présentement exclues de l'échantillonnage. Former quelques strates regroupées plus hétérogènes dans ce but pourrait être utile.

À l'automne 2003, un mandat a été confié à Statistique Canada afin d'évaluer le plan de sondage de l'inventaire forestier du Québec comme base d'estimation de la biomasse forestière (Reedman, 2004, *cf.* Rapport détaillé). Estimer la biomasse et estimer le volume sont deux opérations très semblables. Le fait que les placettes ne soient pas distribuées au hasard sur le terrain, l'allocation suboptimale de 15 placettes par strate regroupée et la méthode d'imputation ont été identifiés comme les trois lacunes principales des inventaires. Des pistes de solutions étaient aussi offertes.

Il est rare que la sélection d'un échantillon d'envergure ne fasse pas l'objet de compromis, mais il importe que ces derniers soient judicieusement choisis, avec parcimonie, de manière à conserver à l'opération toute sa crédibilité, tant du côté des sciences forestières que des principes fondamentaux de la statistique. Notre examen a permis de déceler qu'à de trop nombreuses occasions, les compromis ont été faits au détriment de la valeur statistique des estimateurs. Les volumes et la composition en essences du territoire forestier estimés par les inventaires sous le plan de sondage actuel sont peut-être de bonnes estimations, mais le plan d'échantillonnage de l'inventaire, la méthode d'imputation

et la méthode d'estimation ne le garantissent pas. Plusieurs méthodes statistiques pourraient fournir des solutions aux problèmes mentionnés ; elles exigent cependant d'être étudiées, essayées et comparées.

Le Comité a examiné sommairement ce qui se fait ailleurs au Canada, aux États-Unis et dans le monde, en matière d'inventaire forestier et de calcul de la possibilité forestière. Le Québec ne semble pas en retard dans ces domaines. Cependant, les détails sur les méthodes d'inventaire et sur celles du calcul de la possibilité forestière appliquées ailleurs dans le monde ne se trouvent pas nécessairement dans des documents publics et leur recherche exigera plus de temps que ce que le Comité pouvait consacrer à cet aspect de son mandat.

Le calcul de la possibilité forestière tel qu'il est effectué au Québec ne tient pas compte de certains aspects importants de la dynamique et de l'exploitation forestières, comme les contraintes économiques et spatiales liées à la récolte de bois. Lorsqu'une unité de simulation est récoltée dans la simulation, ce sont des pans du territoire vraisemblablement disjoints ou qu'aucune route ne permet d'atteindre qui sont « coupés ». Les récoltes simulées ne sont peut-être réalisables que partiellement sur le terrain. On ne connaît ni l'ampleur de la disparité entre la simulation et la pratique, ni celle de son impact sur la possibilité forestière.

Lorsque les volumes récoltables sont prédits pour des périodes lointaines, par exemple, de 90 à 150 ans, ce sont les volumes issus des peuplements de moins de 7 m actuels et des retours issus des peuplements récoltés dès les premières années de la simulation qui constituent le volume récoltable. Les données d'inventaire ont un impact sur ces prédictions par le truchement des modèles. Le choix du modèle, lui, dépend presque uniquement de l'aménagiste. Ces choix sont certes ceux d'un expert, mais ils relèvent nécessairement, au moins en partie, du libre arbitre de ce dernier. En cela même, il est impossible d'associer une mesure d'imprécision aux volumes prédits. Dans le calcul de la possibilité forestière, le poids des hypothèses sur les strates de retour ou les strates émergentes après perturbation est donc considérable. Il l'est d'autant plus que les peuplements actuels contiennent davantage de stock mûr qui sera récolté ou perdu au début de l'horizon de simulation. Des suivis devraient être réalisés afin d'estimer la composition en essences du peuplement futur et l'âge de la régénération. À plus long terme, des modèles de succession seraient essentiels pour estimer les volumes à maturité de ces peuplements et l'erreur quadratique moyenne de ces estimations.

Le modèle « par courbes » est constitué de plusieurs équations non linéaires très complexes. Ce système d'équations dépend de quelques dizaines de paramètres. Le modèle « par taux » dépend de centaines de paramètres. Les deux modèles comportent des raffinements qui ne sont pas justifiés étant donné les imprécisions des inventaires qui permettent de les appliquer au début d'une simulation, et celles qui s'ajoutent lorsque s'effectue le reste du calcul de possibilité sur tout l'horizon de simulation. La plupart des paramètres du modèle « par courbes » ont été estimés à l'aide des données des placettes temporaires de peuplements purs des trois cycles d'inventaire disponibles. Seuls les paramètres des modèles ancillaires de prédiction de l'IDR ont été estimés à l'aide des données des placettes permanentes. Les paramètres du modèle « par taux » ont été estimés à l'aide des données des placettes permanentes. Le morcellement des données des placettes permanentes fait en sorte que certains de ces taux sont estimés à l'aide d'un très petit nombre de données, notamment les taux de passage à des classes de dhp élevé où les arbres ont les plus gros volumes. De tels taux sont sujets à une très grande variance.

Au cours de leurs travaux, les membres du Comité ont remarqué que la documentation concernant certaines procédures était excellente (p. ex. la description des méthodes de mesure des placettes temporaires et permanentes, celle des tables de production), mais qu'elle était éparse, difficile d'accès ou inexistante pour d'autres (p. ex. modèle par taux, la méthode de calcul de la possibilité pour une aire commune dans *Sylva II*). Une grande partie du travail a donc consisté à comprendre ce qu'était la possibilité forestière et toutes les étapes de son calcul et à rechercher l'information pertinente. Soulignons cependant que le personnel des diverses directions du Ministère a fourni une aide précieuse à toutes les étapes de ce travail. L'existence d'une documentation complète sur les procédures utilisées assurerait la pérennité de ces informations au sein de l'organisation et permettrait leur examen par les pairs. Un tel examen ne pourrait qu'en rehausser la crédibilité.

1.4 CONCLUSION

Dans sa forme actuelle, le calcul de la possibilité forestière est un exercice lourd et complexe où les sources de biais et de variation sont nombreuses. Si les calculs de possibilité forestière doivent déterminer l'allocation des ressources pour plusieurs années à venir, il est important que les inventaires forestiers puissent garantir la qualité des estimateurs des intrants des modèles et que ces derniers soient réalistes sans être plus complexes que ne le

justifie l'information disponible. Un CPF ne dépend que partiellement des données d'inventaire. Une part considérable des volumes simulés repose sur des choix d'experts susceptibles d'engendrer des biais et des variations. Tant qu'il demeurera impossible d'estimer l'erreur de prédiction des successions forestières après coupe et des peuplements de moins de 7 m, des études de sensibilité aux hypothèses qui relèvent de l'aménagiste demeureront indispensables à tout CPF, ce qui requiert une méthode de calcul rapide.

PROPAGATION DE L'IMPRÉCISION DE L'INVENTAIRE DANS LE CALCUL DE LA POSSIBILITÉ FORESTIÈRE

Une estimation partielle de l'erreur quadratique moyenne associée à l'estimation de la possibilité forestière de l'aire commune 8285B a été obtenue par la méthode du *bootstrap*. Deux groupes de calcul ont été formés de strates forestières productives présentes dans l'aire commune 8285B : un groupe SEPM (Sapin, Épinette, Pin, Mélèze) et un groupe MXPET (Mélangé, Résineux, Peuplier faux-tremble). Parmi les unités de simulation du premier groupe de calcul issues de strates regroupées où le nombre de placettes disponibles était supérieur ou égal à 7, les 91 plus grandes (en superficie) ont été sélectionnées ; dans le second groupe de calcul, 22 unités de simulation ont été choisies selon les mêmes critères. Dans l'aire commune 8285B, ces 113 unités de simulation couvraient 35 % de la superficie forestière productive totale. Dans l'unité de sondage U28A, ces strates contenaient 117 placettes établies, 700 placettes actualisées et 1 919 placettes recrutées, pour un total de 2 736 placettes, soit 72 % des 163 placettes établies dans des strates de l'unité de sondage U28A qui se trouvent dans l'aire commune 8285B, 80 % des 874 placettes actualisées de ces strates, 42 % des 3 569 placettes recrutées de ces strates, et 59 % des 4 606 placettes de tout type de ces strates. Que les placettes soient établies, actualisées ou recrutées, les volumes par placette et par essence sont traités comme s'ils étaient mesurés sans erreur.

La technique du *bootstrap* consiste à estimer la distribution d'échantillonnage d'un estimateur par rééchantillonnage avec *remise* de l'échantillon effectivement choisi, et à estimer le paramètre, son erreur standard, son biais, son erreur quadratique moyenne et son intervalle de confiance à 95 % à l'aide de cette distribution empirique. Dans l'échantillon de 2 736 placettes représentatif des plus grandes superficies forestières productives de l'aire commune 8285B, un nouvel échantillon de placettes de même structure et de même taille que l'échantillon d'origine a été choisi au hasard avec remise de telle sorte qu'une placette de l'échantillon d'origine pouvait apparaître plusieurs fois dans le nouvel échantillon et certaines autres, pas du tout. Cet échantillonnage a été répété 100 fois. Chaque échantillon *bootstrap* ainsi formé contenait donc n_{jk} placettes parmi les n_{jk} que contenait la strate k du groupe de calcul j , où $j = \text{MXPET}, \text{SEPM}$, $k = 1, \dots, N_j$, et $N_{\text{MXPET}} = 22$, $N_{\text{SEPM}} = 91$. Un ingénieur forestier a ensuite estimé les possibilités forestières des arbres de 14 cm et plus de dhp (m^3/an) pour chaque échantillon *bootstrap*, une pour le

groupe SEPM et une autre pour le groupe MXPET. Notons $\hat{\theta}_i$ la possibilité forestière pour un groupe d'essences principales objectif estimée à l'aide du $i^{\text{ème}}$ échantillon *bootstrap*, $i = 1, \dots, 100$, et $\hat{\theta}$, la possibilité forestière pour le même groupe d'essences calculée pour l'échantillon d'origine composé de placettes distinctes. Pour chaque groupe de calcul, l'estimateur *bootstrap* de la possibilité forestière est donné par :

$$\bar{\hat{\theta}} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} \hat{\theta}_i \quad (1)$$

et celui de son erreur standard, par :

$$s(\bar{\hat{\theta}}) = \sqrt{\frac{1}{(100-1)} \sum_{i=1}^{100} (\hat{\theta}_i - \bar{\hat{\theta}})^2}. \quad (2)$$

L'erreur standard est une déviation moyenne (en plus ou en moins) des estimations *bootstrap* $\hat{\theta}_i$ autour de leur moyenne $\bar{\hat{\theta}}$. Le biais de l'estimateur $\hat{\theta}$ est estimé par :

$$\widehat{\text{Biais}}(\hat{\theta}) = \bar{\hat{\theta}} - \hat{\theta}. \quad (3)$$

Le biais relatif de $\hat{\theta}$ est estimé par :

$$\frac{\bar{\hat{\theta}} - \hat{\theta}}{\hat{\theta}} 100. \quad (4)$$

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, par :

$$\widehat{\text{REQM}}(\hat{\theta}) = \sqrt{\text{EQM}(\hat{\theta})} = \sqrt{[\widehat{\text{Biais}}(\hat{\theta})]^2 + [s(\bar{\hat{\theta}})]^2}. \quad (5)$$

L'intervalle de confiance à 95 % pour le paramètre θ est estimé par :

$$\bar{\hat{\theta}} \pm 1,96 s(\bar{\hat{\theta}}). \quad (6)$$

Ce type d'intervalle, appelé intervalle standard (Manly, 1997, § 3.4), est valide si

- a) la distribution de $\hat{\theta}$ est approximativement normale,
- b) $\hat{\theta}$ est sans biais de telle sorte que $\bar{\hat{\theta}} \cong \hat{\theta}$, et
- c) le rééchantillonnage *bootstrap* donne une bonne approximation de l'écart type de la distribution d'échantillonnage de $\hat{\theta}$.

La possibilité forestière du groupe SEPM pour l'échantillon d'origine est estimée par $\hat{\theta} = 58\,400 \text{ m}^3/\text{an}$. L'estimation *bootstrap* est : $\bar{\hat{\theta}} = 56\,724 \text{ m}^3/\text{an}$.

L'erreur standard de $\bar{\hat{\theta}}$ est estimée à 1867 m³/an. Le biais, par $\bar{\hat{\theta}} - \hat{\theta} = -1676$ m³/an, soit un biais relatif de -2,9 % par rapport à $\hat{\theta}$. La possibilité du groupe SEPM est donc surestimée. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est estimée à $\widehat{REQM} = 2\,509$ m³/an. Cette estimation constitue une borne inférieure en ce sens qu'une estimation qui tiendrait compte de toutes les sources d'imprécision et de biais serait nécessairement plus grande. Sous le postulat que le biais est négligeable, les bornes de l'intervalle de confiance standard à 95 % sont estimées par l'équation (6) : $56\,724 \text{ m}^3/\text{an} \pm 1,96(1867,27 \text{ m}^3/\text{an}) = 56\,724 \pm 3\,660 = (53\,064 \text{ m}^3/\text{an}, 60\,384 \text{ m}^3/\text{an})$; la demi-largeur de l'intervalle représente 6,3 % de $\hat{\theta}$. L'intervalle de confiance estime les bornes entre lesquelles l'estimation de la possibilité se trouvera 19 fois sur 20 si la méthode d'estimation n'est pas biaisée et que l'on répète l'échantillonnage, y compris la sélection et la mesure des placettes sur le terrain, un grand nombre de fois.

Pour le groupe MXPET, la possibilité forestière selon l'échantillon d'origine est estimée par $\hat{\theta} = 4\,060$ m³/an. L'estimation *bootstrap* est : $\bar{\hat{\theta}} = 4\,378$ m³/an. L'erreur standard de $\bar{\hat{\theta}}$ est estimée à 592 m³/an. Le biais, par $\bar{\hat{\theta}} - \hat{\theta} = 318$ m³/an, soit un biais relatif de 7,8 % par rapport à $\hat{\theta}$. La possibilité du groupe MXPET est donc sous-estimée. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne est estimée à $\widehat{REQM} = 672$ m³/an. Sous le postulat que le biais est négligeable, les bornes de l'intervalle de confiance standard à 95 % sont estimées par $4\,378 \text{ m}^3/\text{an} \pm 1,96(592,273 \text{ m}^3/\text{an}) = 4\,378 \pm 1\,161 = (3\,217 \text{ m}^3/\text{an}, 5\,539 \text{ m}^3/\text{an})$; la demi-largeur de l'intervalle représente 29 % de $\hat{\theta}$.

Dans chaque groupe de calcul, la distribution empirique des 100 possibilités obtenues par *bootstrap* ne dévie pas de celle d'une loi normale. Si les distributions des $\hat{\theta}_i$ sont symétriques, comme cela semble être le cas, 100 échantillons *bootstrap* suffisent pour estimer les moyennes et leurs erreurs standard (Manly, 1997, p. 35). Si, de plus, $\hat{\theta}$ est sans biais, les limites des intervalles de confiance standard à 95 % sont valides. Examinons la question des biais. Lorsque l'ingénieur forestier a calculé la possibilité forestière pour chaque échantillon *bootstrap*, il a parfois dû modifier le choix de courbe de croissance d'une essence proposé par son logiciel, car celui-ci donnait une courbe invraisemblable, dans certains cas. Le calcul pour l'échantillon complet composé de placettes distinctes a été fait quelques semaines après les calculs pour les échantillons *bootstrap*. Il se peut que les critères de sélection des courbes appliqués par l'ingénieur forestier ne soient pas demeurés exactement les mêmes entre les échantillons *bootstrap* et l'échantillon complet. Ceci expliquerait une

partie des biais. Ces derniers reflètent aussi, mais en partie seulement, le biais de $\hat{\theta}$ induit par la non-linéarité du mécanisme de calcul de la possibilité forestière, notamment celui des modèles de croissance (Pothier et Savard, 1998 ; voir aussi Chapitre 3 de ce rapport). Efron et Tibshirani (1998, p. 128) considèrent qu'un biais dont le rapport à l'erreur standard de l'estimateur est supérieur à 0,25 n'est pas négligeable. Ici, ce rapport est estimé à $|-1676|/1867 = 0,90$ pour le groupe SEPM et 0,54 pour le groupe MXPET. Dans les deux cas, il est supérieur à 0,25. Les intervalles de confiance standard ne seraient donc pas strictement valides. Il existe d'autres méthodes de calcul d'intervalles de confiance *bootstrap* qui tiennent compte du biais, notamment. Mais parce qu'elles reposent sur l'estimation de percentiles loin dans les ailes de la distribution des $\hat{\theta}_i$, ces méthodes exigent au moins 1000 ou 2 000 échantillons *bootstrap* (Efron et Tibshirani, 1998; Manly, 1997). Or chaque échantillon *bootstrap* requiert un CPF par un ingénieur forestier. Dès lors, on comprendra qu'il était impossible de faire cet exercice dans le cadre des travaux du Comité.

Cette application de la méthode du *bootstrap* capte l'imprécision d'échantillonnage des inventaires forestiers et ses répercussions sur la suite des calculs, essentiellement. Cette imprécision est plus grande pour les essences MXPET, où il y avait moins d'unités de simulation et donc moins de placettes, que pour les essences SEPM. L'exercice incorpore le fait que certaines strates peuvent être classées dans l'un ou l'autre des deux groupes de calcul selon le volume estimé de chaque essence et la composition de l'échantillon. Il ne tient compte que très partiellement ou pas du tout des variations ou des biais induits par les tarifs de cubage généraux et les tarifs locaux, l'actualisation des placettes, le recrutement et toutes les imprécisions dues à la modélisation et à la prédiction de la croissance. Pour simuler les imprécisions de l'ensemble du calcul, il aurait fallu en estimer les composantes et reprogrammer *Sylva II* en y simulant leurs effets. Le Ministère pourrait choisir d'entreprendre ce travail.

Le calcul de la possibilité forestière sous sa forme actuelle est trop complexe pour que l'on puisse estimer son erreur quadratique moyenne par des méthodes analytiques classiques, qu'elles soient exactes (Cochran, 1977) ou approximatives (Wolter, 1985). La méthode du développement en série de Taylor, qui a été suggérée à la Vérificatrice générale, ne s'applique que si l'estimateur dont on cherche à estimer la variance s'exprime comme une fonction explicite et différentiable des observations. D'autre part, les méthodes qui reposent sur des calculs intensifs ne seront opérationnelles que lorsque la prise de décision dans *Sylva II* sera automatisée.

L'erreur d'échantillonnage contribue sans doute de façon substantielle à l'erreur quadratique moyenne de la possibilité forestière, mais il est impossible de dire quel est son ordre de grandeur par rapport aux autres sources d'imprécision telles que la modélisation de la croissance des peuplements de moins de 7 m et celle des retours après coupe, pour ne citer que celles-là.

ERREUR DE PRÉDICTION ASSOCIÉE AU MODÈLE DE CROISSANCE « PAR COURBES »

Le modèle de croissance « par courbes » se rapporte à une série de modèles mathématiques calculant l'évolution de la production forestière pour les peuplements purs et de structure généralement régulière. Ces modèles sont utilisés pour estimer l'évolution du volume marchand d'une très grande proportion des superficies forestières productives du Québec (environ 90 %). Le modèle de Pothier & Savard (1998), le plus utilisé, comporte un système d'équations ; il repose sur trois variables explicatives : l'âge, l'indice de qualité de station (IQS) et l'indice de densité relative (IDR). Le présent chapitre décrit les résultats d'une analyse des erreurs associées à ce modèle de prédiction.

L'usage veut que la détermination, sur le terrain, de l'indice de qualité de station (IQS) des strates de 7 m et moins se fasse selon des approches variées. Sachant que la détermination de l'IQS sert ensuite à la sélection de la table de rendement (donc, influence grandement la production en volume), on s'attend à une certaine convergence des résultats obtenus avec ces diverses méthodes, sinon la prédiction du rendement ne serait pas juste. Le présent chapitre comporte donc une évaluation de l'erreur associée à deux méthodes d'évaluation de l'IQS.

3.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Ce modèle a été évalué à partir du réseau de placettes-échantillons permanentes du Ministère, qui en compte 12 000 réparties sur le territoire forestier productif et dont le suivi peut atteindre 30 ans. Une validation des données des trois inventaires décennaux et certaines contraintes méthodologiques ont conduit à retenir 1 821 placettes-échantillons de 400 m². Notre analyse permet de répondre plus particulièrement à quatre questions, soit :

- Quelle est l'erreur de prédiction des modèles ?
- Quelle est l'erreur due aux arrondissements de valeurs d'âge, d'IQS et d'IDR ?
- Quelle est l'erreur attribuable à une compilation par strate plutôt que par placette (cette dernière approche représentant celle utilisée pour construire les modèles) ?
- Quelle est l'erreur attribuable à l'utilisation des modèles conçus pour des peuplements purs, pour des peuplements irréguliers ou de composition mixte ?

3.1.1 ERREUR DE PRÉDICTION DES MODÈLES

Les mesures répétées dans le temps du réseau des placettes-échantillons permanentes ont permis de soustraire le volume prédit par les modèles du volume observé à chacune des mesures, ce qui correspond à l'erreur de prédiction. Le réseau des placettes-échantillons permanentes a l'avantage de permettre d'estimer l'erreur quand elle se propage dans le temps, mais pour une période maximale de 30 ans. Le biais est la moyenne des erreurs de prédiction tandis que la racine carrée de la somme des carrés des erreurs de prédiction divisé par le nombre de placettes correspond à l'erreur quadratique moyenne de prédiction des modèles. Cette erreur contient le biais et la variance ; pour simplifier, nous utilisons plus loin l'expression « imprécision de la prédiction » comme étant synonyme de l'erreur quadratique moyenne. La procédure statistique utilisée est un modèle linéaire tenant compte de l'autocorrélation entre les mesures répétées d'une même placette. La démarche analytique retenue permet de vérifier si un biais est nul et d'expliquer les erreurs de prédiction de même que leur importance relative, de manière à identifier, le cas échéant, les pistes d'amélioration du modèle.

3.1.2 ERREUR DUE AUX ARRONDISSEMENTS DES VALEURS D'ÂGE, D'IQS ET D'IDR

En complément à l'analyse précédente et selon une approche méthodologique similaire, nous avons évalué si le fait d'arrondir les valeurs d'âge, d'IQS et d'IDR aux valeurs nominales de classes prédéterminées (ceci en raison d'une contrainte imposée par *Sylva II*) produit une erreur de prédiction du volume marchand supérieure à celle issue de l'utilisation des valeurs exactes d'âge, d'IQS et d'IDR

3.1.3 ERREUR DUE À LA COMPILATION PAR STRATE, PLUTÔT QUE PAR PLACETTE

Un modèle a aussi été construit afin de déterminer s'il se produit une erreur sur le volume prédit en raison d'une compilation des inventaires par strate et d'une simulation correspondante dans *Sylva II*, par rapport au fait de simuler la croissance de chaque placette. La démarche analytique retenue permet de vérifier si la différence de volume prédit par les deux méthodes est nulle et, dans le cas contraire, d'expliquer cette différence.

3.1.4 ERREUR ATTRIBUABLE À L'UTILISATION DES MODÈLES DE PEUPELEMENTS PURS ET RÉGULIERS, POUR DES PEUPELEMENTS IRRÉGULIERS OU DE COMPOSITION MIXTE

Par ailleurs, des indices ont été construits afin de vérifier si l'utilisation des modèles actuels, qui sont élaborés pour des peuplements purs et réguliers, s'applique pour des peuplements de composition mixte ou irréguliers (pour ce qui est de la structure diamétrale).

3.1.5 PRÉCISION DE L'ESTIMATION DE L'IQS SELON DEUX MÉTHODES (CROISSANCE INTERNODALE ET ACCROISSEMENT QUINQUENNAL)

Il a été possible d'évaluer la précision de deux différentes méthodes d'estimation de l'IQS par le biais d'analyses de tiges, lesquelles permettent d'estimer avec précision la hauteur réelle atteinte à un âge de référence connu. De la sorte, on a pu comparer la précision de la méthode de croissance internodale à la méthode d'accroissement quinquennal pour les jeunes strates d'épinette noire, de pin gris et de sapin baumier, après qu'un travail particulier de mise à niveau des âges de référence ait été réalisé pour les fins de la comparaison. L'erreur d'estimation a été obtenue par la différence entre la valeur calculée par chacune des méthodes et la valeur d'IQS obtenue directement à partir de la hauteur atteinte à 50 ans des arbres de référence (analyses de tiges).

3.2 RÉSULTATS

3.2.1 ERREUR DE PRÉDICTION DES MODÈLES

Il appert que le modèle comporte un biais, considéré comme négligeable pour un horizon de prédiction court, mais qui augmente avec le temps. Une augmentation de l'imprécision (l'erreur quadratique moyenne) de la prédiction dans le temps a aussi été observée. Pour un horizon de prédiction de 5 ans, le biais est de -1,3 m³/ha (surestimation) et considéré comme nul, atteint 3,0 m³/ha pour un horizon de 15 ans et 5,4 m³/ha pour un horizon de 25 ans, en sous-estimation. L'imprécision augmente aussi avec l'horizon de prédiction; elle s'établit à 14,9 m³/ha à 5 ans, 17,4 m³/ha à 15 ans et atteint 28,9 m³/ha à 25 ans.

La première variable responsable du biais observé et de l'erreur de prédiction du volume marchand provient de la difficulté d'obtenir un IDR qui soit juste ;

une surestimation de la valeur de l'IDR s'accompagne d'une surestimation du volume marchand et vice versa. Toutefois, en ce qui concerne les pessières noires, l'erreur de l'IDR explique une partie moins importante de l'erreur de prédiction du volume, comparativement aux autres types de peuplement. La difficulté de capter correctement la mortalité naturelle et le recrutement de nouveaux arbres lors de l'inventaire explique une part probablement importante des erreurs observées. La deuxième variable permettant d'expliquer l'erreur de prédiction du volume marchand est l'erreur de l'IQS. Cette erreur peut provenir de deux sources : des erreurs d'inventaire ou des erreurs relatives à la modélisation de la hauteur dominante du peuplement en fonction de son âge.

Les résultats ci-dessus découlent d'analyses à l'échelle de la placette. Dans chaque strate qui fait l'objet d'une simulation de croissance dans le calcul de possibilité forestière, il y a généralement au moins 15 placettes. À l'intérieur d'une strate regroupée, prédire un volume moyen par essence sur plusieurs années pour 15 placettes ou plus réduit substantiellement l'imprécision associée à cette prédiction.

Par contre, l'erreur qui persiste sur le volume prédit dans une strate regroupée pour une essence particulière n'est pas nécessairement compensée par l'erreur sur le volume de cette essence prédit dans d'autres strates regroupées, car l'estimation du volume par essence par strate dépend de la superficie de cette strate : c'est le volume moyen à l'hectare multiplié par la superficie. Si, dans une aire commune, il existe une très grande strate dont le volume marchand est surestimé (ou sous-estimé), sommer sur de nombreuses strates ne fera pas nécessairement disparaître l'effet de la surestimation (ou de la sous-estimation) du volume de la grande strate sur la possibilité forestière, bien que la sommation s'opère sur de nombreuses strates où le volume estimé est tantôt plus élevé que le volume réel, tantôt plus faible.

3.2.2 ERREUR DUE AUX ARRONDISSEMENTS DES VALEURS D'ÂGE, D'IQS ET D'IDR

46

On constate que les biais moyens calculés à partir des deux méthodes d'estimation du volume marchand sont très semblables, voire même que l'utilisation des valeurs exactes d'IQS et d'IDR produit un biais légèrement supérieur. Le fait d'arrondir ces valeurs aux valeurs nominales de classes prédéterminées ne génère pas une imprécision de la prédiction du volume marchand supérieure à celle issue de l'utilisation des valeurs exactes.

3.2.3 ERREUR DUE À LA COMPILATION DES INVENTAIRES PAR STRATE, PLUTÔT QUE PAR PLACETTE

L'analyse montre qu'une compilation des inventaires par strate plutôt que par placette entraîne un biais en surestimation de 1,0 m³/ha et une imprécision de prédiction de 4,7 m³/ha. Ce biais peut être réduit à 0,2 m³/ha par le recours à une technique recommandée (voir rapport détaillé) pour ajuster le volume d'une placette à celui d'une courbe de référence.

3.2.4 ERREUR ATTRIBUABLE À L'UTILISATION DES MODÈLES DE PEUPEMENTS PURS ET RÉGULIERS, POUR DES PEUPEMENTS IRRÉGULIERS OU DE COMPOSITION MIXTE

La méthode actuellement utilisée pour prédire l'évolution du volume marchand d'un peuplement mixte à partir de modèles construits pour des peuplements purs, ne produit que des erreurs mineures ; celles-ci sont masquées à l'intérieur d'autres variables, dont l'IDR qui a été discuté précédemment. Cette constatation s'applique aussi à la structure des peuplements que les analyses n'ont pas permis d'identifier comme étant une variable explicative de l'imprécision, mais dont l'effet peut être confondu avec celui de l'IDR.

3.2.5 PRÉCISION DE L'ESTIMATION DE L'IQS SELON DEUX MÉTHODES (CROISSANCE INTERNODALE ET ACCROISSEMENT QUINQUENNAL)

Pour l'épinette noire et le sapin baumier, les modèles de croissance internodale et la méthode d'accroissement quinquennal montrent des patrons fort différents d'évolution de l'erreur d'estimation. En effet, la méthode internodale a tendance à légèrement surestimer l'IQS tandis que la méthode d'accroissement quinquennal le sous-estime de façon très marquée. De plus, la précision de la méthode internodale augmente graduellement avec l'âge des arbres pour atteindre 2 cm d'erreur à 25 ans, alors que la précision de la méthode de l'accroissement quinquennal diminue de façon importante pour atteindre une sous-estimation de 3,0 m et 2,0 m à 25 ans, pour respectivement l'épinette noire et de sapin baumier. Dans le cas du pin gris, la méthode internodale fournit une très bonne précision en tout temps alors que l'utilisation de la méthode de l'accroissement quinquennal entraîne une importante sous-estimation de l'IQS, peu importe l'âge (entre -2,6 à -1,7 m).

3.3 DISCUSSION

Pour des horizons de prédiction de 15 à 25 ans, les modèles « par courbes » tendent à sous-estimer faiblement le volume marchand. Ce premier constat rassure quant à la contribution des modèles au calcul de la possibilité. Par contre, l'imprécision de la prédiction est relativement importante. En valeur absolue, le biais, comme l'imprécision, s'accroît avec l'horizon de prédiction, mais il n'est pas possible de l'évaluer au-delà d'un horizon de simulation de 25 ans, même si les projections de possibilité forestière se font sur une période beaucoup plus longue. Par conséquent, plus l'horizon de prédiction augmente, plus l'imprécision s'accroît, ce qui est moins rassurant quant au calcul de la possibilité, ceci, en dépit de l'effet compensatoire dont nous avons discuté précédemment. Ce fait est principalement attribuable à la difficulté d'obtenir un IDR précis, lequel pourrait d'ailleurs être amélioré en augmentant la taille de la sous-placette utilisée pour le dénombrement des gaules, de même qu'en bonifiant le modèle de prédiction de l'IDR. D'autre part, comme l'exercice actuel n'a pas permis d'évaluer de façon analytique l'erreur de prédiction, de futurs modèles moins complexes devraient en tenir compte.

En ce qui concerne les jeunes strates, les modèles de croissance internodale s'avèrent beaucoup plus précis pour estimer l'IQS (leur précision s'améliore d'ailleurs dans le temps) que les modèles basés sur l'accroissement quinquennal en hauteur. L'utilisation des modèles de croissance internodale est donc recommandée pour l'avenir étant donné la faible erreur d'estimation associée à ces derniers.

3.4 RECOMMANDATIONS

Deux recommandations se dégagent des analyses effectuées ; elles visent à améliorer la justesse des prédictions de l'évolution du volume marchand des forêts québécoises :

- les données récoltées au cours des inventaires forestiers doivent prioritairement répondre aux besoins des calculs de possibilité forestière (p. ex. mieux capter la mortalité et le recrutement) ;
- les principes de modélisation de la production forestière doivent être révisés dans le but d'accroître leur pouvoir prédictif tout en conservant une structure simple.

ERREUR DE PRÉDICTION ASSOCIÉE AU MODÈLE DE CROISSANCE PAR « TAUX DE PASSAGE »

Le modèle de croissance par « taux de passage » est utilisé pour le calcul de la possibilité forestière des forêts naturelles soumises à un aménagement par jardinage, essentiellement les forêts dominées par les feuillus tolérants à l'ombre. L'utilisation du modèle « par taux » requiert de caractériser les peuplements forestiers en recourant à la distribution des arbres par essence et selon les différentes classes de dhp ; le modèle permet ensuite de les faire évoluer au cours d'une période de temps donnée. La simulation qui permet de visualiser l'évolution des tiges est réalisée à l'aide de matrices de taux de passage. Ces matrices comportent actuellement deux types de taux correspondant à deux éléments de la croissance de chacune des essences qui composent le peuplement : l'accroissement et la mortalité. Une troisième composante, le recrutement, n'est actuellement pas modélisée. Par ailleurs, la survie plus le recrutement moins la mortalité fournissent l'accroissement net. Le volume de bois exploitable résulte de l'ajout de l'accroissement net au volume de bois existant au début de la période. Le présent chapitre décrit les résultats d'une analyse des erreurs associées à ce modèle de prédiction.

4.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

À l'instar de l'analyse effectuée pour le modèle « par courbes », celle du modèle « par taux » a été faite à partir du réseau de placettes permanentes du Ministère. Ce réseau compte environ 12 000 placettes réparties sur le territoire et leur suivi peut atteindre 30 ans. Une validation des trois inventaires décennaux et certaines contraintes méthodologiques ont mené à retenir 976 placettes échantillons pour les fins de la présente analyse. Puisque le modèle « par taux » est utilisé pour prédire l'accroissement net, notre analyse a permis de répondre plus particulièrement aux trois questions suivantes :

- Quels sont les impacts des erreurs relatives aux trois composantes de la croissance sur l'erreur de l'accroissement net annuel prédit ?
- Comment le volume initial du peuplement affecte-t-il l'erreur de l'accroissement net annuel prédit, en tenant compte des essences qui composent le peuplement ?
- Comment l'erreur sur le volume marchand net se propage-t-elle sur l'horizon de prédiction ?

Les mesures répétées dans le temps du réseau des placettes échantillons permanentes ont permis de comparer l'accroissement net prédit par le modèle à l'accroissement net observé, ce qui correspond à l'erreur de prédiction du modèle. Idéalement, un modèle de prédiction doit être validé par un ensemble de données indépendant de celui utilisé pour sa construction. Néanmoins, nous avons pallié cette difficulté en utilisant un petit ensemble de 307 placettes permanentes indépendantes pour illustrer la similarité entre les erreurs calculées sur le grand ensemble et celles calculées sur ce petit ensemble.

Une première régression qui prend en compte l'autocorrélation entre les mesures répétées sur une même placette a été utilisée pour quantifier l'impact des erreurs relatives aux composantes de la croissance sur l'erreur de l'accroissement net annuel. Une seconde régression a permis de déterminer le biais du modèle « par taux » selon diverses variables de peuplement, ceci dans le but d'identifier, au besoin, les pistes d'amélioration du modèle.

4.2 RÉSULTATS

L'analyse démontre que l'erreur de prédiction de l'accroissement net annuel s'explique presque essentiellement (à 71 %) par l'erreur de prédiction de la mortalité. L'accroissement net est d'autant surestimé que la mortalité est sous-estimée.

Le modèle « par taux » est biaisé et, pour la majorité des peuplements, le volume initial indique le sens du biais. Lorsque le volume initial du peuplement est moyen ($150 \text{ m}^3/\text{ha}$), le biais est nul et l'imprécision (l'erreur quadratique moyenne) de la prédiction est de $2,4 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$. Lorsque le volume initial est faible ($75 \text{ m}^3/\text{ha}$) ou élevé ($225 \text{ m}^3/\text{ha}$), le modèle est biaisé, respectivement en sous-estimation de l'accroissement net de $1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ et en surestimation de l'accroissement net de $1,2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$. L'imprécision est de $2,0 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ et $4,6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ pour les placettes à faible et fort volume, respectivement. Quelques types de peuplement ont toutefois des biais selon le volume initial marchand différents des autres peuplements. Ainsi, le biais de l'accroissement net est inversé pour les peuplements de pin blanc et de pin rouge, c'est-à-dire qu'il diminue avec une augmentation du volume initial (biais de 2,15, 1,08 et $0,01 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$ pour des volumes initiaux de respectivement 75, 150 et $225 \text{ m}^3/\text{ha}$).

L'analyse démontre également que le biais augmente avec l'horizon de prédiction. Par exemple, la sous-estimation du volume de bois exploitable dans

les placettes à faible volume passe de 3,9 m³/ha, pour un horizon de 5 ans, à 15,3 m³/ha pour un horizon de 30 ans. Pour les peuplements à fort volume, la surestimation passe de 8,8 m³/ha, pour un horizon de 5 ans, à 32,9 m³/ha à 30 ans. Tous volumes confondus, l'imprécision passe de 18,5 m³/ha à 5 ans, à 54,4 m³/ha à 30 ans. Cette analyse permet aussi de vérifier l'additivité des erreurs de prédiction dans le temps. Par exemple, le volume prédit à 15 ans est le résultat de l'application des taux de passage de 10 ans, suivi des taux de passage de 5 ans ; le volume prédit à 20 ans est le résultat de deux applications des taux de 10 ans. Pour ce faire, un modèle expliquant l'erreur de prédiction en fonction du temps est utilisé. Les résultats indiquent qu'il y a additivité des erreurs ; par exemple, celle sur un horizon de 20 ans est à peu près deux fois celle d'un horizon de 10 ans.

Ces estimations des erreurs de prédiction se rapportent à des placettes de 400 m². Lorsque la production en volume d'une essence d'une strate regroupée est prédite à long terme, la distribution des dhp est estimée à l'aide des arbres d'au moins 15 placettes et non avec ceux d'une seule. Cette distribution est donc mieux estimée que lorsque l'on ne tient compte que d'une placette à la fois. Ainsi, lorsque l'on applique le modèle « par taux » à une essence donnée d'une strate regroupée, l'imprécision dont il est question ici se trouve réduite du fait que la distribution des diamètres est alors mieux évaluée.

Les résultats obtenus avec un ensemble de données indépendant (le petit ensemble) sont *grosso modo* similaires à ceux de l'étude principale.

4.3 DISCUSSION

Un modèle de croissance devrait normalement être exempt de biais. De plus, on devrait pouvoir estimer aisément la variance des paramètres et conséquemment les erreurs de prédiction du modèle. Or dans sa forme actuelle, qui doit intégrer plusieurs centaines de paramètres, le modèle s'avère trop complexe et devrait être reconstruit. Sa reconstruction devrait être précédée d'une analyse comparative entre la méthode matricielle et la méthode par équations de régression, cette dernière étant beaucoup plus économe quant au nombre de paramètres à utiliser. Dans sa forme actuelle, le modèle comporte en outre un défaut d'importance, soit le fait qu'il ne prend en compte ni la dynamique du recrutement des gaules dans les classes marchandes de dhp ni les effets des traitements sylvicoles sur cette dynamique. Pour les strates inéquienues, il faut parvenir à un compromis entre un recrutement suffisant et une production maximale. Le premier requiert une ouverture dosée du couvert alors que

le deuxième s'observe lorsque le couvert est fermé. Puisque ni le recrutement, ni la régénération ni les effets des traitements sylvicoles ne sont modélisés dans le modèle « par taux », il est impossible d'évaluer, au moment de calculer la possibilité, si les traitements sylvicoles préconisés permettent de parvenir à ce compromis et avec quelle marge d'imprécision ce compromis est atteint. Actuellement, pour les strates ayant reçu un traitement sylvicole, l'utilisateur doit choisir parmi six taux de passage après traitement disponibles dans *Sylva II*. Ce choix, qui se fait de façon arbitraire, peut entraîner des erreurs potentiellement élevées mais qu'il est impossible d'évaluer correctement au moment où on effectue le calcul de la possibilité.

4.4 RECOMMANDATIONS

- Simplifier et améliorer le modèle de croissance « par taux » pour qu'il soit sans biais et pour permettre l'estimation de son erreur de prédiction.
- Prendre en compte, lors de la mise à jour du modèle, la dynamique du recrutement et les effets des traitements sylvicoles.
- Constituer un groupe de travail sur la modélisation de la mortalité.

ERREUR DE PRÉDICTION ASSOCIÉE AU MODÈLE DE CROISSANCE « DE PLANTATIONS »

Les modèles « de plantations » proviennent des tables de rendement de Bolghari et Bertrand (1984) pour l'épinette blanche et l'épinette de Norvège, de celles de Prégent, Bertrand et Charette (1996) pour l'épinette noire et de Prégent et al. (2004, en préparation) pour le pin gris. Ces quatre espèces représentent près de 99 % des reboisements réalisés au Québec. Les modèles sont basés principalement sur trois variables : l'âge, l'indice de qualité de station (IQS) et la densité de reboisement (et non pas l'indice de densité relative comme dans le cas des forêts naturelles).

5.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Les données qui ont servi à calibrer les modèles proviennent d'un réseau de placettes établies dans les plus vieilles plantations du Québec. Ces placettes ont été installées principalement du début des années '70 jusqu'au milieu des années '80 par la *Direction de la recherche forestière* du Ministère. À partir du milieu des années '90, les placettes des plantations encore existantes ont été mesurées de nouveau. De plus, grâce au *Projet sur la mesure des effets réels des plantations*, le réseau a été étendu à de plus jeunes plantations, situées principalement en forêt boréale. L'objectif principal de ce projet consiste à améliorer le pouvoir de prédiction en remplaçant éventuellement les modèles de peuplements des tables de rendement traditionnelles (étude du rendement à l'aide de placettes temporaires) par des modèles d'arbre indépendants de la distance (étude de la croissance à l'aide de placettes permanentes). Ces données permettront également de couvrir un territoire plus grand et des âges plus avancés que ce qu'il était possible auparavant. Pour l'instant, les données à mesures répétées dans le temps sont encore trop peu nombreuses pour qu'on puisse utiliser cette approche. Toutefois, ces données provenant de 427 « placettes-mesures » ont pu servir, avec la présente analyse, à la validation des modèles actuellement en usage.

Les prises de mesures et les méthodes statistiques s'apparentent à celles utilisées pour les forêts naturelles. S'il existe plusieurs similitudes entre les méthodes utilisées pour ces deux types de peuplement, certaines de leurs caractéristiques diffèrent :

- contrairement au cas des forêts naturelles, peu d'observations étaient disponibles pour l'étalonnage des modèles ;

- les données en bas âge sont fréquentes alors que les âges avancés sont peu représentés (contrainte liée à l'historique des reboisements, particulièrement en zone boréale).

En plus de chercher à quantifier les erreurs de prédiction sur le volume marchand, l'analyse vise à déterminer les facteurs qui les expliquent. Nous présentons également deux exemples où une mauvaise utilisation des tables de rendement peut entraîner des erreurs de prédiction.

Erreur de prédiction des modèles

À l'aide des placettes permanentes à mesures répétées dans le temps, nous avons comparé le volume marchand prédit par les modèles au volume observé à chaque mesurage. La différence entre le volume prédit et celui observé correspond à l'erreur de prédiction des modèles. L'étude de l'erreur de prédiction s'est faite de la même façon que pour les forêts naturelles. Ainsi, l'analyse vise à vérifier si le biais est nul et à expliquer les erreurs de prédiction de même que leur importance relative. Enfin, des pistes d'amélioration sont suggérées.

Erreurs dues à une mauvaise utilisation des tables

Une utilisation inappropriée des tables de rendement peut constituer une source d'erreur plus importante que celle provenant de l'imprécision des tables en question. Nous en présentons deux exemples : la non-détermination des superficies improductives et le nombre d'arbres échantillons pour le calcul de l'IQS.

5.2 RÉSULTATS

Erreur de prédiction des modèles

En combinant les quatre espèces étudiées, le biais est presque nul. Toutefois, des biais peuvent être mis en évidence en analysant les résultats pour chacune des essences prise séparément. Ainsi, des surestimations de volume sont notées pour l'épinette de Norvège (2,6 m³/ha/an), le pin gris (2,3 m³/ha/an) et l'épinette noire (0,7 m³/ha/an) et on constate une sous-estimation pour l'épinette blanche (4,0 m³/ha/an).

Pour les épinettes noire, blanche et de Norvège, l'horizon de prédiction et la justesse de l'estimation de l'IQS sont les variables les plus importantes permettant d'expliquer l'erreur de prédiction du volume marchand. Pour le pin gris, la qualité de station est la variable la plus importante ; le biais est presque

nul pour les qualités de stations moyennes, soit les plus fréquentes, alors qu'une surestimation importante est notée pour les stations les plus fertiles.

Erreurs dues à une mauvaise utilisation des tables de rendement

Pour les plantations, il est important d'estimer le volume pour chacune des placettes séparément plutôt que d'estimer un seul volume à partir des caractéristiques moyennes de l'ensemble des placettes. La dernière méthode peut surestimer la production en volume en présence de superficies improductives. À partir d'un dispositif pour le pin rouge, nous avons trouvé une surestimation à 45 ans pouvant atteindre plus de 140 m³/ha, soit de 60 %.

La production en volume marchand des plantations dépend principalement de la qualité de la station et très peu de la densité de reboisement. En conséquence, tous les paramètres associés à l'estimation de l'IQS pourront avoir un effet important sur la prédiction du volume. Les facteurs suivants peuvent entraîner une erreur de prédiction de l'IQS :

- une mauvaise détermination de l'âge (une sous-estimation de l'âge entraîne une surestimation de la prédiction de l'IQS et du volume et vice versa) ;
- une omission de distinguer les arbres naturels des arbres plantés. Les arbres naturels sont parfois plus grands et plus vieux. On peut donc surestimer l'IQS si on attribue l'âge de la plantation à ces arbres naturels. La surestimation est d'autant plus grande que la plantation est jeune.

Le nombre de tiges servant à évaluer l'indice de qualité de station doit être fidèle à celui des tables de rendement utilisées. À partir de données de plantations, nous démontrons qu'une trop faible quantité d'arbres pour estimer la hauteur dominante, et par la suite l'indice de qualité de station, peut induire une surestimation de la prédiction du volume de près de 22 %. À l'inverse, une trop grande quantité entraîne une sous-estimation de la prédiction du volume.

5.3 DISCUSSION

Il faut noter que plusieurs des prédictions ont été faites à partir d'un jeune âge ce qui rend les résultats plus hasardeux pour les raisons suivantes :

- 1) plus l'âge initial est distant de la maturité, plus les prédictions sont difficiles à établir avec précision ;
- 2) la période couverte par les prédictions est caractérisée par une forte croissance en volume (pour l'épinette de Norvège sur une station

de moyenne fertilité, l'accroissement quinquennal en volume marchand est de 47 m³/ha à 20 ans alors qu'elle baisse à 30 m³/ha à 50 ans) ;

- 3) la productivité des plantations est généralement plus grande que celle des forêts naturelles, de sorte que les erreurs de prédiction de volume peuvent être supérieures (à 50 ans, la production quinquennale d'une pessière noire naturelle de densité et de fertilité moyennes est de 7 m³/ha.) ;
- 4) la croissance juvénile dépend d'une multitude de facteurs liés à l'intervention humaine (qualité des plants, de la mise en terre, de la préparation de terrain et des dégagements) et à des conditions climatiques dont l'inclusion dans des modèles de croissance serait difficile d'application.

Pour le pin gris, le biais observé pour les stations les plus fertiles pourrait être lié à des chablis partiels. Ceux-ci sont fréquemment observés chez cette espèce et surviennent plus hâtivement sur les stations les plus fertiles, particulièrement pour les densités élevées de reboisement et en l'absence d'éclaircie. Ces chablis ne peuvent être modélisés correctement à l'aide de placettes temporaires ; l'utilisation des placettes permanentes permettra éventuellement de corriger cette lacune.

Ces résultats mettent en évidence les mêmes problèmes identifiés pour le modèle par courbes liés à l'utilisation des placettes temporaires pour calibrer les modèles de croissance. Il faut souligner que les parcelles permanentes avec mesures répétées dans le temps n'ont pas été installées dans le but de valider les modèles existants comme dans le présent exercice, mais bien pour remplacer les modèles existants lorsque le nombre de données sera suffisant. Par conséquent, ces résultats devraient davantage être perçus comme un signe des améliorations à venir qui seront possibles grâce aux efforts consentis depuis les dernières années et qu'il faudra poursuivre.

5.4 RECOMMANDATIONS

Deux recommandations sont formulées afin d'améliorer les prédictions du volume marchand pour les plantations :

- à court terme, compte tenu du nombre relativement important de données recueillies depuis la parution des premières tables de rendement de l'épinette blanche et de l'épinette de Norvège, nous recommandons de construire de nouvelles tables de rendement pour ces deux espèces à l'aide des parcelles temporaires actuellement disponibles ;
- nous recommandons également de poursuivre les efforts amorcés au cours des dernières années dans le but de produire, à moyen terme, une nouvelle génération de tables de rendement à partir de placettes permanentes.

SECTION B

ANALYSES DE LA SENSIBILITÉ D'UN CALCUL DE LA POSSIBILITÉ FORESTIÈRE À SES PRINCIPALES VARIABLES D'INTRANT

VARIABILITÉ DES DONNÉES DE L'INVENTAIRE

L'inventaire forestier vise à acquérir les connaissances sur les écosystèmes forestiers qui sont nécessaires à la gestion durable des forêts. Il permet entre autres de qualifier et de quantifier la superficie des peuplements forestiers, leur âge et les volumes de bois sur pied. Les données d'inventaire sont un des principaux intrants du calcul de la possibilité forestière.

La sensibilité des calculs de possibilité à la variabilité des intrants suivants a donc été analysée :

- la hauteur des arbres échantillons présents dans les strates;
- l'âge des arbres échantillons présents dans les strates;
- le volume à l'hectare par essence par strate;
- le nombre de strates dans l'aire commune.

6.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Pour réaliser l'analyse de sensibilité des variables « âge » et « hauteur », les résultats d'inventaire par strate ont été systématiquement réduits et augmentés de 5 %, 10 % et 20 %. Pour la variable « volume », ils ont été réduits et augmentés de 1 %, 5 % et 10 %. La possibilité forestière est calculée avec les données originales d'inventaire et représente la valeur étalon à laquelle sont comparés les résultats des calculs de possibilité avec chacune des données d'inventaire modifiées, toute autre variable étant tenue constante. Le résultat de cette comparaison représente la sensibilité de la possibilité forestière aux diverses valeurs attribuées à chacune des variables. Les simulations ont été réalisées pour quatre groupes de calculs, dont le plus représenté était le groupe SEPM. Le territoire choisi pour réaliser l'analyse de sensibilité de ces trois variables est celui de l'aire commune 08285B et les données d'inventaire qui ont servi aux calculs de la possibilité proviennent de l'unité de compilation U28A.

Nous avons aussi examiné l'impact, sur le calcul de la possibilité, du niveau d'agrégation des strates cartographiques en strates regroupées. Certains paramètres liés au regroupement des strates ont alors été utilisés pour faire varier le nombre de strates regroupées. Parmi ces paramètres se trouvaient le type écologique, le nombre de placettes-échantillons par strate et la superficie minimale des strates. Au total, 31 stratégies de regroupement ont été

évaluées, faisant varier le nombre de strates regroupées de 98 à 259. Les simulations dans *Sylva II* ont été réalisées pour trois groupes de calcul. Le territoire choisi pour cette analyse est l'unité de compilation 6856 de la région 02.

6.2 RÉSULTATS

6.2.1 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU CPF À LA VARIABLE « HAUTEUR DES ARBRES ÉCHANTILLONS »

Les calculs de possibilité forestière réalisés avec des données de hauteur d'arbres échantillons modifiées montrent une relation non linéaire entre une modification de la hauteur des arbres échantillons et la possibilité forestière. La hauteur des arbres échantillons influence le calcul de l'IQS par essence et donc le choix des courbes de rendement. Une hauteur plus faible entraîne une baisse de l'IQS, une augmentation de l'âge d'exploitabilité et généralement une diminution de la possibilité forestière. Par exemple, pour le groupe de calcul SEPM, une hauteur des arbres échantillons réduite de 20 % entraîne une baisse de la possibilité forestière de 6,8 %, alors qu'une hausse de 10 % entraîne une augmentation de la possibilité de 15 %. Par contre, pour le groupe de calcul MRFI, une diminution de la hauteur des arbres échantillons de 10 % a généré une augmentation de la possibilité de 7,5 %. Cette situation peut s'expliquer par le fait qu'une courbe de sénescence (perte de volume après la maturité) moins rapide est associée aux strates dont l'IQS est plus faible. Ce phénomène peut donc, dans certains cas, contrebalancer les pertes de rendement associées à un âge d'exploitabilité supérieur.

6.2.2 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU CPF À LA VARIABLE « ÂGE DES ARBRES ÉCHANTILLONS »

Les calculs de possibilité forestière réalisés avec des âges d'arbres échantillons modifiés montrent que la possibilité s'accroît avec une diminution de l'âge et, inversement, qu'elle diminue avec une augmentation de celui-ci. Cet effet sur la possibilité devient important lorsque l'âge varie de manière considérable. Par exemple, pour le groupe SEPM, une diminution de 5 % de l'âge a pour effet d'augmenter la possibilité de 3,9 %, alors qu'une diminution de 20 % l'augmente de 31,1 %. Par contre, une augmentation de 5 % de l'âge a pour effet de diminuer la possibilité de 2,9 %, alors qu'une augmentation de 20 % la diminue de 15,8 %. Cette relation non proportionnelle entre la variation de l'âge et la possibilité s'explique notamment par le fait que le choix de la courbe

d'IQS, pour un âge donné, se fait en considérant des classes d'IQS. Un changement de classe d'IQS nécessite une variation importante de l'âge.

6.2.3 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU CPF À LA VARIABLE « VOLUME À L'HECTARE PAR ESSENCE »

Les calculs de possibilité forestière réalisés avec des volumes par essence modifiés montrent une variation proportionnelle aux variations de volume dans les données d'inventaire. Par exemple, pour le groupe SEPM, on obtient une réduction de la possibilité de 8,9 % avec des volumes réduits de 10 % et, inversement, on obtient une hausse de 9,7 % avec des volumes accrus de 10 %.

6.2.4 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU CPF À LA VARIABLE « AGRÉGATION DES STRATES »

Un faible lien a été observé entre le niveau d'agrégation des strates regroupées et le résultat du calcul de la possibilité. Par exemple, pour le groupe de production SEPM, lorsque le nombre de strates regroupées passe de 98 à 259, la possibilité moyenne augmente de 4 %. Compte tenu de la faiblesse de la relation, des analyses additionnelles devront être faites pour confirmer et expliquer l'existence de ce lien.

6.3 DISCUSSION

L'analyse de sensibilité du calcul de la possibilité forestière a démontré que des variations systématiques des variables examinées par strate peuvent influencer souvent largement le résultat du calcul de la possibilité. Compte tenu de la nature même de l'inventaire, il est normal de constater une certaine variabilité des résultats par strate. Toutefois, cette analyse met avant tout en évidence qu'il est essentiel de s'assurer que les différentes étapes et procédures d'inventaire génèrent des résultats d'inventaire non biaisés (sous-estimation ou surestimation systématique). Si ces conditions sont respectées, les erreurs associées aux différentes variables pour chacune des strates se compenseront en partie.

HYPOTHÈSES D'AMÉNAGEMENT APPLICABLES AU MODÈLE DE SIMULATION « PAR COURBES »

Les hypothèses d'aménagement figurent parmi les intrants nécessaires au calcul de la possibilité forestière. Ces hypothèses sont généralement formulées par l'aménagiste qui fixe leur valeur sur la base de sa propre expertise et en tenant compte des connaissances scientifiques disponibles.

Or, pour une hypothèse ou une variable donnée, tout écart entre la valeur fixée et la valeur réelle est susceptible de générer une imprécision de l'estimation de la possibilité. Une analyse de la sensibilité sert particulièrement à déterminer ce niveau d'imprécision lorsqu'un tel écart est imposé, toute autre variable étant, par ailleurs, tenue constante. Dans le cadre de la présente analyse, nous avons cherché à déterminer ce niveau d'imprécision en ce qui a trait aux hypothèses d'aménagement utilisées avec le modèle de croissance « par courbes ».

7.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Sachant que le territoire forestier du Québec est constitué d'une diversité de peuplements caractérisés notamment par une structure spatiale particulière, une première étape a consisté à sélectionner des territoires types pour réaliser sur chacun d'eux des analyses de sensibilité, de manière à couvrir au mieux cette diversité. Cette sélection s'est appuyée sur la création d'une base de données relatives aux derniers plans généraux de toutes les aires communes du domaine public. Pour la forêt équienne — celle concernée par le modèle de croissance « par courbes » — on retrouve d'abord trois ensembles fondés sur la structure de la forêt : *structure anormale par surabondance de stock mûr*, *structure anormale par insuffisance de stock mûr* et *structure irrégulière*. Chacun est ensuite subdivisé en trois sous-ensembles représentant trois grands types forestiers : les peuplements résineux, les peuplements mélangés et les peuplements de feuillus intolérants. On retrouve donc au total neuf cas sous examen par variable soumise à une analyse de la sensibilité. Cette analyse est réalisée en fixant la valeur d'une variable donnée et en effectuant les simulations dans *Sylva II* pour chacun des neuf cas, toute autre valeur étant tenue constante (une attention particulière a été apportée afin que chaque groupe de calcul ait la même base commune d'hypothèses de simulation). Cet exercice est repris autant de fois qu'est modifiée la valeur

d'une variable de manière à obtenir un patron de réponse. Pour chaque variable soumise à une analyse, on précise la valeur qui sert de référence.

Parmi les hypothèses qui ont davantage un caractère quantitatif, nous avons retenu, pour l'analyse de la sensibilité, celles jugées de plus grande importance soit :

- l'horizon de simulation ;
- la priorité de récolte ;
- l'âge d'exploitabilité ;
- le traitement de plantations ;
- le traitement d'éclaircie précommerciale ;
- le traitement d'éclaircie commerciale ;
- la proportion de feuillus dans les strates de retour ;
- l'âge des strates de retour (délai de régénération).

En complément aux analyses de sensibilité, chaque hypothèse d'aménagement a été soigneusement examinée par plusieurs experts en calcul de possibilité, à la fois par rapport au niveau pressenti de sensibilité dans un calcul de possibilité et par rapport au niveau de connaissance qui sert à déterminer, par exemple, la valeur d'un intrant donné. Ce travail a été réalisé par une revue de la littérature et par des consultations auprès des responsables régionaux des calculs de possibilité. Les résultats présentés plus loin ne font référence qu'aux variables les plus sensibles ou dont les assises scientifiques sont les plus fragiles, ce qui ne signifie pas que les autres doivent être négligées, car elles contribuent toutes à l'erreur associée au résultat d'un calcul.

Enfin, nous avons estimé que les possibilités calculées pour chaque groupe de calcul devaient aussi être analysées par rapport à l'ensemble des groupes d'une aire commune, tous les groupes contribuant à la possibilité totale de l'aire dont le rendement doit être soutenu. Pour en tenir compte, un examen du volume total récoltable sur l'horizon de simulation a été fait, en plus de celui rattaché à la seule possibilité d'un groupe de calcul.

66 Les résultats obtenus reflètent, d'une part, la sensibilité d'un calcul à une variable donnée et, par conséquent, l'attention que l'on doit porter à fixer correctement le niveau de cette variable ; d'autre part ils reflètent l'impact qu'a le non-respect de la valeur fixée lors de la mise en application de la stratégie d'aménagement.

7.2 RÉSULTATS

7.2.1 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU CPF À LA VARIABLE « HORIZON DE SIMULATION »

L'analyse effectuée permet de répondre à deux questions relativement fondamentales, à savoir : l'horizon de simulation actuellement utilisé (150 ans) a-t-il une influence sur l'estimation de la possibilité d'une part, et d'autre part, s'assure-t-on que la forêt est laissée, à la fin de la simulation, dans des conditions susceptibles de permettre un rendement soutenu ?

Les simulations ont été réalisées en utilisant des horizons de simulation allant de l'âge d'exploitabilité moyen d'un groupe jusqu'à 150 ans, avec un pas de 20 ans. Les résultats indiquent que la stabilité de la possibilité est atteinte avant l'horizon de 150 ans (généralement autour de 120 ans), de sorte que l'horizon de 150 ans actuellement utilisé permet de bien évaluer la possibilité forestière. Les groupes retenus pour l'analyse font en sorte que, pour les cycles très longs de succession, les résultats des simulations effectuées ne peuvent être appliqués intégralement. Cependant, les résultats des simulations effectuées ne peuvent s'appliquer pour certaines forêts dont l'âge d'exploitabilité s'approche de l'horizon de simulation.

7.2.2 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU CPF À LA VARIABLE « PRIORITÉ DE RÉCOLTE »

Cette variable revêt une grande importance dans un CPF, car elle détermine l'ordre de récolte des diverses strates. L'usage général veut que 50 % du volume soit d'abord récolté dans les strates qui affichent la plus faible croissance (soit 50 % MIN) et le reste dans celles qui affichent les plus forts volumes à l'hectare (soit 50 % MAX) (combinaison : 50 % MIN – 50 % MAX). Cet usage a représenté ici la borne de référence à laquelle sont comparés les résultats des trois variations suivantes : 100 % MIN, 50 % MAX – 50 % MIN et 100 % MAX.

Aucune des trois grandes catégories de forêt n'affiche le même niveau de sensibilité à cette variable. Pour la forêt en surabondance en stock mûr, la récolte prioritaire de strates en décroissance (100 % MIN) s'avère un choix judicieux ; l'effet sur la possibilité et sur la disponibilité en bois tout au long de l'horizon de simulation est positif. Dans la situation inversée (100 % MAX), on

observe une baisse de la possibilité qui atteint 31 % pour le groupe SEPM. Pour l'ensemble des combinaisons observées, une grande part des variations s'explique par l'importance des pertes par sénescence et le passage d'une proportion importante des strates vers la succession naturelle. Certaines de ces strates peuvent même échapper à toute récolte.

7.2.3 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU CPF À LA VARIABLE « ÂGE D'EXPLOITABILITÉ »

L'âge d'exploitabilité absolu est celui le plus couramment utilisé pour les peuplements équiennes. Il fournit un optimum de volume de matière ligneuse dans le temps requis pour le produire. Cet usage a constitué, pour la présente analyse, la borne de référence pour chacun des cas examinés. Pour chacune des simulations et des courbes de production, l'âge d'exploitabilité a été diminué de 5 et 10 ans et augmenté de 5 à 20 ans, avec un pas de 5 ans.

Pour tous les cas examinés, les résultats indiquent qu'une baisse de l'âge d'exploitabilité entraîne une hausse de la possibilité forestière. Cette hausse dépasse 20 % pour certaines structures de forêt (anormale par insuffisance et irrégulière), en raison d'une anticipation de la récolte qui vient alors à court terme compenser une faible disponibilité de matière ligneuse. Une telle anticipation a toutefois pour conséquence d'exploiter des peuplements alors que l'accroissement annuel moyen est suboptimal et que la régénération naturelle risque d'être absente. À l'inverse, plus l'âge d'exploitabilité est augmenté, plus la possibilité diminue. Par exemple, une augmentation de l'âge de 5 ans occasionne une baisse de la possibilité de 3 à 18 % et elle peut atteindre de 23 à 56 % lorsque l'âge est augmenté de 20 ans. Une analyse des résultats sous l'angle du volume récoltable au cours de l'horizon de simulation montre un effet comparable, mais avec un écart moindre entre les structures de forêts. Enfin, le fait de créer des courbes moyennes, à partir des tables de production, peut générer des variations de l'âge d'exploitabilité pouvant atteindre 15 ans.

68 7.2.4 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN CPF À LA VARIABLE « PLANTATIONS »

Les travaux de plantations ont un effet sur un calcul de la possibilité de deux manières principales : ils améliorent la proportion du peuplement en essences principales et ils procurent un meilleur rendement comparativement à un peuplement naturel. Les analyses n'ont pas tenu compte des plantations réalisées là

où aucune régénération ne se serait installée, l'effet étant direct sur la possibilité pour ce qui est des superficies productives. La procédure utilisée pour uniformiser le rendement entre les neuf cas étudiés a conduit à octroyer des rendements de plantations plutôt conservateurs de sorte que les résultats d'un CPF doivent être considérés comme l'étant également. Les analyses de la sensibilité ont tenu compte des niveaux constants de réalisation de plantations qui atteignent 10, 20, 30, 40 ou 50 % des superficies moyennes récoltées dans la simulation de référence, au cours du premier 25 ans de simulation. La borne de référence est représentée ici par l'absence de plantations.

Les résultats indiquent que ce traitement réalisé annuellement sur 10, 30 ou 50 % des superficies récoltées peut procurer une hausse de la possibilité de respectivement 4, 11 et 19 % dans la forêt anormale par surabondance de stock mûr. Aucun effet sur la possibilité n'est noté pour les autres grandes catégories de forêts. L'effet reste peu important pour le volume total récoltable de ces mêmes forêts.

7.2.5 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN CPF À LA VARIABLE « ÉCLAIRCIE PRÉCOMMERCIALE »

Les travaux d'éclaircie précommerciale sont susceptibles d'influencer le résultat d'un calcul de la possibilité par une amélioration de la proportion en essences principales qui résulte généralement de ces traitements. Pour les simulations effectuées, nous avons supposé des proportions qui améliorent la composition résineuse d'environ 20 %. Les analyses de la sensibilité ont pris en compte des niveaux de réalisation constants de ce traitement qui atteignent 10, 20, 30, 40 ou 50 % des superficies moyennes récoltées dans la simulation de référence, au cours du premier 25 ans de simulation. La borne de référence est représentée ici par l'absence du traitement.

Les résultats indiquent que ce traitement, réalisé annuellement sur 10, 30 ou 50 % des superficies récoltées, peut procurer une hausse de la possibilité de respectivement 1,8, 4,5 ou 7,7 %. Les résultats sont environ deux fois supérieurs pour les strates mélangées à feuillus intolérants. À l'instar du traitement précédent, cette augmentation de la possibilité est attribuable à un renouvellement plus rapide ou une meilleure composition de la forêt en essences principales.

7.2.6 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN CPF À LA VARIABLE « ÉCLAIRCIE COMMERCIALE »

Cette analyse a nécessité au préalable une sélection de peuplements dont les caractéristiques se voulaient le plus près possible des critères du *Manuel d'aménagement forestier*. Les simulations ont été réalisées pour des niveaux constants de traitement sur l'horizon de simulation et visaient à atteindre 10, 30 ou 50 % des superficies moyennes récoltées dans la simulation de référence, au cours du premier 25 ans de simulation.

Pour la forêt anormale par surabondance de stock mûr, plus on augmente les superficies d'éclaircie, plus la possibilité diminue, pour un ordre de grandeur de 1 à 4 %. Pour les autres catégories de forêts, ce traitement augmente la possibilité jusqu'à des niveaux de 8 %. Le gain est pratiquement identique si on applique l'éclaircie commerciale aux seules trois périodes qui précèdent la période critique fixant la possibilité. Par contre, pour tous les groupes de calcul, il a été impossible de maintenir constant le niveau des travaux d'éclaircie. Les résultats peuvent donc être influencés par ces variations aléatoires.

7.2.7 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN CPF À LA VARIABLE « PROPORTION DE FEUILLUS DANS LES STRATES DE RETOUR »

Tel qu'indiqué dans l'introduction (Mise en contexte de l'approche de modélisation) et aussi au chapitre 1, il n'y a que peu d'informations pour permettre aux aménagistes d'établir la dynamique de succession après perturbation. Le capital en croissance est une variable déterminante d'un calcul de possibilité, mais la composition de ce capital l'est tout autant. Parce que les forces de la compétition jouent habituellement en faveur des feuillus intolérants au cours de la phase d'établissement d'un peuplement, au détriment des espèces résineuses, la proportion de feuillus a été examinée pour chacun des cas à l'étude. Le niveau de référence a été établi par les données originales, puis cinq itérations ont été effectuées en variant la proportion de feuillus de cinq niveaux, soit : -25, -12, +12, +25 et +37 %.

De manière générale, il ressort que plus la période critique est éloignée dans le temps et plus la proportion de feuillus est à la hausse, plus la baisse en possibilité (et en volume récoltable total) résineuse est importante et plus celle en feuillus s'accroît. Une proportion de feuillus pourrait être constituée par des feuillus non commerciaux, mais nous n'en avons pas tenu compte. Un exemple

de résultats pour la forêt résineuse montre que des proportions de feuillus augmentées de 12, 25 ou 37 % occasionnent une baisse de la possibilité résineuse de respectivement 14, 31 et 46 %. À l'inverse, une diminution de 12 ou de 25 % entraîne une hausse de cette possibilité de 13 et 22 %, respectivement.

7.2.8 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ D'UN CPF À LA VARIABLE « ÂGE APPLIQUÉ AUX STRATES DE RETOUR »

La valeur déterminée pour cette hypothèse sert à fixer l'âge du nouveau peuplement forestier, une fois le peuplement mature prélevé. Cet âge est fonction de la qualité de la régénération présente lors de la récolte. Pour chaque cas à l'étude, la valeur de référence correspond aux données originales (soit un délai de 0 année) ; des itérations ont été faites pour représenter soit une anticipation (+5 et + 10 ans), soit un délai de régénération (-15, -10 et -5 ans).

Cette variable influence un CPF pour les cas où la période critique est éloignée. Pour les strates résineuses en surabondance de stock mûr, un délai de régénération de 5, 10 ou 15 ans entraîne une baisse de la possibilité de respectivement 8, 15 et 22 %. À l'inverse, une anticipation de la régénération de 5 ou 10 ans entraîne une hausse de la possibilité de 9 et 17 %, respectivement. Pour les autres structures, comme la période critique précède le moment où ces strates de retour seront matures, cette variable n'a pas d'impact sur la possibilité ou sur le volume récoltable sur l'horizon de simulation.

7.2.9 ANALYSE QUALITATIVE DE LA SENSIBILITÉ D'UN CPF À LA VARIABLE « SUCCESSION APRÈS PERTURBATION »

Cette variable fait écho à plusieurs hypothèses de succession dont une, la *détermination de l'âge de bris*, nous est apparue relativement fragile. Cet âge est généralement fixé au moment où le volume en décroissance atteint 50 m³/ha. Cet âge détermine le moment où une strate équienne passe naturellement au stade suivant de son évolution. Les superficies qui tombent sous la barre du 50 m³/ha en volume marchand ne sont alors pas prises en compte pour le calcul de la possibilité de coupe ; on les considère comme en succession naturelle ou « en renouvellement » et on leur attribue arbitrairement un âge de retour. Ces valeurs ne reposent pas sur une documentation scientifique. Il n'existe pas systématiquement de confirmation qu'un renouvellement de la forêt est en cours pour les cas identifiés de cette façon.

Les hypothèses reliées à l'évolution des strates de moins de 7 m de hauteur sont des éléments de sensibilité. Il n'existe pas, dans ce cas, de modèle adapté à la forêt québécoise de sorte que diverses approches ont été développées dans les régions du Québec. Les méthodes de confection des courbes reposent normalement sur les inventaires de suivi après coupe et sur des données écologiques ; l'usage réel qui en est fait n'est cependant pas constant.

Après une coupe finale, l'aménagiste doit formuler des hypothèses concernant la succession des peuplements après coupe ou succession forestière. Cette question revêt une très grande importance dans un calcul de la possibilité forestière (voir la discussion au chapitre 1) car on doit préciser alors la composition de la forêt future. La question est très peu documentée ; par exemple, nous ne disposons pas de modèles écologiques qui aideraient à préciser ces successions. Règle générale, les méthodes de confection de courbes de retour reposent sur des données concernant le peuplement d'origine (particulièrement l'analyse des gaules) et sur des données écologiques. L'usage réel qui en est fait est, là aussi, variable. Si les projections sont erronées ou si elles ne sont pas systématiquement corrigées à la lumière de nouvelles informations, l'imprécision de l'estimation de la possibilité forestière augmente et, surtout, elle est elle-même difficile à estimer.

7.2 DISCUSSION

Il ressort des diverses analyses effectuées que le résultat d'un calcul de possibilité affiche des niveaux de sensibilité parfois très élevés à certaines variables ou hypothèses d'aménagement, principalement en fonction de la structure de la forêt. Ainsi, le cas des forêts en surabondance de stock mûr, qui représentent près de 70 % du total des superficies aménagées avec le modèle « par courbes », montrent des niveaux de sensibilité élevés à toutes les variables étudiées. L'absence de connaissances précises concernant la dynamique forestière, soit le délai de régénération et la composition du peuplement à venir, de même que l'intégration de ces paramètres dans des modèles de succession, font en sorte que le résultat d'un CPF comporte un niveau d'imprécision qu'on ne peut estimer. Par ailleurs, les résultats tendent à démontrer que le recours au traitement d'éclaircie commerciale pour rencontrer des objectifs ponctuels d'approvisionnement ou de qualité du bois est envisageable en autant seulement que la disponibilité en bois après une période critique soit suffisante. Des analyses de sensibilité particulières devraient alors être faites.

7.2 RECOMMANDATIONS

1. Développer un processus opérationnel d'analyse de sensibilité visant à identifier les hypothèses et scénarios auxquels le CPF est particulièrement sensible afin de mieux cibler les vérifications de la conformité des travaux et l'acquisition des connaissances.
2. Développer des modèles de succession après perturbations.
3. Établir des priorités de récolte qui tiennent compte de la façon la plus appropriée des contraintes naturelles (p. ex. la vulnérabilité à la tordeuse des bourgeons de l'épinette) et opérationnelles (p. ex. l'accessibilité au territoire) afin de mieux intégrer l'effet de ces variables sur le passage des strates vers la succession naturelle.

Le modèle de simulation « par taux de passage » est utilisé pour simuler la croissance des peuplements inéquiennes. Les simulations effectuées avec ce modèle font appel à deux approches méthodologiques : celle qui repose sur les taux de passage et celle qui utilise des scénarios d'évolution. Dans le premier cas, les traitements considérés sont essentiellement des coupes partielles (p. ex. le jardinage). Le second cas s'applique aux peuplements soit dégradés, soit impropres au jardinage ou dont la structure se prête à une récolte par trouées, par parquets ou à une coupe totale.

8.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Des simulations ont été faites avec prépondérance de l'une ou l'autre approche citée plus haut. Pour les simulations avec taux de passage, il s'agissait essentiellement de simuler des coupes partielles à long terme en modifiant les paramètres suivants : l'étalement, la rotation, le nombre de calculs et les taux de passage. Pour cette analyse, un groupe de calcul comportant une proportion importante de coupes partielles à long terme a été utilisé. Tous les traitements sylvicoles de la stratégie d'origine ont été remplacés par un traitement de « jardinage par défaut » afin de pouvoir isoler l'impact des variables étudiées. En ce qui concerne les simulations avec prépondérance de strates simulées par scénarios d'évolution, la sensibilité de deux variables a été analysée, soit la variable « nombre de coupes partielles réalisées avant la coupe finale » et la variable « choix de scénarios d'évolution pour sites riches ou pauvres ». Pour la première, nous avons utilisé deux groupes de calcul (un groupe ERS et un groupe PIN). Pour la seconde variable, nous avons eu recours à trois groupes de calcul (un groupe RBOU a été ajouté), lesquels comportaient des superficies aménagées par parquets et des scénarios d'éclaircies successives conduisant à des coupes finales.

En complément aux analyses de sensibilité, chaque hypothèse a été soigneusement examinée par plusieurs experts en calcul de possibilité, suivant l'approche expliquée au chapitre précédent.

Les résultats obtenus reflètent, d'une part, la sensibilité d'un calcul à une variable donnée et, par conséquent, l'attention que l'on doit porter à fixer correctement

le niveau de cette variable; d'autre part ils reflètent l'impact qu'a le non-respect de la valeur fixée lors de la mise en application de la stratégie d'aménagement.

8.2 RÉSULTATS DE LA SIMULATION AVEC PRÉPONDÉRANCE DES COUPES PARTIELLES

8.2.1 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DE LA VARIABLE « ÉTALEMENT »

L'étalement représente le nombre de périodes requises pour réaliser un traitement sur la superficie totale d'une strate. La borne de référence est celle de la stratégie d'origine dans laquelle l'étalement varie de 5 à 20 ans. L'analyse a porté sur un étalement de 5 ans et sur un étalement égal à la rotation.

Pour un étalement de 5 ans, l'analyse de sensibilité montre un accroissement de la possibilité de 6,3 % par rapport à la référence du fait qu'une proportion plus grande du volume est prélevée dès les premières périodes. Pour un étalement égal à la rotation, la possibilité baisse de 3,5 % du fait qu'on retarde la récolte de volumes qui étaient essentiels, à court terme, au maintien de la possibilité. Dans tous les cas, la première période demeure critique. La sensibilité à l'étalement est particulièrement élevée lorsque les périodes critiques surviennent à court terme parce que cette variable a pour effet de rendre ou non disponibles des volumes.

8.2.2 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DE LA VARIABLE « ROTATION »

La durée des rotations est déterminée par l'aménagiste, lors de la simulation, pour un traitement particulier en tenant compte de l'intensité du prélèvement (en quantité et en qualité) et du temps de reconstruction du peuplement. Une variation de l'un ou l'autre de ces paramètres influence directement la durée de la rotation. La borne de référence correspond à la durée de rotation de la stratégie d'origine. L'analyse a examiné une rotation réduite de 5 ans, une autre augmentée de 5 ans.

Lorsque l'on conserve les étalements d'origine, la possibilité reste inchangée quelle que soit la durée de la rotation et la première période demeure critique. Cela s'explique par le fait que la variation des rotations n'a d'impact que sur des volumes récoltés après une rotation complète, soit après au moins quatre périodes. En ajustant les étalements pour qu'ils soient égaux à la durée des

rotations, on constate qu'une rotation réduite de cinq ans entraîne une augmentation de la possibilité de 26,2 %. À l'opposé, lorsque la rotation est allongée de cinq ans, la possibilité chute de 21,3 %.

8.2.3 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DE LA VARIABLE « TAUX DE PASSAGE »

Les taux de passage expriment la croissance des tiges individuelles qui composent une strate donnée. Plusieurs matrices de taux sont disponibles dans *Sylva II*, certaines pour des strates non traitées, d'autres pour des strates après traitement. Globalement, les matrices de taux de passage après traitement produisent des accroissements supérieurs à celles destinées aux strates non traitées. Le choix d'une table appropriée revient à l'aménagiste. La borne de référence correspond au taux de la stratégie d'origine.

La modification des taux de passage n'a un effet significatif sur le résultat d'un CPF que lorsque les périodes critiques surviennent à long terme ou si l'on prend en considération le volume récoltable sur tout l'horizon de simulation. Un examen du volume récoltable sur tout l'horizon de simulation montre une baisse de 19,6 % lorsque des taux de passage « avant traitement » sont conservés durant toute la simulation. Cette variable a donc un effet uniquement lorsque les périodes critiques sont éloignées.

8.2.4 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DE LA VARIABLE « NOMBRE DE CALCULS »

Le modèle de simulation par taux de passage autorise l'utilisateur à choisir le nombre de rotations durant lesquelles le logiciel fait croître le volume résiduel de chaque prélèvement à l'aide des taux de passage. Un calcul représente une rotation complète. L'aménagiste peut décider de limiter le nombre de rotations calculées à partir des taux de passage. Le cas échéant, l'image des rotations subséquentes, incluant les volumes de chacune des périodes, est une copie de la dernière rotation calculée. Habituellement, les aménagistes limitent le nombre de calculs à 1 ou 2. De plus, une validation de la durée de la rotation n'est faite que pour la première rotation ; les autres durées sont simplement une répétition de cette première, sans être validées dans le cadre d'un calcul donné. Elles le seront toutefois dans des calculs de possibilité futurs. La borne de référence est le nombre de calculs inscrit dans la stratégie sylvicole, soit de 1 à 2 calculs selon les strates.

Pour les fins de la présente analyse, le nombre de calculs varie de 1 à 4. Comme la période critique du groupe de calcul ERS survient à court terme, toutes les variations du nombre de calculs ont un effet nul sur la possibilité. Cependant, le volume récoltable sur tout l'horizon de simulation baisse de 0,1 %, pour 1 calcul, à 10,5 % pour 4 calculs. Le nombre de calculs a donc un effet uniquement lorsque les périodes critiques surviennent à long terme ou lorsque l'on prend en considération le volume récoltable sur tout l'horizon de simulation.

8.3 RÉSULTATS DE LA SIMULATION AVEC PRÉPONDÉRANCE DE SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION

8.3.1 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DE LA VARIABLE « NOMBRE DE COUPES PARTIELLES RÉALISÉES AVANT LA COUPE FINALE »

Les strates d'essences tolérantes sont parfois simulées en coupes partielles conduisant à des coupes finales lorsque l'on rencontre des problèmes de dégradation. Selon l'état initial de ces strates, une ou deux coupes partielles peuvent être réalisées avant d'appliquer une coupe finale. La borne de référence est celle inscrite dans la stratégie sylvicole d'origine. Elle est constituée d'une certaine proportion de strates récoltées après une ou deux coupes partielles.

Pour un premier groupe de calcul (ERS), la possibilité diminue de 3,8 % lorsqu'on réalise systématiquement une seule coupe partielle et diminue de 1,7 % lorsque deux coupes partielles sont systématiquement réalisées. Si l'on examine le volume récoltable sur tout l'horizon de simulation, la possibilité augmente de respectivement 8,9 % et 10,3 %. Pour le second groupe de calcul (PIN), la possibilité diminue de 4,7 % lorsque l'on réalise une coupe partielle et diminue de 4,8 % lorsque deux coupes partielles sont réalisées. Si l'on examine le volume récoltable sur tout l'horizon de simulation, alors l'effet s'atténue et devient presque nul. On constate donc que la simulation de référence est bien optimisée en ce qui a trait à l'agencement temporel des récoltes partielles et finales, en fonction de l'état initial des strates.

8.3.2 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DE LA VARIABLE « CHOIX DE SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION POUR SITES RICHES OU PAUVRES »

Comme les scénarios d'évolution visent principalement à produire des structures équiennes plutôt qu'inéquiennes, ils conduisent presque invariablement

à des coupes finales. Différents scénarios d'évolution sont envisageables, notamment selon la richesse des stations rencontrées. Nous en avons testé deux : sites riches et sites pauvres.

Par rapport à la possibilité de référence, la sous-estimation peut atteindre 2,2 % (groupe de calcul PIN sur site riche) ; la surestimation peut atteindre 2,5 % (groupe de calcul BOU sur site pauvre). Par contre, si l'on considère le volume exploitable sur l'ensemble de l'horizon de simulation, les écarts se creusent, oscillant entre un gain de 8,6 % pour le groupe de calcul RBOU sur sites riches et une baisse de possibilité de 22,6 % pour le groupe de calcul BOU sur sites pauvres.

8.4 DISCUSSION

Les analyses effectuées démontrent que le résultat d'un calcul de la possibilité est parfois très sensible à certaines variables. C'est le cas par exemple pour la durée de la rotation qui, lorsqu'elle s'accroît même faiblement, génère un fort effet à la baisse sur la possibilité. Or, la durée de la rotation dépend étroitement de la quantité et de la qualité des arbres résiduels (p. ex. un grand nombre de tiges résiduelles vigoureuses favorisera une bonne croissance ; par conséquent la durée de la rotation sera courte). Un tel résultat vient confirmer d'autres résultats semblables obtenus avec des mesures effectuées dans le cadre de suivis de divers traitements sylvicoles. Le suivi d'un tel paramètre dans la simulation pose des difficultés pour l'aménagiste, qui ne peut souvent pas déterminer *a priori* la durée des rotations avec assurance. Les analyses effectuées font aussi ressortir que l'application d'une variable comme l'étalement à des strates ciblées est une source potentielle de distorsion entre un calcul et l'application de la stratégie d'aménagement. Enfin, le manque de connaissances suffisamment précises concernant la dynamique des peuplements en lien avec les travaux sylvicoles, combinée à l'absence de modèles de succession, fait en sorte que le résultat d'un CPF comporte un niveau d'imprécision difficile à déterminer. D'ailleurs, cette incapacité d'estimer l'imprécision rattachée aux variables propres aux scénarios d'aménagement est un frein à l'estimation de l'erreur d'un calcul de la possibilité. Plusieurs variables d'un calcul se voient attribuer des valeurs pour lesquelles l'incertitude est grande ; une attention particulière devrait y être apportée. C'est le cas, par exemple, de la définition des zones d'accroissement et des taux de passage.

8.5 RECOMMANDATIONS

1. Développer un processus opérationnel d'analyse de sensibilité visant à identifier les hypothèses et scénarios pour lesquels le CPF est particulièrement sensible afin de mieux cibler les vérifications de la conformité des travaux et l'acquisition des connaissances.
2. Développer des modèles de succession après perturbations.

SECTION C

ANALYSE INDÉPENDANTE
ET AVIS EXTERNE

CALCUL DE LA POSSIBILITÉ FORESTIÈRE PAR UNE APPROCHE INDÉPENDANTE

Le calcul de la possibilité forestière repose sur l'interaction entre la dynamique de croissance de strates individuelles et la répartition des strates et essences dans les différentes classes d'âge sur le territoire concerné. La méthode actuelle de calcul utilise donc deux sources d'information : les modèles de croissance et les inventaires. Ces deux sources d'information permettent d'obtenir une valeur moyenne de la possibilité forestière pour un territoire, mais leur utilisation actuelle élimine du calcul toute l'information liée à l'imprécision qui les entoure. Par exemple, les modèles de croissances ne peuvent prédire avec exactitude la croissance en volume marchand d'une strate particulière. De la même manière, l'inventaire montre une variabilité du volume marchand entre les placettes localisées dans la même strate. Les imprécisions sont ignorées dans le calcul de la possibilité, car les outils dont nous disposons ne nous permettent pas d'en tenir compte.

Le travail par approche indépendante avait donc deux objectifs. Le premier était de déterminer l'importance de certaines sources d'imprécision dans le calcul de l'accroissement en volume marchand de strates équiennes qui seraient normalement traitées au moyen du modèle « par courbes ». Le second était de propager ces imprécisions dans le calcul de la possibilité.

Le terme « imprécision » inclut à la fois les biais et la variation. Cependant, pour fins de simplicité et tel que validé pour certaines de nos sources d'imprécision, nous considérons dans le présent chapitre les biais comme nuls et n'incluons sous le vocable « imprécision » que les variations.

9.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'atteinte des objectifs de cette analyse a exigé la construction d'outils nouveaux pour le calcul de la possibilité forestière. Le modèle « par courbes » traditionnel de Pothier et Savard (1998) a été remplacé par deux équations empiriques, tirées du modèle américain NE-TWIGS, et paramétrées pour l'ensemble des essences commerciales de la forêt boréale à partir des données de placettes-échantillons permanentes du Québec. Ces deux équations servent respectivement à calculer l'accroissement en surface terrière et la probabilité de survie d'un arbre individuel pour une année, à partir de son diamètre et de la distribution diamétrale des autres arbres de la placette, toutes

essences confondues. L'erreur d'ajustement de ces deux équations a été estimée et comparée à celle obtenue par le modèle « par courbes » traditionnel au moyen d'un jeu de placettes de validation dont les données n'avaient pas été utilisées pour l'ajustement des équations.

Nous avons ensuite conçu, dans le progiciel SAS, un calculateur de possibilité forestière qui respectait les grands principes de *Sylva II*, comme l'équation de conservation, l'âge de bris, l'horizon de simulation de 150 ans, les règles de priorisation de la récolte (50 % du volume pour minimiser les pertes et 50 % du volume pour maximiser les volumes) et les calculs sur une base périodique de cinq ans. Cependant, à la différence de *Sylva II*, ce calculateur suit l'accroissement des arbres individuels dans les placettes-échantillons, additionne ces accroissements périodiques à l'échelle de la placette, en soustrait les pertes par mortalité et calcule l'accroissement en volume marchand de chaque strate comme la moyenne des accroissements nets des placettes à l'intérieur de ces strates, multipliée par la superficie de la strate.

Les strates de retour après coupe ont été représentées par des placettes de retour dont le nombre de tiges et la distribution diamétrale étaient estimés empiriquement à partir des données des placettes originales de la série d'aménagement. Aussi, l'atteinte du volume exact de la récolte annuelle attendue nécessitait à chaque période de cinq ans la coupe de parties de strates. Ces parties de strates étaient représentées par un sous-échantillon de placettes tirées au hasard parmi l'ensemble des placettes de la strate. Le nombre de placettes de ce sous-échantillon était proportionnel à la fraction de la superficie de la strate nécessaire à l'atteinte de l'objectif de récolte.

Le modèle a été construit pour suivre la propagation de trois sources d'imprécision. Celle liée au volume initial de la strate est représentée par la variance des volumes marchands entre les placettes de cette strate. Celle liée à l'estimation de l'accroissement en volume marchand de la placette est représentée par l'imprécision de prédiction de l'accroissement brut, de la mortalité et de l'interaction entre ces deux termes. Finalement, celle liée à la simulation de la strate de retour est représentée par l'ajustement des équations empiriques de nombre de tiges à l'hectare et de distribution diamétrale à l'échelle de la série d'aménagement. Toutes les autres sources d'imprécisions ont été ignorées.

Le modèle a été appliqué à quatre groupes de calcul tirés de l'unité de sondage U28A localisée en Abitibi et représentant différentes combinaisons de

dominance de feuillus et de résineux. La simulation a été basée sur un scénario d'aménagement simplifié, n'impliquant aucune intervention autre que la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) et supposant une régénération immédiate des strates coupées. Les strates de moins de 7 m ont été omises de la simulation. Nous avons utilisé les âges de bris correspondant à un volume marchand de 50 m³/ha calculé au moyen du modèle « par courbes » traditionnel. Nous avons utilisé pour les simulations toutes les placettes-échantillons disponibles sans distinction particulière quant à leur origine, qu'elles aient été effectivement mesurées, recrutées ou mises à jour.

Finalement, nous appelons dans ce chapitre « possibilité forestière » la résultante de l'application de l'équation de conservation au niveau du groupe de calcul. Dans la pratique cependant, ce terme est réservé pour le cumul, à l'échelle d'une unité d'aménagement des volumes issus de plusieurs groupes de calcul (voir 1.1.3).

9.2 RÉSULTATS

Les équations de NE-TWIGS ajustées sur les données du Québec donnent des estimés d'accroissement net des placettes équivalents sur le plan de l'imprécision à ceux obtenus avec le modèle « par courbes » de Pothier et Savard (1998). Les ajustements aux accroissements annuels nets en volume marchand mesurés sont en général assez pauvres (R^2 de 0.13 pour l'épinette noire). L'analyse des résultats des tests sur les données réservées à la validation montre que les équations captent bien l'accroissement brut d'arbres individuels (R^2 de 0.32 à 0.84), mais captent mal les pertes annuelles par mortalité (R^2 de 0 à 0.13). De plus, l'erreur de prédiction de l'accroissement brut est positivement corrélée à celle du volume perdu par mortalité ($R^2 = 0.17$ pour l'épinette noire). Nous n'avons détecté aucun effet de la variabilité structurale de la placette sur ces ajustements, une fois la densité prise en compte.

Les groupes de calcul montrent une structure d'âge allant de surabondance de peuplements matures à irrégulière. Les périodes critiques se rencontrent généralement au-delà de la période 20 (100 ans) (Fig. 2). La propagation de l'erreur dans le calcul de la possibilité montre que l'imprécision, exprimée en termes relatifs par rapport aux volumes exploitables prédits, varie beaucoup d'une période à l'autre et entre les groupes de calcul (Fig. 3). On note une augmentation générale, mais irrégulière, de l'imprécision avec le temps écoulé depuis le début de la simulation. L'imprécision à la période critique varie d'environ 10 % à 50 % (moyenne de 30 %) du volume récoltable pour les quatre groupes de calcul.

La combinaison de la structure d'âge, de l'imposition d'un âge de bris et de la seule utilisation de la CPRS entraîne des pertes en volume variables et souvent importantes. Les pertes sont particulièrement fortes pour le groupe de calcul résineux avec une surabondance de peuplements murs, dans lequel la perte moyenne annuelle estimée attribuable au bris équivaut à la possibilité forestière, mais est concentrée sur quelques périodes uniquement. Les pertes par bris sont beaucoup plus faibles pour le groupe de calcul feuillu à structure irrégulière.

Nous avons été incapables de réaliser la simulation pour une série d'un des groupes de calculs en raison de l'absence de placettes dans les strates jeunes rendant impossible l'ajustement des équations nécessaires à la génération de nouvelles placettes suite à la coupe. Dans les autres groupes de calcul, le nombre de placettes dans toutes les classes d'âge était suffisant pour ajuster les équations servant à recréer de nouvelles placettes après leur récolte. Cependant, l'incertitude reliée à l'estimation de la composition de la strate de retour fait en sorte que l'imprécision entourant les volumes exploitables prédits peut augmenter jusqu'à la dernière période de simulation.

Selon nos règles de fractionnement de strates pour l'atteinte du volume récoltable, l'interaction entre la présence de grandes strates, les règles de priorisation de la récolte et le nombre de placettes par strate engendre des fluctuations importantes dans les prévisions de coupe. Dans le cas du groupe de calcul mixte à dominance résineuse, le volume de récolte montre un coefficient de variation de 47 % par rapport à la possibilité forestière. Une partie de cette variabilité résulte de la variabilité du volume marchand entre les placettes d'une même strate.

9.3 DISCUSSION

86

L'analyse des accroissements nets obtenus avec NE-TWIGS suggère que la prédiction de l'accroissement net dans les modèles de croissance est limitée par notre capacité de prédire la mortalité à l'échelle de la placette. La mortalité d'arbres individuels est un phénomène très mal capté par les placettes de taille standard de 400 m². L'amélioration de notre capacité de prédire l'accroissement net des strates passe donc par l'amélioration de la prédiction de la mortalité des arbres.

L'augmentation de l'imprécision entourant l'estimation du volume exploitable en fonction du temps de la simulation est un phénomène intuitivement attendu,

car notre capacité d'estimer les volumes disponibles dans des strates spécifiques décroît nécessairement avec l'horizon de simulation. Cependant, cette imprécision varie d'une période à l'autre parce que le nombre de placettes relié au volume exploitable varie lui aussi entre les périodes. La cible de 15 placettes par strate sans égard à sa taille fait en sorte que l'imprécision augmente avec la taille des strates utilisées dans le calcul des volumes exploitables. De plus, plusieurs sources d'imprécisions, telles que celles liées aux mesures d'inventaire, aux strates de 7 m et moins de hauteur, à l'intervalle de retour après coupe, à l'ajustement pour la carie et à l'ensemble des perturbations sont omises de la présente analyse. Leur inclusion accroîtrait l'impact du temps de simulation sur l'imprécision des volumes exploitables prédits, ainsi que la variabilité de cette imprécision entre les périodes. Suite à ces analyses, nous croyons que l'inclusion de l'imprécision apporterait un complément d'information important à l'estimation de la possibilité forestière. Nous pensons aussi que la quantification et la propagation des imprécisions permettraient de diriger les efforts de recherche vers les questions les plus pertinentes à l'amélioration des calculs de possibilité.

L'omission du calcul de la possibilité des strates ayant 7 m et moins entraîne nécessairement certaines aberrations dans nos calculs, notamment une baisse artificielle du volume exploitable aux âges où ces strates auraient atteint la maturité si leur croissance avait pu être prédite. Cependant, compte tenu de notre mode de fonctionnement par placettes, il nous est difficile d'inclure ces strates a priori, étant donné l'absence de placettes dans ces strates. Dans les simulations opérationnelles, l'absence d'information rigoureuse sur les strates de 7 m et moins engendre présentement des imprécisions difficilement quantifiables sur les estimés de volumes exploitables.

Les pertes estimées à la suite du passage du peuplement au delà de l'âge de bris sont entachées d'une imprécision qui, elle non plus, ne peut être actuellement estimée par une variance. Le calcul de ces pertes se fonde sur un âge (âge de bris) à partir duquel le volume marchand d'un peuplement sénescient passe en deçà d'un seuil fixé par l'aménagiste. Cependant, le modèle de sénescence des peuplements est basé sur peu d'informations. Les pertes estimées peuvent cependant être très importantes, ce qui souligne encore la nécessité de bien capter les phénomènes de mortalité et de sénescence à l'échelle des placettes.

Les trois derniers éléments de la section *Résultats* (voir 9,2), soit l'incapacité de simuler la possibilité d'un des groupes de calcul ainsi que les fluctuations

des volumes prévus et disponibles, découlent en fait des limites qui caractérisent l'information utilisée pour le calcul de la possibilité. Dans le calcul de *Sylva II*, ces limites sont masquées, entre autres, par l'utilisation systématique des propriétés moyennes de la strate. Il semble important que les calculs de *Sylva II* tiennent compte et respectent les limites posées par la quantité réelle d'informations par unité de superficie du territoire ou de volume marchand ou, inversement, que cette densité d'information provenant des différentes formes d'inventaire soit ajustée directement en fonction des besoins de précision pour le calcul de la possibilité.

Les perturbations sont volontairement omises du présent exercice vu la complexité du problème qu'elles soulèvent. Cependant, une analyse conceptuelle nous permet de constater que l'incertitude entourant les perturbations générerait une imprécision asymétrique autour de la valeur prédite de possibilité. En d'autres termes, un feu va généralement, mais pas toujours, réduire la possibilité. L'inclusion des imprécisions dues aux perturbations, par le biais de l'imprécision sur les surfaces atteintes par année par exemple, aurait donc un impact différent des autres sources d'incertitudes. De plus, il existe un certain corps de connaissances sur l'interaction entre les feux et la récolte potentielle annuelle (*annual allowable cut*), suggérant que l'impact de la perturbation varie selon que la récolte réelle se rapproche ou non du potentiel annuel. Ce genre de travail serait certainement à réexaminer.

9.4 RECOMMANDATIONS

À la lumière des analyses précédentes, nous recommandons les actions suivantes :

- Améliorer notre capacité de prédire la mortalité des arbres à l'échelle de la placette.
- Quantifier les imprécisions liées aux différents éléments du calcul de possibilité, y compris l'impact des perturbations et la trajectoire de croissance des strates de 7 m et moins.
- Intégrer au calcul de la possibilité forestière la capacité de propager et d'afficher les imprécisions liées à l'estimation ou à la simulation de différents états ou processus (volume initial, croissance, mortalité, composition et intervalle de retour, etc.).

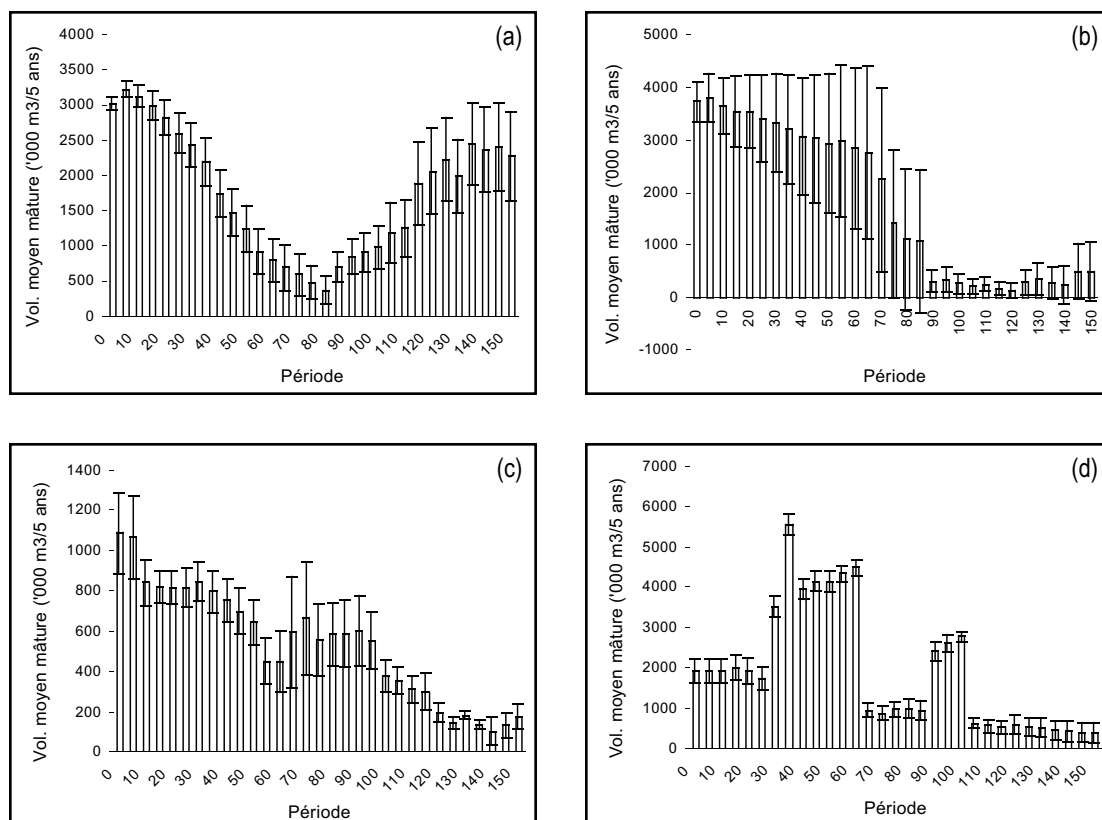


FIGURE 2 Volumes marchands matures des essences principales de quatre groupes de calcul : résineux - SEPM (a), mélangé à dominance résineuse - MRFI (b), mélangé à dominance de feuillus intolérants - MFI (c) et peuplier faux-tremble - PEU (d). Les volumes correspondent à des valeurs moyennes avant coupe par période de 5 ans, ramenés à une superficie de production de 10 000 ha. Les intervalles ajoutés au sommet des barres de l'histogramme donnent l'imprécision (intervalle de confiance à 95 %) associée à ce volume.

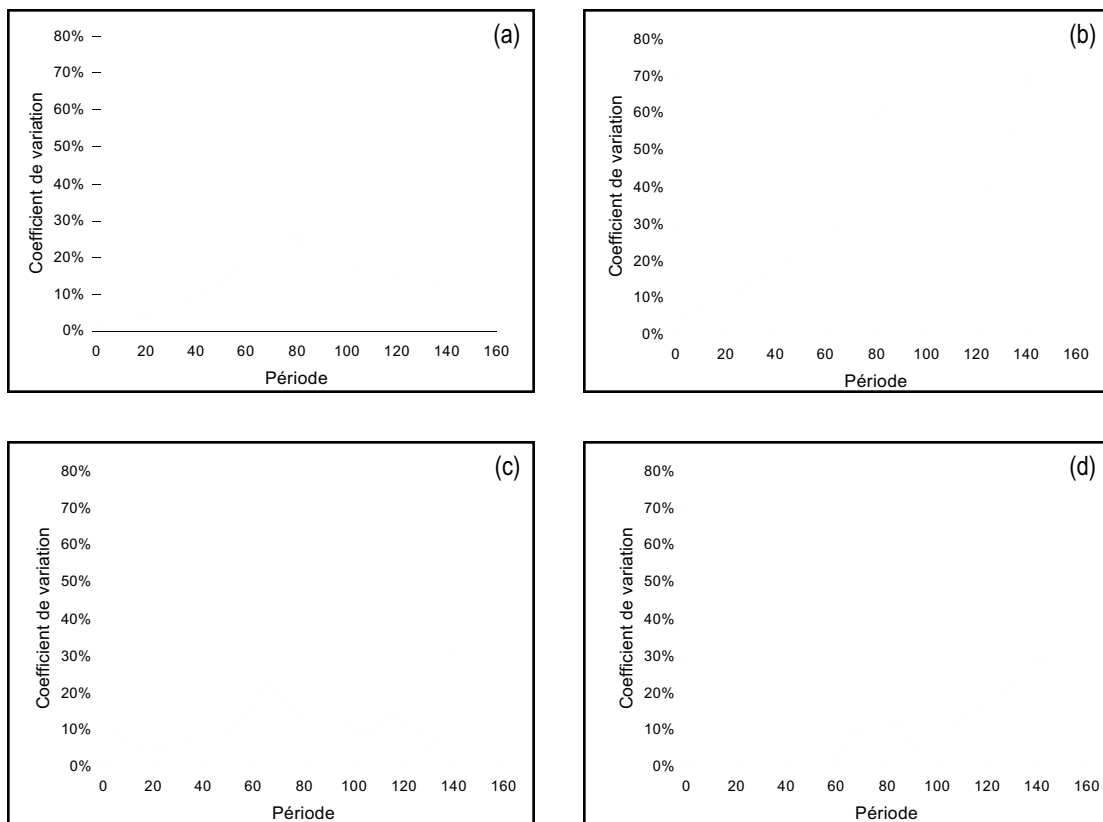


FIGURE 3 Évolution de l'imprécision relative (variation/moyenne) du volume marchand mature des essences principales des quatre groupes de calcul SEPM (a), MRFI (b), MFI (c) et PEU (d).

AVIS SCIENTIFIQUE EXPRIMÉ
PAR UN EXPERT INDÉPENDANT

Le Comité a sollicité l'opinion d'un expert indépendant, nullement lié au processus québécois du calcul de la possibilité forestière dans le but d'évaluer certaines prémisses fondamentales au calcul de la possibilité forestière tel que pratiqué au Québec. Il s'agit en l'occurrence du Dr Joseph Buongiorno, auteur de nombreux ouvrages d'autorité en la matière (p. ex. voir : Buongiorno et Gilles 2003, *Decision methods for Forest Resource Management*. Academic Press, 439 p.). Le Dr Buongiorno enseigne au *Département d'écologie et d'aménagement des forêts* de l'Université du Wisconsin (Madison). Le Comité lui a soumis des questions concernant le concept de forêt normale, la durée de l'horizon de simulations, la révision quinquennale des calculs de possibilité, les limites des modèles de croissance en usage, l'impact des erreurs sur les calculs de possibilité, les modèles de régénération, la nécessité d'inclure des considérations spatiales dans les calculs et finalement les points forts et les points faibles de l'approche québécoise.

Le concept de forêt normale

Selon le Dr Buongiorno, le concept de la forêt normale est un des plus anciens en aménagement forestier et bien qu'il soit encore utile, il est un peu périmé. Si la forêt normale est une condition suffisante du rendement soutenu et d'un état constant des stocks, ce n'est toutefois pas une condition nécessaire. En un sens, il existe une infinité d'états constants des stocks et de rendements soutenus possibles, aussi bien en ce qui concerne la forêt équienne qu'inéquienne. Par conséquent, l'échelle à laquelle doit s'appliquer le concept de forêt normale varie également et va d'une très petite surface (l'équivalent de quelques hectares) à une superficie beaucoup plus importante, comme une région ou même une province. Dans tous les cas, il faut éviter de trop s'attacher au concept en question et viser un aménagement plus souple et une gestion adaptée à la situation.

La durée de l'horizon de simulation

Les projections à très long terme sont utiles pour analyser les effets de la gestion forestière sur, par exemple, la productivité ou la succession des peuplements ou des essences. Des simulations à moyen terme (une cinquantaine d'années) permettent de prévoir le potentiel productif et l'évolution générale des stocks d'une région où l'on applique un rendement soutenu. Elles sont

utiles entre autres pour planifier la réponse aux besoins de l'industrie. Les simulations à court terme (cinq à dix ans) permettent de juger des effets, sur le plan forestier, des interventions courantes et de les ajuster au besoin. Ainsi, la longueur des simulations peut varier et dépend des questions auxquelles on cherche à obtenir réponse. Au bout du compte, bien que le calcul de la possibilité forestière se fasse souvent à très long terme, on doit chercher à mettre en place des formules pratiques permettant de traduire concrètement cette possibilité sur le plan opérationnel.

La révision quinquennale des calculs de possibilité et l'aménagement adaptatif

Un aménagement adaptatif peut être défini comme un traitement ou une action correspondant à chaque état possible du peuplement. Il exige une définition du peuplement (ou une description) qui soit fonction, entre autres choses, des buts de l'aménagement. Cependant, l'inventaire forestier est une opération coûteuse et il est essentiel de choisir une intensité d'échantillonnage (placettes) et une fréquence qui correspondent aux besoins de l'aménagement. Un aménagement adaptatif, théoriquement, correspond à des traitements optimaux pour chaque état du peuplement en tenant compte d'un ensemble de diverses variables (prix, variantes écologiques, etc.).

Il est important de refaire les calculs tous les cinq ans car il est probable que l'exploitation et les événements naturels des cinq dernières années ont été différents de ceux qui avaient été pris en considération lors du calcul précédent. Par ailleurs, les contraintes économiques et sociales dont on avait tenu compte ont peut-être changé. Enfin, un élément clé qui permet de déterminer le besoin d'un nouveau calcul est la différence entre le niveau des stocks prévu par le calcul précédent et le niveau actuel fourni par un inventaire ou tout autre source d'information pertinente.

Les limites des modèles de croissance en usage

On dispose rarement de modèles de croissance spécifiques à chaque espèce ou chaque emplacement et il est légitime de se servir de ce qui est disponible (par exemple, appliquer le modèle pour une espèce à une autre espèce) à condition de reconnaître la possibilité d'erreur. Une solution possible est d'introduire un « facteur de sécurité » pour éviter de surestimer la possibilité forestière. Cette approche peut être appliquée à d'autres paramètres, comme le taux de mortalité ou le taux de régénération ou le taux de passage à la futaie. La philosophie générale consisterait donc à être « conservateur » dans tous les cas où l'on fait une extrapolation.

On peut concevoir le développement de modèles généraux, applicables à une très grande diversité de peuplements et ces modèles peuvent effectivement être calibrés à partir de placettes permanentes remesurées tous les dix ans. Au Québec, une difficulté majeure des modèles utilisés, surtout pour les forêts inéquiennes, est l'absence de modèles de régénération. Il est hardi de supposer que la régénération naturelle va nécessairement remplacer les arbres enlevés et un effort devrait être consenti pour étudier les processus de régénération, aussi bien en forêt équienne qu'inéquienne.

L'impact des erreurs sur les calculs de possibilité

Les calculs peuvent être affectés considérablement par les erreurs relatives à l'état de la ressource et aux hypothèses et paramètres utilisés pour faire des prévisions. Deux approches sont possibles pour tenir compte des erreurs et du risque : 1) une analyse de sensibilité avec un modèle déterministe, tel que celui qui est utilisé couramment, 2) le développement et l'utilisation d'un modèle pleinement stochastique tenant compte explicitement des erreurs et du risque. La première approche est probablement la plus simple et la mieux adaptée à la méthodologie courante. Cette analyse de sensibilité peut être plus ou moins développée et la plus complète demanderait le développement d'un ensemble de scénarios (optimiste, pessimiste et moyen).

Les modèles de régénération

Les modèles de régénération sont essentiels pour faire des prévisions à long terme et en principe les modèles d'usage courant sont ouverts à l'introduction d'éléments portant sur la régénération. L'hypothèse actuellement utilisée concernant la régénération en forêt équienne ne semble pas claire et celle concernant la forêt inéquienne est très simplifiée. Une analyse complète de la régénération et du cycle de production des peuplements doit couvrir leurs aspects économiques et financiers, car la régénération, en forêt équienne en particulier, représente une partie importante des coûts de la production forestière. Il s'ensuit que la possibilité forestière dépend en partie de la rentabilité des investissements en régénération. En outre, un traitement complet de la régénération devrait reconnaître sa nature très aléatoire.

Considération spatiale dans la planification

On doit d'abord décider à quel niveau géographique il faut présenter les données sur la possibilité forestière, un choix qui implique des considérations économiques, politiques, écologiques et sociales. Pour diverses raisons, notamment parce qu'on peut alors juger plus facilement de la valeur de certaines hypothèses utilisées, il vaut mieux travailler à un niveau local plutôt qu'à une

très grande échelle, en partant d'unités administratives logiques et bien définies spatialement. Une approche possible serait de développer une typologie des peuplements applicable aux forêts du Québec en général, en y rattachant toute l'analyse de la possibilité forestière et des conséquences de diverses stratégies d'aménagement.

La planification au niveau stratégique s'attarde aux décisions ou aux tendances observées à une très grande échelle (par exemple, le Québec) et, à ce niveau, la discussion se fait surtout en termes généraux. Cependant, les considérations stratégiques doivent être basées sur des données bien localisées (placettes préférentiellement permanentes sur lesquelles tous les arbres sont mesurés). Quand ces données sont intégrées au calcul, il est clair que leur position spatiale est importante car elle détermine la contribution de la zone représentée par chaque placette à la possibilité globale.

Les points forts et les points faibles de l'approche québécoise

Les points forts de l'approche québécoise résident dans les principes généraux qui sont appliqués, mais il faut noter l'absence d'une documentation de compréhension aisée par rapport à la méthode appliquée. En outre, une lacune importante est le fait que l'approche en question est centrée sur le volume et ne traite que secondairement de la qualité des bois. Par exemple, les considérations économiques sur la valeur actuelle et future des produits semblent faire défaut. Il est cependant essentiel que les aspects économiques et financiers de la production forestière soient traités avec la même attention lors du calcul de la possibilité forestière que les aspects physiques et écologiques. Enfin, il serait souhaitable de reconnaître explicitement le risque dans le calcul de la possibilité forestière, soit en introduisant des éléments aléatoires dans les modèles employés, soit par le biais d'analyses de sensibilité portant sur les hypothèses utilisées et les paramètres clés des simulations.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le processus du calcul de la possibilité forestière pour un groupe d'essences principales objectif d'une aire commune est affecté par de nombreuses sources d'imprécision. Les travaux du Comité ont permis d'en identifier plusieurs, de les documenter et de les étudier. Certaines de ces imprécisions sont liées directement aux données d'inventaire. D'autres sont associées à l'estimation des paramètres des modèles de croissance ou aux valeurs qu'ils prédisent. Dans l'état actuel des inventaires et des modèles de croissance, le système ne permet pas formellement d'estimer l'imprécision associée aux estimations des volumes marchands des peuplements ou à celle de leurs prédictions. Les effets sur la possibilité forestière des imprécisions associées aux hypothèses sur les peuplements des strates de retour après perturbation et aux écarts inévitables entre les plans d'aménagement et leur réalisation sont aussi impossibles à estimer parce qu'hypothèses et plans d'aménagement dépendent des choix d'un expert. Pourtant le calcul de la possibilité s'est avéré très sensible aux variations de ces éléments.

Les travaux du Comité révèlent que les imprécisions associées aux données d'inventaire et aux modèles de croissance ne peuvent être ignorées si l'on veut fournir des estimateurs statistiquement plus rigoureux. En particulier, le plan de sondage de l'inventaire ne garantit pas que les estimateurs des volumes et de la composition en essences des peuplements forestiers possèdent toutes les qualités auxquelles on serait en droit de s'attendre dans un tel sondage. Il ne produit pas des estimateurs valides de l'erreur quadratique moyenne de ces estimateurs qui puisse être propagée à l'estimation de la possibilité. De plus, les travaux suggèrent un déséquilibre entre l'information disponible dans les inventaires, la complexité des modèles de croissance et la finesse attendue du calcul de la possibilité.

Les imprécisions liées aux modèles de croissance qui permettent de prédire l'évolution du volume marchand des essences dans le temps ont été analysées. Les comparaisons entre les valeurs observées et prédites dans les placettes permanentes ont révélé que ces modèles sont biaisés, dans certains cas, et que la variance de leurs prédictions augmente avec le temps. De plus, la complexité des modèles de croissance ne permet pas de propager les imprécisions des estimations issues des inventaires aux prédictions des volumes pendant toute la vie d'un peuplement.

Comme en témoignent les nombreuses analyses de sensibilité effectuées, les hypothèses posées dans les scénarios d'aménagement et les interventions sylvicoles prévues par ces derniers peuvent avoir des impacts sur l'estimation de la possibilité forestière, impacts qui dépassent souvent, parfois même de beaucoup, ceux des imprécisions des données d'inventaire et des modèles de croissance. Par exemple, les volumes exploitables prédits sur une grande partie de l'horizon de simulation de 150 ans dépendent étroitement des hypothèses de l'aménagiste sur la composition initiale, l'âge et la dynamique des peuplements de moins de 7 m, et sur celles des strates de retour après perturbation. Ces fortes sensibilités des volumes exploitables et de la possibilité aux imprécisions de ces hypothèses soulignent la nécessité d'estimer la probabilité des divers peuplements de retour et de leurs délais de régénération. L'étude de la sensibilité aux interventions sylvicoles prévues dans les plans d'aménagement a permis d'évaluer l'impact, sur la possibilité forestière, des écarts entre le plan d'aménagement et les travaux réalisés sur le terrain.

Le Comité juge donc qu'il est important de développer des méthodes pour quantifier les imprécisions liées aux différents intrants (mesures, modèles, hypothèses) du calcul de la possibilité forestière, et pour permettre la propagation de ces imprécisions dans l'ensemble de ce calcul. Ces imprécisions offrent une source d'information importante pour interpréter la possibilité forestière estimée et pour identifier les améliorations à apporter à la chaîne de connaissances menant à ce calcul. Reste un large éventail d'intrants au calcul de la possibilité, y compris des éléments omis, tels que l'impact des perturbations naturelles ou les considérations économiques, pour lesquels les imprécisions ne peuvent présentement être calculées, faute de modèles ou de données empiriques. En l'absence de tels outils, le Comité considère que l'approche par scénarios, où plusieurs possibilités forestières sont calculées sous différents groupes d'hypothèses, serait utile. Il est cependant clair que l'amélioration du calcul de la possibilité forestière passe par l'estimation des imprécisions aux principales étapes du processus et par leur intégration dans un estimateur global. Les travaux réalisés par le Comité donnent déjà des pistes intéressantes pour progresser dans cette direction.

Compte tenu des considérations qui précèdent, nous recommandons :

1. que le plan de sondage et les estimateurs des inventaires forestiers soient révisés à la lumière des développements récents en théorie de l'échantillonnage, afin de :
 - s'assurer que l'échantillon de placettes soit représentatif de la population des peuplements forestiers ;

- développer des estimateurs sans biais des paramètres pertinents au calcul de la possibilité forestière et de l'imprécision de ces estimateurs ;
- 2. que les modèles de croissance soient simplifiés afin que les imprécisions de leurs intrants puissent être propagées aux prédictions qu'ils génèrent ;
- 3. que les efforts investis aux différentes phases du calcul soient répartis afin que le niveau de précision des estimateurs atteint à une étape quelconque s'harmonise avec celui des autres étapes ;
- 4. que le calcul de la possibilité forestière se prête à l'analyse de sa sensibilité aux décisions de l'aménagiste et permette d'estimer et de propager les imprécisions de ses composantes ;
- 5. que la recherche soit encouragée dans les domaines suivants :
 - la théorie de l'échantillonnage et le développement de méthodes d'estimation adaptées aux inventaires forestiers ;
 - la modélisation de la succession forestière ;
 - la modélisation de la croissance des peuplements, et la prédiction à long terme de leur volume ;
 - la dynamique des perturbations naturelles (leur étendue, leur intensité, leur fréquence) et son impact sur la possibilité forestière ;
 - l'impact des contraintes sociales et opérationnelles et des opportunités économiques sur la possibilité forestière.

GLOSSAIRE¹

Accroissement annuel courant :

Moyenne annuelle de l'accroissement en volume d'un ou de plusieurs arbres pour une période donnée.

Accroissement annuel moyen :

Moyenne annuelle de l'accroissement en volume d'un ou de plusieurs arbres depuis leur naissance jusqu'à l'année de la mesure.

Accroissement quinquennal :

Croissance en hauteur (m) des 5 dernières années complètes.

Accroissement quinquennal (méthode de l') :

Méthode d'échantillonnage pour les inventaires d'intervention (inventaire avant traitement) et pour les suivis des interventions forestières (après martelage, après coupe et années antérieures).

Âge de bris :

Âge à partir duquel le volume marchand du peuplement baisse sous un seuil d'exploitabilité économique fixé par l'aménagiste.

Âge d'exploitabilité :

Âge auquel un peuplement équienne pur peut être récolté étant donné les objectifs d'aménagement fixés.

Âge d'exploitabilité absolu :

Âge d'exploitabilité fixé par l'aménagiste de façon à ce que le peuplement produise le plus grand volume marchand de bois dans un minimum de temps. Cet âge correspond à la rencontre des courbes de croissance annuelle courante et moyenne. Pour les courbes de Pothier et Savard (1998), l'âge d'exploitabilité absolu est l'âge auquel l'accroissement annuel moyen atteint son maximum.

Aire commune : Voir *Unité d'aménagement forestier*.

Aménagement forestier :

Application pratique des théories de la gestion forestière à l'administration d'une forêt et à la conduite des exploitations et des travaux à y exécuter, en vue d'objectifs à atteindre.

Arbre échantillon (Syn.: arbre d'étude, étude d'arbre) :

Arbre d'une placette d'inventaire dont on a mesuré la hauteur et l'âge en plus du dhp.

¹ Plusieurs définitions de ce glossaire sont tirées de CERFO (2004, Annexe 1).

Arbre étude : Voir *Arbre échantillon*

Biais :

Différence entre la valeur réelle d'un paramètre et la moyenne de son estimateur par rapport au plan de sondage ou au modèle de prédiction.

Bootstrap :

Simulation de la distribution d'échantillonnage d'une statistique basée sur le rééchantillonnage avec remise d'un échantillon réel.

CAAF : Voir *Contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier*.

Calcul de la possibilité forestière (CPF) :

Calcul basé sur le volume, l'accroissement net et l'âge des peuplements qui permet d'estimer le volume maximum de bois qu'il est possible de récolter annuellement et à perpétuité dans une unité d'aménagement sans épuiser la ressource.

Codominant :

Arbre dont la cime occupe la strate supérieure du couvert, mais dont la croissance est limitée par les dominants et les autres codominants.

Contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier (CAAF) :

Au Québec, contrat qui confère à son bénéficiaire le droit d'obtenir annuellement, sur un territoire déterminé, un permis d'intervention pour la récolte d'un volume de bois ronds d'une ou de plusieurs essences.

Coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) :

Coupe lors de laquelle la régénération préétablie et les sols sont protégés en minimisant les superficies affectées par le déplacement de la machinerie.

Coupe partielle :

Coupe enlevant une partie des arbres d'un peuplement.

CPF : Voir *Calcul de la possibilité forestière*.

Croissance internodale (méthode de) :

Méthode d'évaluation de l'indice de qualité de station (IQS) pour les jeunes peuplements à partir de données d'âge et de hauteur d'arbres dominants mesurés sur le terrain. L'IQS est obtenu à l'aide de modèles mathématiques ajustés pour des peuplements de 50 ans et moins, notamment pour l'épinette noire, le pin gris et le sapin baumier.

Dhp : Voir *Diamètre à hauteur de poitrine*.

Diamètre à hauteur de poitrine (dhp) :

Diamètre d'un arbre sur pied à 1,3 m du sol.

Distribution d'échantillonnage :

Distribution d'une statistique sous échantillonnage répété de la population.

Dominant :

Arbre dont la cime occupe la strate supérieure du couvert et dont la croissance est optimale.

Éclaircie :

Coupe partielle pratiquée dans un peuplement non arrivé à maturité, destinée à accélérer la croissance en dhp des arbres restants et, par une sélection convenable, à améliorer la moyenne de leur forme, sans cependant rompre la permanence du couvert.

Éclaircie commerciale :

Éclaircie où l'on coupe des tiges marchandes.

Éclaircie précommerciale :

Éclaircie où l'on coupe des tiges non marchandes.

Équienne :

Se dit d'une forêt ou d'un peuplement où tous les arbres ont à peu près le même âge.

Erreur d'échantillonnage :

Différence entre l'estimation d'un paramètre à l'aide d'un échantillon et sa valeur réelle pour la population toute entière.

Erreur de prédiction :

Différence entre la valeur prédite par un modèle de croissance et la valeur réelle.

Erreur quadratique moyenne :

Moyenne, pondérée par la probabilité de sélection de l'échantillon, des carrés des écarts entre l'estimation du paramètre à l'aide de cet échantillon et le paramètre lui-même.

Essences principales objectif :

Groupe d'essences désirables dans un groupe de calcul sur lequel le calcul de la possibilité est fait.

Estimateur :

Fonction des observations d'un échantillon conçue pour estimer un paramètre de la population représentée par l'échantillon.

Estimateur biaisé :

Estimateur dont la moyenne sous échantillonnage répété n'est pas égale au paramètre que l'on cherche à estimer.

Estimateur sans biais :

Estimateur dont la moyenne sous échantillonnage répété est égale au paramètre que l'on cherche à estimer.

Étalement :

Dans les peuplements récoltés par jardinage, la répartition sur plusieurs périodes de 5 ans des volumes à couper pour exécuter un certain traitement.

Étude d'arbre : Voir *Arbre échantillon*.**Groupe de calcul :**

Regroupement de séries d'aménagement basé sur la présence en quantités exploitables d'essences principales objectif et à l'intérieur duquel on applique l'équation de conservation.

Hauteur dominante :

Hauteur moyenne des 100 plus gros arbres (en dhp) à l'hectare d'une essence ou d'un groupe d'essences dans un peuplement.

Horizon de simulation :

Période au cours de laquelle la croissance des volumes marchand est simulée afin de calculer le niveau de récolte soutenable.

Hypothèse d'aménagement :

Valeur d'un phénomène ou d'un état de la forêt estimée par un processus expert plutôt que par des mesures terrain ou par un modèle empirique, faute de données de base ou de modèles appropriés.

IDR : Voir *Indice de densité relative*.**Imprécision :**

Écart entre une valeur estimée et une valeur réelle qui peut comporter un biais et une variation.

Indice de qualité de station (IQS) :

Hauteur des arbres dominants d'une essence dans un peuplement de 50 ans.

Indice de densité relative (IDR) :

Rapport entre le nombre de tiges observées d'un peuplement et le nombre maximal de tiges que ce peuplement pourrait comporter pour un même diamètre moyen.

Inéquienne :

Se dit d'une forêt ou d'un peuplement composé d'arbres d'âges apparemment différents.

Intermédiaire :

Arbre dont la cime occupe la strate médiane du couvert et dont la croissance est limitée par les dominants et les codominants.

IQS : Voir *Indice de qualité de station*.

Jardinage :

Modalité de récolte et de régénération des peuplements inéquiennes qui consiste à prélever les arbres sur une base individuelle ou par petits groupes.

Modèle de croissance :

Représentation mathématique de la croissance en volume, marchand ou non, d'un arbre ou d'un groupe d'arbres d'une essence ou d'un type donné.

Modèle « par courbes » (Syn : modèle « par tables ») :

Modèle de croissance décrivant la progression du volume marchand à l'hectare en fonction du temps pour une essence, une classe de fertilité et une classe de densité données.

Modèle « par taux » :

Modèle qui fait croître ou mourir des arbres en les faisant passer d'une classe (de dhp, p. ex.) à une autre selon des taux de passage.

Modèle « de plantations » :

Modèle de croissance conçu pour les plantations.

MODÉLISA : Voir *Placette actualisée*.

Modélisation :

Action de concevoir et d'élaborer un modèle et d'en estimer les paramètres à l'aide d'observations.

Nombre de calculs :

Nombre de rotations successives faisant appel aux taux de passage pour faire croître, entre les prélèvements, une table de peuplement donnée.

Paramètre :

Caractéristique d'une population que l'on cherche à estimer (p. ex. les coefficients de l'équation d'un modèle de croissance, le volume marchand d'une essence dans un territoire).

103

Période critique :

Dans une simulation avec l'outil *Sylva II*, période de cinq ans dans l'horizon de simulation au cours de laquelle le volume exploitable est le plus faible. Le volume exploitable de la période critique fixe la récolte

annuelle maximale à l'échelle du groupe de calcul et de l'unité d'aménagement.

Peuplement forestier :

Partie homogène d'une forêt, identifiée sur une carte photo-interprétée par un polygone.

Placette :

Unité d'échantillonnage circulaire des inventaires forestiers du Québec d'une superficie maximale de 400 m².

Placette actualisée :

Placette établie d'un inventaire antérieur dont les caractéristiques sont prédites pour l'inventaire en cours à l'aide du modèles de croissance appelé MODÉLISA.

Placette établie :

Placette effectivement visitée et mesurée lors d'un inventaire donné.

Placette permanente :

Placette établie remesurée à chaque inventaire.

Placette recrutée :

Placette d'une strate regroupée où le nombre de placettes établies ou actualisées est insuffisant ou nul, à laquelle on impute les observations faites sur une placette d'une autre unité de sondage du même inventaire ou dans un inventaire précédent dans une strate cartographique de mêmes caractéristiques.

Placette temporaire :

Placette établie lors d'un inventaire, visitée et mesurée une seule fois.

Possibilité forestière :

Volume marchand d'un groupe d'essences principales objectif que l'on peut récolter chaque année à perpétuité dans une aire commune ou une unité d'aménagement sans épuiser la ressource. Une définition plus complète est donnée à la section A1.1.3.

Recrutement :

Selon le contexte, action de créer une placette dans une strate regroupée non échantillonnée en lui imputant les observations d'une autre placette de mêmes caractéristiques, ou passage d'un arbre de la classe des gaules à celle des arbres marchands de 9 cm de dhp ou plus.

Révolution (syn. anglais : Rotation) :

Cycle de régénération, de croissance et d'exploitation d'un peuplement.

Rotation :

Période de temps entre deux interventions sylvicoles dans un peuplement forestier.

Scénario d'évolution :

Processus préétabli qui prévoit, par période de 5 ans, les rendements en essences de strates non décrites par une table de peuplement.

Scénario sylvicole :

Séquence de traitements sylvicoles applicables, sans contraintes, à chacune des strates d'aménagement, ainsi que les conditions régissant leur application.

Séries d'aménagement :

Ensemble de strates regroupées de même composition, et de même fertilité, mais d'âges différents. La série d'aménagement est un regroupement écologique qui suppose une réaction similaire de toutes les strates qui la composent à un traitement donné (p. ex. même strate de retour ou même délai de régénération après coupe).

Sous-estimation :

Estimation plus petite que la valeur réelle du paramètre estimé. Une quantité sous-estimée a un biais positif.

Statistique :

Fonction des observations d'un échantillon conçue pour estimer un paramètre de la population à l'origine de l'échantillon.

Strate de retour :

Hypothèse d'aménagement donnant, pour une série d'aménagement donnée, la composition de la strate qui sera régénérée après une coupe totale.

Strate cartographique :

Ensemble homogène de peuplements forestiers identifiés sur une carte issue de la photographie aérienne et qui ont tous les mêmes caractéristiques photo-interprétées.

Strate regroupée :

Ensemble de strates cartographiques de même composition, de même classe de densité-hauteur et similaires selon d'autres critères.

Succession forestière :

Remplacement progressif d'un ensemble d'essences forestières par un autre.

Supprimé :

Arbre dont la cime occupe la strate inférieure du couvert, et dont la croissance est limitée par les dominants, les codominants et les intermédiaires.

Surestimation :

Estimation plus grande que la valeur réelle du paramètre estimé. Une quantité surestimée a un biais négatif.

Survie :

Accroissement en volume des tiges vivantes au cours d'une période donnée.

Tables de production (syn. : Tables de rendement) :

Tables des volumes à l'hectare prédits par les modèles « par courbes » en fonction de l'âge du peuplement, de son IQS, de son IDR et de l'essence.

Tables de rendement : Voir *Tables de production*.

Tarif de cubage général :

Modèle empirique de prédiction du volume marchand d'une tige d'une essence donnée, à partir de son dhp et de sa hauteur.

Tarif local :

Modèle empirique de prédiction de la hauteur d'une tige d'une essence donnée à partir de son dhp et de certaines caractéristiques de la placette où elle se trouve. N.B. : Le terme « tarif » n'est pas strictement approprié, mais il est couramment utilisé.

Taux de passage :

Probabilité qu'un arbre passe d'une classe (p. ex. de dhp) à une autre dans le modèle par taux.

Tige :

Axe principal d'un arbre à partir duquel les bourgeons et les pousses se développent.

Unité d'aménagement forestier (syn. : Aire commune) :

Subdivision territoriale pour laquelle un rendement annuel est établi et sur laquelle s'exercent, en tout ou en partie, plusieurs CAAF.

Unité de simulation :

Partie d'une strate regroupée d'inventaire qui se trouve dans un groupe de calcul d'une aire commune.

Unité de sondage :

L'unité territoriale dans laquelle est planifié l'inventaire forestier.

Variance :

Moyenne des carrés des écarts entre un élément d'une population et la moyenne de tous les éléments de cette population.

Variation :

Écart qui contribue à une variance.

Virée :

Suite de 2 à 7 placettes le long du parcours en forêt d'une équipe d'inventaire.

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1</i>	Schéma de la planification stratégique de l'aménagement forestier au Québec	10
<i>Figure 2</i>	Volumes marchands matures des essences principales de quatre groupes de calcul	88
<i>Figure 3</i>	Évolution de l'imprécision relative (variation/moyenne) du volume marchand mature des essences principales des quatre groupes de calcul SEPM (a), MRFI (b), MFI (c) et PEU (d). . . .	89



RÉFÉRENCES

Anonyme, 2003. *Diagnostic sylvicole*. Région de la Mauricie et du Centre-du-Québec, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec.

Cochran, W.G. 1977. *Sampling Techniques*. John Wiley & Sons, New York, 428 p.

Draper, N.R. et Smith, H. 1998. *Applied Linear Regression Analysis*. 3^e édition, John Wiley & Sons, New York.

Efron, B. et Tibshirani, R.J. 1998. *An Introduction to the Bootstrap*. 2^e édition, Chapman & Hall / CRC, New York, 436 p.

Kmenta, J. 1986. *Elements of Econometrics*, 2^e édition, Macmillan Publishing Company, New York.

Manly, B. 1997. *Randomisation, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology*, 2^e édition, Chapman & Hall, Londres, 399 p.

Pothier, D. et Savard, F. 1998. *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières du Québec*. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Québec, 183 p.

Reedman, L. 2004. *Statistics Canada Methodology Report on Forestry Biomass Estimation*. Rapport non publié.

Wolter, K.M. 1985. *Introduction to Variance Estimation*. Springer-Verlag, New York, 427 p.

