

Enjeux et solutions pour la sylviculture intensive de plantations dans un contexte d'aménagement écosystémique

par Martin Barrette^{1,*}, Marc Leblanc², Nelson Thiffault^{1,3}, Alain Paquette⁴, Luc Lavoie⁵, Louis Bélanger³, Frédéric Bujold⁶, Lévis Côté⁷, Jean Lamoureux⁸, Robert Schneider⁹, Jean-Pierre Tremblay^{3,10}, Sylvie Côté¹¹, Yan Boucher^{1,3} et Marie-Ève Deshaies³

RÉSUMÉ

Les plantations forestières représentent un outil sylvicole reconnu pour assurer un approvisionnement en matière ligneuse qui répond aux attentes de la société envers l'aménagement durable des forêts. Toutefois, elles font aussi partie du scénario sylvicole qui a le plus grand potentiel d'artificialisation de la forêt naturelle. Les objectifs de la sylviculture intensive de plantations peuvent alors paraître, de prime abord, en contradiction avec ceux de l'aménagement écosystémique. Nous décrivons le processus par lequel nous avons défini et documenté des enjeux associés aux plantations et proposé des pistes de solutions pour que la sylviculture intensive de plantations puisse s'intégrer à l'aménagement écosystémique. Nous avons identifié des enjeux relatifs à l'ampleur, à la localisation et à l'agencement spatial des plantations, aux attributs clés et à la résilience de la forêt naturelle, à l'acceptabilité sociale, ainsi qu'à la productivité et à la rentabilité des plantations. Nous avons également proposé des pistes de solutions qui permettraient de réaliser les plantations dans un contexte d'aménagement écosystémique, telles que la modulation des traitements sylvicoles pour augmenter la naturalité des plantations, la réalisation des traitements de manière à obtenir la production attendue, ainsi qu'un déploiement dans le paysage qui intègre les préoccupations des parties prenantes et qui considère la naturalité de la matrice forestière.

Mots clés : sylviculture intensive, plantation forestière, rendement, aménagement écosystémique, naturalité, agencement spatial, biodiversité

ABSTRACT

Forest plantations are recognized as a silvicultural tool for ensuring a timber supply that meets public expectations regarding sustainable forest management. However, they are also part of the silvicultural scenario that shows the greatest potential for the artificialization of natural forests. From a firsthand perspective, intensive plantation silviculture objectives may appear antagonistic to those of ecosystem management. Here we describe the process through which we defined and documented plantation issues, then propose potential solutions to allow the integration of intensive plantation silviculture into ecosystem management. We identify issues related to the scale, localization and spatial arrangement of plantations, the key attributes and resilience of natural forests, social acceptability, and the productivity and profitability of plantations. We also propose potential solutions likely to help manage plantations within a context of ecosystem management. These include modulating silvicultural treatments to enhance the naturalness of plantations, conducting treatments to obtain expected production rates, and ensuring that plantations are deployed across the landscape in a manner that integrates stakeholder concerns and considers the naturalness of the forest matrix.

Keywords: intensive silviculture, plantation, yield, ecosystem management, naturalness, spatial arrangement, biodiversity

¹Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec, QC;

²Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers, Québec, QC

³Centre d'étude de la forêt, Université Laval, Québec, QC

⁴Réseau Ligniculture Québec et Centre d'étude de la forêt, Université du Québec à Montréal, Montréal, QC

⁵Conférence régionale des élus du Bas-St-Laurent, Rimouski, QC

⁶Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des politiques, des programmes et des partenariats, Québec, QC

⁷Retraité. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Région du Bas-St-Laurent, Rimouski, QC

⁸Retraité. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, Région du Bas-Saint-Laurent, Rimouski, QC

⁹Centre d'étude de la forêt, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, QC

¹⁰Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, QC

¹¹Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc., Québec, QC

*Auteur de correspondance. Courriel : martin.barrette@mffp.gouv.qc.ca

Introduction

Les plantations forestières représentent un outil sylvicole reconnu pour assurer un approvisionnement en matière ligneuse qui répond aux attentes de la société envers l'aménagement durable des forêts (Park et Wilson 2007, Brockerhoff *et al.* 2008). En effet, les plantations ont un rendement ligneux élevé qui peut surpasser celui des forêts régénérées naturellement (Prégent *et al.* 2010, Paquette et Messier 2010, Thiffault *et al.* 2013). En raison de leur productivité, les plantations serviront de plus en plus pour subvenir aux besoins en bois; selon la FAO (2006), elles pourraient fournir jusqu'à 75 % de l'approvisionnement mondial d'ici 2050. Les plantations peuvent aussi aider à restaurer la biodiversité, notamment lors de la plantation d'espèces en raréfaction, de la remise en production de sites mal régénérés ou de l'afforestation de terres qui ont subi une déforestation (Stephens et Wagner 2007, Brockerhoff *et al.* 2008, Paquette et Messier 2010). Toutefois, les plantations font aussi partie du scénario sylvicole qui a le plus grand potentiel d'artificialisation de la forêt naturelle (Park et Wilson 2007, Brockerhoff *et al.* 2008). Il en émerge un défi d'acceptabilité sociale (Howe *et al.* 2005, Dare *et al.* 2011) qui interpelle même les organismes de certification environnementale (FSC 2009, Klooster 2010).

Boîte 1. La forêt naturelle

La forêt naturelle n'a pas subi de transformation majeure résultant de l'exploitation industrielle à grande échelle. On la nomme aussi « forêt préindustrielle ». Sa description n'est pas statique, mais tient compte de sa « variabilité », c'est-à-dire des fluctuations qu'elle subit au fil du temps sous l'influence des processus naturels (p. ex. : perturbations naturelles, mortalité et régénération). Sa description s'inspire d'observations provenant de forêts non aménagées à ce jour ou d'études historiques couvrant de vastes étendues spatiales ou temporelles. Afin de faciliter la gestion opérationnelle du concept, le jugement de différents experts est mis à contribution dans l'élaboration de descriptions simplifiées de la forêt naturelle. Enfin, ce jugement devra évoluer, notamment à la suite d'une modification profonde des processus naturels par les changements globaux (changements climatiques, pollution, espèces envahissantes, migration des espèces et changements de composition, insectes et maladies exotiques présents ou anticipés). Bien qu'imparfaite, la référence à la forêt naturelle représente actuellement le meilleur outil disponible pour intégrer les préoccupations liées au maintien de la biodiversité à la planification forestière, en misant sur une réduction des écarts entre la forêt aménagée et la forêt naturelle.

Au Québec, le nouveau régime forestier vise à implanter un aménagement écosystémique des forêts (RLRQ, c. A-18.1, article 1) qui réduirait les écarts entre la forêt aménagée et la forêt naturelle (Jetté *et al.* 2008; Boîte 1). Or, ce nouveau régime préconise aussi une intensification de la production ligneuse par le biais, entre autres, des plantations (Boîte 2). Les objectifs de la sylviculture intensive de plantations peuvent paraître, de prime abord, en contradiction avec ceux de l'aménagement écosystémique. Certaines approches, comme celles de la « TRIADE » (Messier *et al.* 2009), recommandent un zonage fonctionnel dans lequel une certaine proportion

du territoire est prioritairement affectée à la production ligneuse, et une partie de celle-ci, à la sylviculture intensive. Les efforts de conservation peuvent alors être concentrés dans d'autres zones consacrées à l'aménagement extensif et à la conservation stricte.

Toutefois, l'aménagement écosystémique s'applique à l'ensemble du territoire, avec ou sans zonage fonctionnel. Dans ce contexte, il est nécessaire de réfléchir aux mesures de mitigation des impacts de la sylviculture intensive de plantations sur la biodiversité. Il faut également s'assurer que cette sylviculture soit intégrée dans un processus de planification qui permet de répondre adéquatement aux enjeux écologiques, et ce, à l'échelle appropriée. Une avenue prometteuse pour y arriver consiste à définir un espace de solutions qui offrirait des occasions de créer de la richesse à partir des plantations dans le respect des valeurs environnementales et sociales. Un tel exercice s'inscrit dans un processus visant aussi à sauvegarder une certaine « licence sociale à opérer » pour les plantations. Le monde des affaires reconnaît maintenant qu'une entreprise ne peut opérer efficacement et sans risques sociaux que si ses activités obtiennent une approbation générale de la commu-

Boîte 2. Les plantations dans la forêt publique du Québec

- 1882** : Première mention de plantations dans une loi forestière.
- 1908** : Début de la production de plants par le ministère responsable des forêts. Les objectifs de reboisement étaient relativement limités parce que le type de coupe (manuelle, l'hiver) assurait la protection de la régénération naturelle. Le reboisement servait principalement à remettre en production les superficies brûlées près des communautés.
- 1950**–**1960** : Début de la mécanisation et de la coupe en période estivale; la protection de la régénération naturelle n'est alors plus assurée.
- 1980** : Mise sur pied d'un ambitieux programme de mise en terre de 300 millions de plants par année afin de reboiser d'importantes superficies où la régénération naturelle ne suffisait pas à assurer le renouvellement des forêts. Les superficies reboisées augmentent, et l'utilisation d'herbicides chimiques préoccupe le public. Les objectifs de reboisement et les rendements escomptés ne seront pas atteints, notamment en raison du mauvais entretien des zones reboisées.
- 1986** : Un nouveau régime forestier centre le renouvellement des forêts sur la régénération naturelle, grâce à la protection de la régénération préétablie.
- 1993** : Adoption de la Stratégie de protection des forêts visant à assurer le renouvellement des forêts, à mieux protéger les ressources du milieu forestier, à favoriser leur usage harmonieux et à éliminer la pulvérisation d'insecticides et de phytocides chimiques. Stabilisation du niveau de reboisement, lequel se situe aujourd'hui à 130–140 millions de plants par année (Boulay 2013). La plantation devient un complément à la régénération naturelle.
- 2013** : Nouveau régime forestier qui préconise une intensification de la production ligneuse notamment par l'utilisation de plantations, dans un cadre général d'aménagement écosystémique de l'ensemble du domaine public, qui comprend 84 % des forêts productives du Québec.

nauté, et qu'elle maintient cette acceptabilité sociale pour la conduite de ses activités (Gunningham *et al.* 2004, Prno et Slocombe 2012). La licence sociale pour opérer est particulièrement critique pour la foresterie en domaine public, qui doit gagner et maintenir à long terme la confiance citoyenne pour sauvegarder ses programmes d'investissement d'argent public (Howe *et al.* 2005, Dare 2011, Dare *et al.* 2011).

Cette problématique n'a pas encore été abordée au Québec, et la littérature n'offre que des réponses partielles. Nous avons donc réfléchi à la manière dont la sylviculture intensive de plantations peut être mise en pratique dans un contexte d'aménagement écosystémique. Nos objectifs étaient de déterminer les enjeux écologiques, économiques et sociaux liés aux plantations, et de proposer des solutions pour que la sylviculture intensive de plantations s'articule autour des valeurs économiques, environnementales et sociales qui caractérisent l'aménagement forestier durable. Bien que nos réflexions aient été faites dans le cadre québécois, nous croyons qu'elles représentent un intérêt pour les forestiers qui œuvrent dans d'autres juridictions.

Principes et prémisses de base

Les principes et prémisses de base suivants ont guidé nos réflexions :

- L'aménagement écosystémique, tel qu'il est défini dans la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier du Québec (RLRQ, c. A-18.1, article 1), s'applique à l'ensemble des forêts québécoises (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune 2009). Il faut s'assurer que les enjeux écologiques trouvent réponse à l'échelle appropriée afin que la matrice forestière demeure fonctionnelle pour les espèces qui l'utilisent.
- En raison des rendements ligneux élevés qu'elle permet d'obtenir, la sylviculture intensive de plantations est appelée à jouer un rôle crucial dans une stratégie de production de bois. Dans certaines circonstances, lorsqu'elle se fait dans le cadre d'un zonage fonctionnel, elle peut également permettre de concentrer la production ligneuse dans une partie du territoire afin de libérer des superficies pour la conservation.
- En présence d'un risque connu, des actions de prévention, d'atténuation et de correction doivent être mises en place, en priorité à la source (principe de prévention).
- Une approche basée sur la science (Szaro et Peterson 2004), notamment par l'intégration et l'utilisation des connaissances scientifiques récentes appuyées par une revue de littérature exhaustive, a permis d'assurer la rigueur de nos analyses et discussions.

Méthodes

Groupe d'experts et approche par enjeux et solutions

Pour faire face aux défis complexes liés à l'instauration d'une sylviculture intensive de plantations dans un contexte d'aménagement écosystémique, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs a eu recours à un groupe d'experts comme outil de gouvernance (Groupe d'experts sur la sylviculture intensive de plantations 2013). Les différentes facettes en apparence contradictoires d'une problématique complexe ont été abordées par un partage et une mise en perspective des expériences et des connaissances scientifiques dans le but de réfléchir, de discuter et de trouver des avenues de solutions

consensuelles basées sur des faits (Geneletti 2007). Cette mise en commun de l'expertise d'individus œuvrant dans les domaines desquels émerge la problématique permet une analyse empreinte de rigueur scientifique pour bâtir un consensus large et favoriser une prise de décision robuste et légitime (Oliver 2002, Roy *et al.* 2010).

Notre groupe, formé de chercheurs gouvernementaux, de chercheurs universitaires et de praticiens, s'est donc intéressé aux plantations forestières, définies comme des peuplements forestiers constitués majoritairement à partir de semis ou de boutures plantés dans un objectif de remise en production ou d'amélioration de la production ligneuse. Notre réflexion porte sur toute la séquence des travaux du scénario sylvicole (incluant la récolte précédant la plantation) qui représente un potentiel d'artificialisation de la forêt naturelle. Nous avons limité notre réflexion aux forêts du domaine de l'État, aménagées dans le contexte du régime forestier québécois.

Dans le cadre d'un processus diagnostique des plantations (Fig. 1), nous avons utilisé une approche par enjeux et solutions (Desmarais 2006, Comité scientifique sur les enjeux de biodiversité 2010, Grenon *et al.* 2010, Roy *et al.* 2010). Ce processus de résolution de problèmes (Brooks *et al.* 2006, Dennison 2008, Wilshusen et Wallace 2009) permet d'aborder les différentes facettes, en apparence contradictoires, de la création de plantations dans un contexte d'aménagement écosystémique par la voie des enjeux appréhendés. Cette approche permet notamment de définir les enjeux de nature écologique sur la base des écarts observés entre la forêt naturelle et la forêt aménagée. Un enjeu peut être défini comme quelque chose pouvant être gagné ou perdu.

Ainsi, nous avons dressé une liste d'enjeux appréhendés pour maintenir la biodiversité, les processus écologiques et les valeurs socioéconomiques dans un contexte d'intensification de la sylvi-

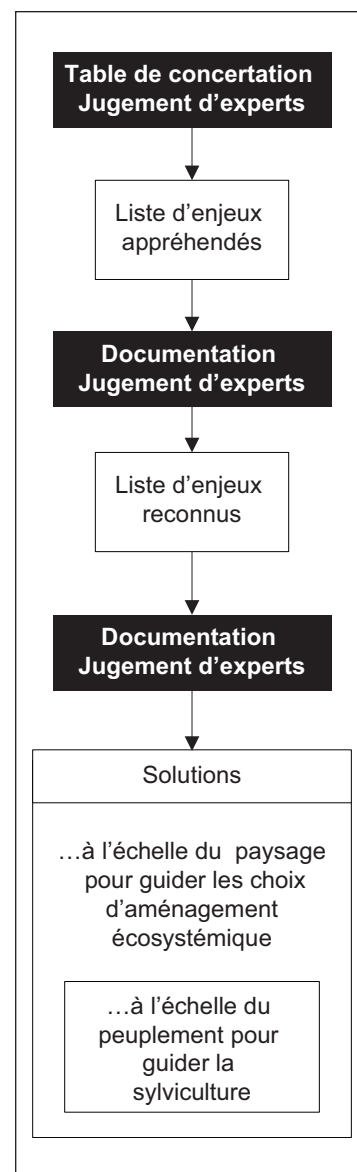


Fig. 1. Processus diagnostique des plantations dans un contexte d'aménagement écosystémique.

culture de plantations. Ces enjeux ont été documentés afin de juger de leur importance et pour recenser, dans la littérature, des solutions applicables. Ceux qui ont été jugés réels sur la base de la littérature scientifique et d'une étude de cas (voir ci-dessous) ont ensuite été regroupés et synthétisés à l'intérieur de groupes fonctionnels, pour l'élaboration de solutions synthèses destinées à être appliquées à l'échelle du peuplement et celle du paysage.

Les solutions à l'échelle du peuplement ont été détaillées selon les différentes étapes du scénario de plantation, soit la coupe préalable, la préparation de terrain, la mise en terre, l'éducation (dégagement, nettoyage, éclaircie précommerciale, éclaircie commerciale) et la récolte finale.

Évaluation de la naturalité pour gérer l'altération des forêts

Pour élaborer les solutions, nous avons adapté le concept de naturalité (Colak *et al.* 2003, Winter *et al.* 2010, St-Hilaire 2011, Rüdiger *et al.* 2012, Winter 2012); celle-ci peut être représentée sous la forme d'un gradient écologique allant d'un état jugé naturel à un état jugé artificiel. La mesure de la naturalité permet d'évaluer la distance *écologique* d'un écosystème par rapport aux conditions de référence observées dans la forêt naturelle. Ce concept s'intègre donc directement dans le paradigme de l'aménagement écosystémique parce que son évaluation permet de quantifier les écarts entre la forêt aménagée et la forêt naturelle. Pour faciliter l'application du concept à l'aménagement des forêts, le gradient de naturalité est généralement subdivisé en classes utiles pour évaluer et gérer l'altération des forêts aménagées (Colak *et al.* 2003). Ainsi, bien que la naturalité se mesure quantitativement, le jugement des experts est nécessaire pour déterminer les limites des classes du gradient. Nous avons retenu cinq classes pour l'élaboration des solutions : *naturelle*, *quasi naturelle*, *semi-naturelle*, *altérée* et *artificielle* (Tableau 1). Nous avons adapté les définitions et les éléments de mesure pour pouvoir évaluer la naturalité des peuplements forestiers selon deux des principaux attributs clés de la forêt naturelle qui influencent les fonctions et la résilience des écosystèmes, soit la composition et la structure des peuplements.

Pour aborder les solutions à l'échelle du paysage, nous avons attribué une classe de naturalité aux peuplements de 4 paysages; les plantations y occupent différentes proportions de la superficie et sont dispersées selon 2 scénarios d'agglomération et 2 scénarios de dispersion. Une approche semi-quantitative a été privilégiée pour évaluer la naturalité des peuplements et produire ces 4 cartes de naturalité, ce qui était suffisant pour faire progresser notre réflexion sur les solutions à l'échelle du paysage, et pouvait s'appliquer à grande échelle de façon opérationnelle. De plus, l'évaluation quantitative de la naturalité aurait nécessité des données actuellement non disponibles. Notre évaluation semi-quantitative est donc basée sur les informations du Tableau 1, sur les données de cartographie écoforestière et sur notre jugement en considérant, notamment, les connaissances actuelles sur la forêt naturelle (p. ex. : Boucher *et al.* 2009) de la région d'étude (section suivante). Les cartes de naturalité ont été produites par l'addition des évaluations des peuplements d'une étude de cas (section suivante). Pour faciliter l'interprétation spatiale des cartes, une analyse de voisinage a été faite avec l'extension *Spatial Analyst* du logiciel ArcMap 9 (ESRI, ArcGis version

9/ArcMap, Redlands, CA) qui effectue un lissage spatial du degré de naturalité. À partir de l'image produite, nous avons évalué visuellement l'ambiance de naturalité de la matrice forestière en fonction de la classe de naturalité prédominante.

Application du processus diagnostique à une étude de cas

Pour élaborer et tester le processus diagnostique et pour fournir une base concrète aux réflexions, la région du Bas-Saint-Laurent (Québec) a été retenue pour l'étude de cas. Ce choix reposait sur le fait que cette région recèle une superficie reboisée relativement importante (près de 123 000 ha : 12% de la superficie forestière publique) de même que certaines grandes concentrations de plantations dues à la combinaison de deux événements : l'ambitieux programme gouvernemental de reboisement de 300 millions de plants par année mis de l'avant dans les années 1980 (Boîte 2), et les reboisements massifs requis à la suite de la récupération des bois touchés par la dernière épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* [Clemens]), de 1967 à 1992 (Boucher *et al.* 2009). De plus, la région a récemment fait l'objet de controverses au sujet des plantations (Nature Québec 2008a,b), notamment en raison de leur ampleur dans le paysage et des méthodes sylvicoles utilisées. Enfin, elle est située en forêt mélangée, ce qui pourrait rendre plus aigus certains enjeux écologiques liés aux plantations d'essences résineuses.

Résultats et discussion

Enjeux

Nous avons dressé une liste de 39 enjeux appréhendés, pour ensuite les regrouper en 10 enjeux synthèses (Fig. 2 et Tableau 2). À la Boîte 3, nous présentons l'enjeu de la fertilité et de la productivité des plantations; cet enjeu et celui du maintien des attributs clés de la forêt naturelle ont été au centre de toutes les réflexions du groupe. La description détaillée des autres enjeux se retrouve dans le rapport de notre groupe (Groupe d'experts sur la sylviculture intensive de plantations 2013). Presque tous les enjeux synthèses ont été jugés réels sur la base de la littérature scientifique et de l'étude de cas. Seul l'enjeu portant sur la répétition du scénario de plantation n'a pu être évalué et est demeuré appréhendé, en raison d'un manque de connaissances scientifiques sur ce sujet. Chaque enjeu synthèse regroupe de 1 à 10 enjeux de la liste initiale. Les enjeux synthèses qui comportent peu d'enjeux ne sont pas moins importants, car ils s'expriment à de grandes échelles spatiales ou temporelles, englobent d'autres enjeux synthèses ou sont simplement incontournables. Par exemple, les plantations doivent être productives et rentables, la répétition du scénario de plantation a des implications sur tous les autres enjeux, alors que l'acceptabilité sociale ou le maintien des valeurs des communautés autochtones peuvent devenir des enjeux prépondérants. Certains de ces enjeux, comme la rentabilité des plantations ou les valeurs des communautés autochtones, bien que réels, n'ont malheureusement pas été traités en profondeur par manque de données et d'expertises plus spécifiques.

Évaluation de la naturalité

Pour aborder les solutions, nous avons utilisé les définitions et les éléments de mesure de la naturalité des peuplements forestiers décrits au Tableau 1. Dans le contexte des plantations,

Tableau 1. Cadre conceptuel de la définition et de la mesure de la naturalité des peuplements forestiers le long du gradient écologique subdivisé en cinq classes

Classes du gradient de naturalité	Définition		Éléments de mesure			
	Structure et composition	Processus	Structure et composition	Régime dynamique	Signaux avant-coureurs ^b de l'atteinte d'un seuil entre la résilience de la forêt naturelle et celle d'un nouvel écosystème	
Naturelle	Peuplement dont les attributs clés, ainsi que les caractéristiques de ces attributs, sont représentatifs de la variabilité jugée naturelle.		Distance avec la distribution et les marges de variabilité naturelle des attributs clés	Probabilité de retrouver cet état dans le paysage naturel	Énergie à investir pour retourner à la résilience de la forêt naturelle	
Quasi-naturelle	Peuplement qui possède tous les attributs clés des peuplements naturels. La plupart des attributs ont été faiblement altérés.	Fonctions et régimes dynamiques ^a associés à la résilience de la forêt naturelle ainsi qu'à la résilience de ses états alternatifs stables, lorsque applicable.	Les marges se chevauchent.	État fréquent	Très faible	
Semi-Naturelle	Peuplement qui possède tous les attributs clés des peuplements naturels. La plupart des attributs ont été modérément altérés.		Les marges ne se chevauchent plus mais les distributions se touchent.	État possible	Faible	
Altérée	Peuplement qui ne possède pas tous les attributs clés des peuplements naturels. La plupart de ceux présents ont été fortement altérés.		Les distributions ne se touchent plus. L'asymétrie de la distribution a changé.	État rare	Grande	Aucune ou Faible
Artificielle	Peuplement créé par l'homme. Modification profonde de l'écosystème et des espèces, dont la présence est due à l'homme.	Fonctions et régime dynamique associés à la résilience d'un nouvel écosystème ^c , difficilement réversible dans un contexte d'aménagement forestier (c.-à-d. > 300 ans).		État inexistant	Continue	Aucune ou Faible
						Très forts

^aEnsemble des dynamiques de perturbation et de régénération façonnant l'écosystème ainsi que l'ensemble des boucles de rétroaction contribuant à son maintien.

^bAugmentation du temps de retour vers la variabilité naturelle, de l'autocorrélation et de la variance des attributs clés, ainsi que changement dans l'asymétrie de la distribution de leur variance (spatiale ou temporelle; Dakos *et al.* 2011).

^cHistoriquement absent dans la forêt naturelle (Novel ecosystems; Bridgewater *et al.* 2011; Future range of variability; Duncan *et al.* 2010).



Fig. 2. Enjeux initiaux et enjeux synthèses.

Tableau 2. Description sommaire des 10 enjeux synthèses et résumé des principales solutions associées

Enjeu synthèse	Description sommaire de l'enjeu	Résumé des principales solutions associées
Structure du paysage	Effets cumulatifs des plantations sur tous les autres enjeux, notamment en raison de leur ampleur, de leur emplacement et de leur agencement spatial à l'échelle du paysage.	Définir une stratégie de localisation et d'agencement spatial des plantations. Limiter la proportion des peuplements des classes <i>altérée</i> et <i>artificielle</i> dans le paysage. Appliquer les bonnes pratiques compatibles avec les objectifs de rendement pour augmenter la naturalité des plantations.
Acceptabilité sociale, qualité visuelle des paysages et valeurs fauniques	Perception d'artificialisation des peuplements et des paysages associée aux plantations. Effets des plantations sur la qualité des habitats fauniques, sur la densité des populations fauniques et sur la qualité de l'expérience des chasseurs.	Informers les parties prenantes et intégrer leurs préoccupations lors de la planification forestière. Favoriser les plantations plurispécifiques de configuration irrégulière.
Maintien des valeurs des communautés autochtones	Effets des plantations sur les activités des communautés autochtones.	Intégrer les préoccupations des communautés autochtones à l'égard des plantations lors de la planification forestière.
Structure interne des peuplements	Homogénéisation de la structure verticale (ex. : distribution diamétrale, étagement de la végétation) et horizontale (ex. : distribution spatiale des tiges, densité) des peuplements. Raréfaction du gros bois mort.	Favoriser les plantations de densité variable intégrant des espèces longévives et la végétation naturelle mature (vivante et morte) et en régénération. Moduler les traitements de préparation de terrain, de gestion des débris de coupe, d'éducation et de coupe finale.
Composition végétale de la forêt	Effets des plantations sur la diversité des espèces végétales arborescentes et de sous-bois. Adéquation de ces espèces avec les caractéristiques écologiques de la station.	Favoriser les plantations plurispécifiques qui rendent la complémentarité des niches possible et qui intègrent des espèces de la forêt naturelle et en raréfaction. Limiter le recours aux espèces exotiques.
Résistance, résilience, adaptabilité de la forêt	Franchissement d'un seuil de résilience et changement de régime dynamique vers un écosystème artificiel. Risques d'hybridations, de naturalisation et d'envahissement par les espèces exotiques et récalcitrantes de sous-bois. Adaptabilité aux changements climatiques. Vulnérabilité aux facteurs biotiques et abiotiques.	Favoriser la présence d'espèces de la forêt naturelle. Limiter les risques d'hybridation, de naturalisation et d'envahissement par les espèces exotiques et récalcitrantes de sous-bois. Faire une préparation de terrain la moins intense possible.
Enjeux écologiques associés aux routes	Nécessité d'un réseau routier dense et durable qui a des effets sur l'écoulement et la qualité de l'eau, sur la fragmentation et la fréquentation du territoire ainsi que sur la création de corridors pour les prédateurs, les chasseurs et les espèces envahissantes.	Planifier la densité et la durabilité du réseau routier utilisé en tenant compte de ses effets sur les processus écologiques et les espèces, et appliquer les saines pratiques.
Qualité de l'eau et de l'habitat aquatique	Effets des pratiques sylvicoles associées à la plantation sur la qualité de l'eau et de l'habitat aquatique (érosion, cycles d'éléments nutritifs).	Limiter l'exportation de sol et de matière organique, ainsi que le lessivage des éléments nutritifs.
Fertilité, productivité, rentabilité	Capacité des plantations à fournir la production attendue en fonction du choix de l'espèce ou des espèces, de l'intensité de la préparation de terrain, de la fertilité des sols, de la présence de végétation concurrente et de la modification du scénario pour prendre en compte de nouveaux enjeux. Importance d'atteindre la rentabilité économique.	Planter le plus tôt possible et réaliser tous les traitements d'éducation et la coupe finale au bon moment. Choisir le bon type de plant. Laisser les branches sur le parterre de coupe et maintenir un couvert végétal. Amender les sols au besoin.
Répétition dans le temps du scénario de plantation	La répétition du scénario de plantation sur un même site accentue tous les autres enjeux, notamment la perte de productivité, d'attributs de la forêt naturelle et de sa résilience.	Diversifier les scénarios de plantation successifs sur un même site ou alterner entre la plantation et la régénération naturelle du peuplement.

Boîte 3. Description de l'enjeu synthèse de la fertilité et la productivité des plantations

Les scénarios sylvicoles qui permettent d'optimiser la croissance des arbres plantés sont généralement bien connus. Ils comprennent l'utilisation d'un matériel génétiquement amélioré, dont la provenance est adaptée aux conditions climatiques régionales (Beaulieu *et al.* 2009). Le type de plants et l'espèce doivent être adaptés aux conditions écologiques des stations, notamment à l'abondance et à la nature de la végétation concurrente (Thiffault et Roy 2011). Les étapes de manutention et de mise en terre doivent être optimales, puisqu'elles peuvent avoir un effet direct sur la survie et la croissance des plants (p. ex. : McKay 1996). La création de microsites qui fournissent des quantités adéquates de ressources pendant l'établissement des plants nécessite le plus souvent une préparation de terrain où l'on intervient sur les tiges résiduelles, les débris de coupe, la végétation concurrente, l'humus et les horizons minéraux du sol (Prévost et Thiffault 2013, Buitrago *et al.* 2014). La préparation de terrain a aussi pour objectif de faciliter et d'optimiser les travaux ultérieurs, notamment la mise en terre et l'entretien des plants. Un objectif de production qui cible une essence particulière (généralement celle qui est plantée) implique de limiter la concurrence pour les ressources environnementales afin que celles-ci soient disponibles pour l'essence désirée (Radosevich et Osteryong 1987). Par ailleurs, la gestion de la densité des tiges plantées, tant au moment de la mise en terre que lors des éclaircies, augmente l'uniformité des produits et répartit la croissance sur un nombre limité de tiges sélectionnées (Prégent 1998).

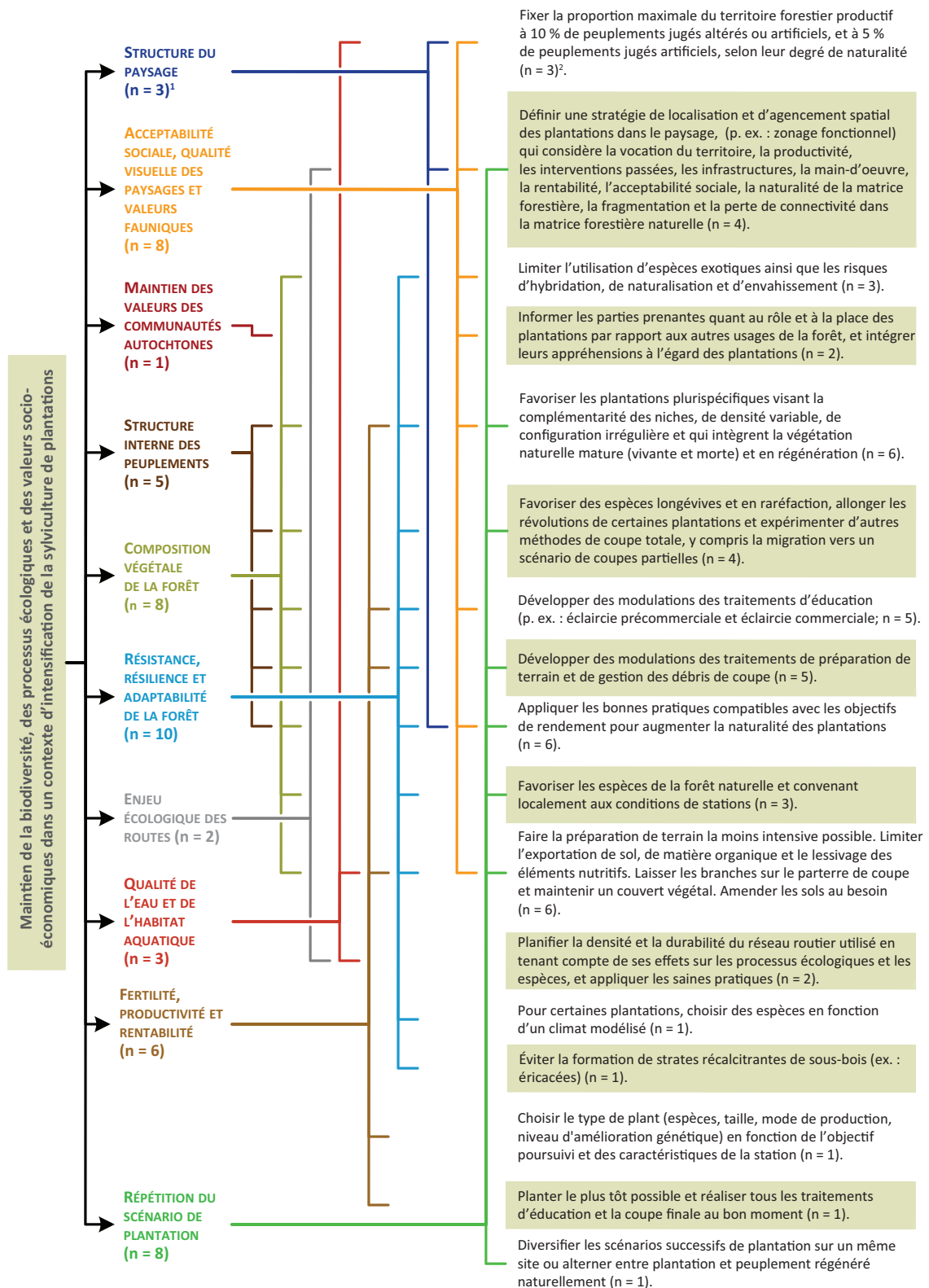
La modulation des scénarios sylvicoles pour tenir compte d'enjeux de biodiversité a le potentiel d'influencer la productivité des plantations. Par exemple, la diminution de l'intensité de la préparation de terrain peut avoir des effets significatifs sur la croissance des arbres plantés. Dans certaines situations, un scarifiage inadéquat, qui ne bouleverse pas suffisamment la matière organique ou qui n'expose pas le sol minéral sur une surface appropriée, entraîne des pertes importantes de rendement (Simard *et al.* 2007). Le maintien d'espèces secondaires dans les plantations peut résulter en une faible croissance des arbres plantés (Jobidon 2000, Pitt *et al.* 2004, Wagner *et al.* 2006).

nous croyons que le gradient de naturalité est utile, car il permet une compréhension partagée et évite une approche binaire. Autrement dit, une plantation ne crée pas nécessairement un peuplement artificiel, tout comme la création d'une plantation qui n'inclut pas d'espèces exotiques peut quand même résulter en un peuplement altéré. À cet égard, le gradient de naturalité pourrait alimenter la réflexion actuelle sur la révision des normes de certification du Forest Stewardship Council (FSC) en vue de l'élaboration d'une norme canadienne. De plus, ce gradient offre une souplesse dans les choix d'aménagement et permet de contrôler et de gérer la proportion de peuplements les plus altérés, susceptibles d'avoir des impacts sur la biodiversité. Ainsi, nous pensons que l'application de ce concept favorisera l'acceptabilité sociale des plantations en devenant un outil de concertation dans un contexte de gestion intégrée des ressources et du territoire. Enfin, l'utilisation des degrés de naturalité stimulera l'application de

bonnes pratiques favorisant l'atteinte d'un degré de naturalité plus élevé.

La naturalité se quantifie à partir des marges de variabilité des attributs clés de la forêt naturelle. Elle n'est donc pas directement dépendante de l'intensité du scénario sylvicole. À cet effet, il importe de distinguer le gradient de naturalité du gradient d'intensité de la sylviculture. Les attributs clés à partir desquels nous proposons de mesurer la naturalité sont basés sur des attributs de structure (présence de chicots, de débris ligneux, densité d'arbres, hétérogénéité verticale et horizontale, etc.) et sur des attributs de composition (type de couvert, diversité des espèces arborescentes compagnes et de sous-bois, etc.) qui influencent les fonctions et la résilience de la forêt naturelle. La résilience se traduit par la capacité d'un écosystème à absorber les perturbations et à se réorganiser de manière à rétablir la structure, la composition, les fonctions et le régime dynamique qui prévalaient avant la perturbation (Folke *et al.* 2004, Walker *et al.* 2004, Messier *et al.* 2013). Un régime dynamique peut être défini comme l'ensemble des dynamiques de perturbation et de régénération façonnant l'écosystème ainsi que l'ensemble des boucles de rétroaction contribuant à son maintien. Par exemple, les épidémies récurrentes de la tordeuse des bourgeons de l'épinette et les cycles subséquents de mortalité et de régénération du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) forment un régime dynamique qui contribue au maintien des sapinières. La résilience peut être comparée à la flexibilité d'un élastique qui lui permet de reprendre sa forme après avoir été étiré. Le franchissement d'un seuil de résilience peut entraîner un changement de régime dynamique (provoquant la rupture de l'élastique) vers un nouvel écosystème, historiquement absent de la forêt naturelle (Duncan *et al.* 2010, Bridgewater *et al.* 2011), et dont le régime dynamique est associé à une résilience différente de celle de la forêt naturelle et de ses états alternatifs stables. Le nouvel écosystème qui découle d'un changement de régime est alors difficilement réversible dans un contexte d'aménagement forestier (c.-à-d. > 300 ans ou 2 rotations). Les peuplements des cinq classes de naturalité maintiennent la résilience de la forêt naturelle. Toutefois, les peuplements dans la classe *artificielle* peuvent avoir maintenu la résilience de la forêt naturelle ou bien avoir celle d'un nouvel écosystème. Par exemple, une plantation d'espèces exotiques comportant une régénération préétablie composée d'espèces de la forêt naturelle pourrait encore posséder la résilience de la forêt naturelle. En contrepartie, cette même plantation posséderait la résilience d'un nouvel écosystème si la régénération était constituée de l'espèce exotique, c'est-à-dire que cette espèce exotique était en mesure de se régénérer sous son propre couvert. Il est donc très important de reconnaître le lien entre la résilience et la naturalité, car si l'écart entre la forêt naturelle et la forêt aménagée est suffisamment grand (c.-à-d. que la naturalité est suffisamment faible) pour que l'écosystème change de régime dynamique, nous devons être en mesure de le reconnaître. Un changement de régime dynamique invalide notamment la prémisse selon laquelle la forêt retournera d'elle-même vers des conditions plus naturelles après une perturbation. Selon la résilience d'un nouveau régime, elle évoluera plutôt vers les conditions d'un nouvel écosystème.

Finalement, l'intégration de la résilience dans la mesure de la naturalité permet aussi de reconnaître que les écosystèmes sont dynamiques, qu'ils évoluent et qu'ils peuvent acquérir,



¹ Pour cette colonne, le chiffre entre parenthèses correspond au nombre de solutions synthèses nécessaires pour répondre à chaque enjeu synthèse.
² Pour cette colonne, le chiffre entre parenthèses correspond au nombre d'enjeux synthèses auxquels répond chaque solution synthèse.

Fig. 3. Solutions répondant aux enjeux synthèses.

avec le temps, un plus haut degré de naturalité. Par exemple, une plantation dans laquelle plusieurs attributs clés de la forêt naturelle sont absents, ou fortement altérés, peut évoluer vers une plus grande naturalité avec les années, surtout si les interventions sylvicoles sont moins fréquentes ou abandonnées, ou encore, si elles permettent de maintenir ou de restaurer les attributs d'une forêt naturelle.

Pour illustrer l'application du concept, nous présentons des hypothèses de scénarios qui pourraient générer des caractéristiques de peuplements pouvant être associés aux différentes classes de naturalité (Fig. 4). Dans le contexte des plantations, nous estimons qu'un peuplement issu d'un scénario de plantation pourrait être jugé *semi-naturel*, *altéré* ou *artificiel* (Fig. 4d à 4f).

Solutions

La documentation des enjeux a aussi permis de recenser des solutions existantes à chaque étape du scénario de plantation. À partir de cette liste de solutions, le groupe a présenté 17 solutions synthèses permettant de répondre aux enjeux synthèses (Fig. 3). D'une part, chacun des enjeux synthèses nécessite de 1 à 10 solutions synthèses pour y répondre. D'autre part, certaines solutions synthèses contribuent à répondre à un seul enjeu synthèse, alors que d'autres peuvent concerner jusqu'à 6 enjeux synthèses. Certaines solutions peuvent répondre à peu d'enjeux, mais être néanmoins incontournables, car elles sont applicables à de grandes échelles spatiales ou temporelles. Par exemple, la solution qui vise à fixer la proportion maximale de peuplements des classes *altérée* ou *artificielle* dans le paysage répond à 3 enjeux synthèses, mais s'avère fondamentale à l'égard des préoccupations qui se posent à l'échelle du paysage. Cette même logique s'applique à la définition d'une stratégie de localisation et d'agencement spatial des plantations dans le paysage. D'autres solutions, comme le fait d'appliquer les bonnes pratiques pour augmenter la naturalité des plantations, permettent de répondre à plusieurs enjeux synthèses. Elles renvoient fréquemment à des mesures de mitigation des impacts potentiels des pratiques usuelles, comme le fait de maintenir des legs biologiques lors de la coupe préalable à la plantation, de maintenir des îlots régénérés naturellement lors de la préparation de terrain, de maintenir des arbres fruitiers ou des espèces en rarefaction lors du dégagement, du nettoyage et de l'éclaircie précommerciale, ou encore, de moduler la façon de réaliser des éclaircies commerciales pour favoriser une plus grande hétérogénéité dans les plantations. À ces bonnes pratiques s'ajoute une solution de premier plan qui consiste à planter le plus tôt possible, et à exécuter tous les traitements d'éducation et la coupe finale au bon moment pour obtenir la production attendue.

Certaines des solutions envisagées comme mesures de mitigation des impacts peuvent causer une réduction du rendement ligneux et de la rentabilité des plantations. Il est donc important de réfléchir aux solutions qui augmentent la naturalité des peuplements, mais qui ont peu ou pas d'impact sur le rendement ou la rentabilité des plantations. En l'absence de telles solutions, on doit aussi réfléchir à l'application des solutions qui pourraient augmenter la naturalité, même si elles pourraient avoir plus d'impact sur le rendement ligneux et la rentabilité des plantations. Nous avons présenté quelques pistes de solution pour relever ce défi d'ingénierie forestière et

pour réconcilier l'apparence de paradoxe entre l'application de mesures de mitigation et la perte de productivité des plantations.

Tout d'abord, la création de plantations mixtes ou plurispécifiques pourrait permettre de répondre simultanément à des enjeux écologiques et de productivité (Pawson *et al.* 2013). De fait, les peuplements plurispécifiques, naturels ou plantés, peuvent être plus productifs que les peuplements monospécifiques, lorsque les espèces occupent des niches complémentaires permettant une exploitation optimale des ressources de la station (Paquette et Messier 2011, Pretzsch 2009, Pretzsch *et al.* 2010, Zhang *et al.* 2012). Il est ainsi possible d'observer une productivité supérieure dans les plantations mixtes composées d'espèces fonctionnellement différentes, occupant des niches suffisamment distinctes pour favoriser un effet de complémentarité (Kelty 2006, Paquette et Messier 2013). De nombreux dispositifs expérimentaux dans le monde tendent à démontrer cet effet de complémentarité et d'augmentation de la croissance avec la biodiversité (Hooper *et al.* 2005). Les recherches actuelles portent notamment sur les arbres et sur les mécanismes qui favoriseraient cette complémentarité par partition de niches (Tobner *et al.* 2014). Des tests opérationnels sont d'ailleurs en place pour en démontrer la faisabilité, souvent citée comme enjeu majeur limitant leur établissement (Paquette et Messier 2013). Cependant, il importe de s'assurer que les gains mesurés à court terme se traduisent par des rendements forestiers accrus à long terme, pour les espèces désirées, et non seulement à l'échelle des tiges individuelles, mais également à l'échelle des peuplements. La mise en œuvre de solutions de ce type nécessite le jugement d'experts pour prendre en compte les risques potentiels associés aux modifications anticipées des processus naturels par les changements globaux (changements climatiques, pollution, espèces envahissantes, insectes et maladies exotiques présents ou anticipés). Par exemple, le maintien dans une plantation d'une espèce de la forêt naturelle comme le frêne (*Fraxinus* spp.), qui risque d'être attaquée par l'agrile du frêne (*Agrilus planipennis* Fairmaire), devrait faire l'objet d'une analyse rigoureuse.

L'aménagement de plantations de configuration irrégulière, qui intègrent la végétation naturelle mature (vivante et morte) et en régénération, s'avère une autre solution pour augmenter leur naturalité tout en limitant l'impact sur le rendement ligneux. À titre d'exemple, des plantations peuvent être aménagées par bandes ou par trouées sur un site qui présente une certaine proportion de régénération naturelle (Paquette *et al.* 2006). Des îlots ou des bouquets de forêt naturelle peuvent être conservés lors de la récolte préalable à la plantation (coupes à rétention variable). Ces mesures s'appliqueraient alors à l'échelle du peuplement en plantation plutôt qu'à celle de l'arbre planté. Le retour sur l'investissement sylvicole à l'endroit où l'on plante pourrait alors être maximal, car les mesures de mitigation affecteraient peu ou pas les arbres plantés.

Finalement, des modulations sont proposées pour les traitements de préparation de terrain et des traitements d'éducation (dégageage, nettoyage, éclaircie précommerciale, éclaircie commerciale). Par exemple, à l'étape de l'éclaircie commerciale, on peut moduler l'intervention de manière à favoriser une plus grande complexité dans la structure interne du peuplement, tout en ne réduisant pas la valeur du peuple-



a) Naturel – Aucune coupe industrielle.
Photo : Martin Barrette, MFFP.



b) Quasi naturel – Hypothèse : régime de coupes partielles.
Photo : Parc Algonquin, Ontario.



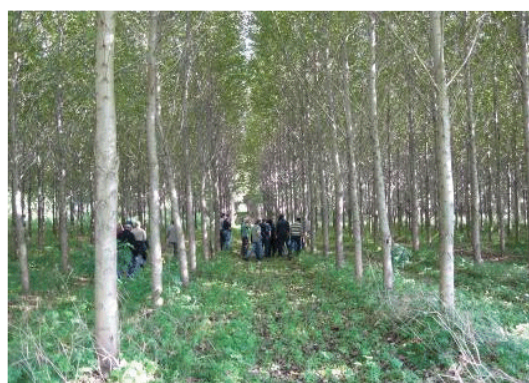
c) Semi-naturel – Hypothèse : scénario intensif d'éducation (Coupe avec protection de la régénération et des sols [CPRS] → Éclaircie précommerciale [EPC] → Éclaircie commerciale [EC]). Photo : Stéphane Tremblay, MFFP.



d) Semi-naturel – Hypothèse : scénario de plantation d'espèces indigènes constituant un peuplement fréquent dans la forêt naturelle et qui convient localement aux conditions de station (CPRS → Plantation d'épinette noire → EPC → EC). Photo : Stéphane Tremblay, MFFP.



e) Altéré – Hypothèse : scénario de plantation d'espèces indigènes constituant un peuplement rare dans la forêt naturelle ou ne convenant pas localement aux conditions de stations (CPRS → Plantation d'épinette blanche → EPC → EC). Photo : Martin Barrette, MFFP.



f) Artificiel – Hypothèse : scénario de plantation d'espèces exotiques (CPRS → Plantation de peuplier hybride → EPC → EC). Photo : Réseau Ligniculture Québec.

Fig. 4. Exemples de scénarios sylvicoles qui peuvent mener à des peuplements dans chacune des classes du gradient de naturalité.

ment résiduel sur pied (*variable density thinning*; Franklin *et al.* 2007). Des essais sylvicoles dans le Bas-Saint-Laurent démontrent que l'éclaircie par dégagement d'arbres d'avenir (un certain nombre d'arbres dominants ou codominants

dégagés de leurs compétiteurs), combinée à de petites trouées, crée de l'hétérogénéité dans la structure horizontale du peuplement tout en permettant d'amorcer une complexification de sa structure verticale par l'établissement de la régénération.

De façon plus générale, la complexification des peuplements par la sylviculture est une avenue reconnue pour promouvoir leur capacité d'adaptation et d'auto-organisation, notamment face aux changements globaux (Puettmann *et al.* 2009, Puettmann 2011).

Solutions concernant l'ampleur, la localisation et de l'agencement spatial des plantations

L'ampleur, la localisation et l'agencement spatial des plantations dans le paysage soulèvent de nombreux enjeux complexes (Fig. 2 et Tableau 2) naissant de l'interaction entre le maintien d'un réseau routier important, la fragmentation du paysage et le mouvement des espèces (Tittler *et al.* 2012, Fahrig 2013). Pour aborder ces enjeux, nous avons utilisé la compilation des classes de naturalité des peuplements au sein de 4 paysages de la région du Bas-Saint-Laurent (Fig. 5). Ces paysages, qui illustrent différents agencements spatiaux de plantations appartenant aux classes *altérée* et *artificielle* du gradient de naturalité, ont servi de base à notre réflexion pour élaborer des solutions à l'échelle du paysage.

À la suite de l'analyse du premier scénario d'agglomération (Fig. 5a), nous jugeons que l'agglomération d'une forte proportion de plantations des classes *altérée* et *artificielle* génère des paysages problématiques à l'égard de plusieurs enjeux, en particulier écologiques. Localement, il reste très peu de peuplements des classes *naturelle* ou *quasi naturelle*, et la matrice forestière dans son ensemble est jugée *altérée*. Toutefois, si l'on agglomère, dans une proportion plus faible, des plantations des classes *altérée* et *artificielle* (Fig. 5b), le paysage sera moins problématique à l'égard de ces enjeux, car il conservera une matrice jugée *quasi naturelle*.

À la suite de l'analyse du premier scénario de dispersion (Fig. 5c), nous jugeons que la dispersion dans le paysage d'une forte proportion de plantations des classes *altérée* ou *artificielle* dilue la naturalité de la matrice vers une classe *semi-naturelle*, ce qui exacerbera aussi plusieurs enjeux. Cependant, la dispersion d'une plus faible proportion de plantations des classes *altérée* ou *artificielle* (Fig. 5d) réduit le nombre d'enjeux problématiques, car le paysage conservera une matrice jugée *quasi naturelle*. Une solution de premier plan s'avère donc de limiter la proportion du paysage occupée par des plantations qui représentent des peuplements des classes *altérée* ou *artificielle* (Fig. 3).

Par ailleurs, les enjeux sont exacerbés par une diminution de la naturalité de la matrice. La nature et l'importance des enjeux liés aux plantations ne sont donc pas seulement dépendantes de la naturalité des plantations elles-mêmes, mais aussi de la naturalité de la matrice forestière dans laquelle elles se trouvent (Fig. 5). Par exemple, un même agencement spatial de plantations de la classe *altérée* (agglomération ou dispersion) devrait être moins problématique dans une matrice jugée *quasi naturelle* que dans une matrice jugée *semi-naturelle*. Une autre solution déterminante à l'échelle du paysage consiste donc à maintenir le degré de naturalité le plus élevé possible dans la matrice forestière (Fig. 3).

En conclusion, si l'on inclut peu de plantations dans le paysage, l'analyse spatiale révèle qu'il est préférable de les disperser, alors que si leur proportion dans le paysage augmente, il devient préférable de créer de petites agglomérations de plantations. Selon l'étude de cas, nous croyons que la dispersion de petites agglomérations de plantations des classes *altérée* et

artificielle devrait permettre d'en inclure une proportion suffisante dans le paysage pour instaurer une sylviculture intensive de plantations tout en minimisant ses impacts. Cependant, notre analyse semi-quantitative a des limites qu'il faut reconnaître, et n'est proposée que pour stimuler les réflexions sur ce thème complexe. En effet, l'agencement spatial des plantations trouve écho dans le débat sur l'agencement spatial des aires protégées. Après plus de 20 ans, les scientifiques tentent toujours de déterminer s'il est mieux, pour conserver la biodiversité, d'établir une seule grande aire protégée plutôt que d'en répartir plusieurs petites (*SLOSS debate : single large or several small*; Burkley 1989, Tjørve 2010, Fahrig 2013).

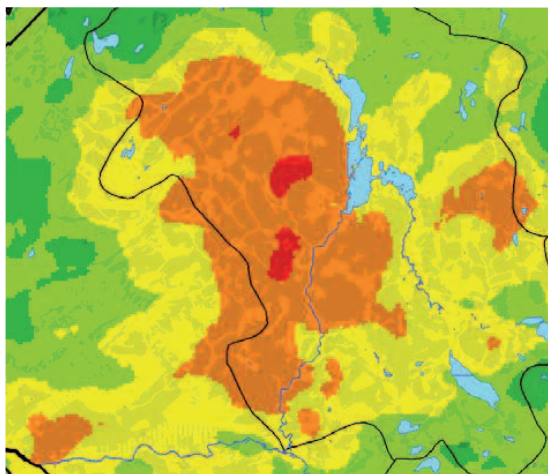
Implications pour l'aménagement

Compte tenu de leur rendement ligneux potentiellement élevé, les plantations continueront vraisemblablement à jouer un rôle substantiel dans les stratégies de production de bois. Toutefois, les plantations soulèvent des enjeux écologiques, économiques et sociaux. Nous croyons que l'approche diagnostique et les solutions que nous proposons peuvent favoriser l'instauration d'une sylviculture intensive de plantations qui s'articule autour des valeurs environnementales, sociales et économiques de l'aménagement forestier durable.

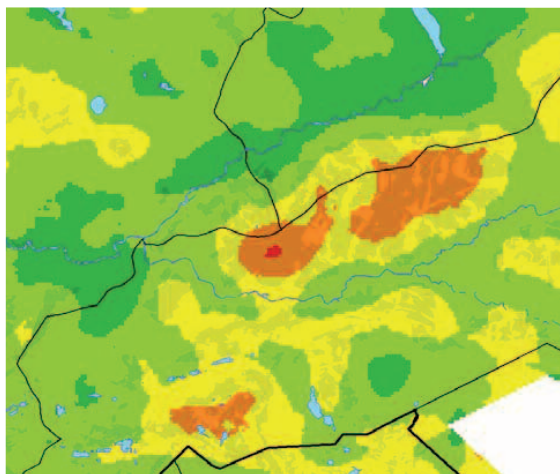
La gestion de l'ampleur (quantité), de la localisation (choix de l'emplacement dans le paysage) et de l'agencement spatial (agglomération ou dispersion) représentent les principaux défis de l'intégration des plantations à l'aménagement écosystémique. Nous croyons que la mesure de la naturalité des peuplements et du paysage constitue une solution à privilégier, étant donné qu'elle permet de contrôler les peuplements appartenant aux classes les plus altérées qui risquent d'avoir un impact plus important sur la biodiversité. De plus, la naturalité permet d'éviter une approche binaire, en tenant compte du fait qu'une plantation ne crée pas nécessairement un peuplement artificiel, et que la création d'une plantation qui n'inclut pas d'espèces exotiques peut quand même résulter en un peuplement altéré. Ainsi, l'évaluation de la naturalité peut devenir un puissant outil de concertation sociale. Notamment, une évaluation de la naturalité de la matrice forestière devient un intrant neutre qui facilite les échanges entre les experts et les parties prenantes, et qui éclaire les décisions pour statuer sur l'emplacement et l'agencement spatial des plantations à établir. Sur le plan économique, les principes de rentabilité financière et économique favorisent une concentration des plantations. Le fait d'installer les plantations en tenant compte de la proximité économique des usines de transformation du bois (près des grands axes routiers, accessibles en tout temps, libres des contraintes de récolte, etc.) et de la productivité des sites permet de répondre à ces principes. En outre, la planification de l'ampleur, de la localisation et de l'agencement spatial des plantations doit également prendre en compte les infrastructures déjà présentes sur le territoire, la vocation de celui-ci (p. ex. : vocation faunique), la productivité des sites, l'historique des interventions, la main-d'œuvre disponible, l'acceptabilité sociale, la fragmentation et la connectivité au sein de la matrice forestière naturelle.

Par ailleurs, les classes de naturalité *altérée* et *artificielle* incluent des peuplements dont les caractéristiques se sont largement éloignées de l'état naturel de référence. Ces peuplements présentent donc le risque le plus élevé d'impacts sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. De surcroît, plus leur proportion dans le paysage sera importante,

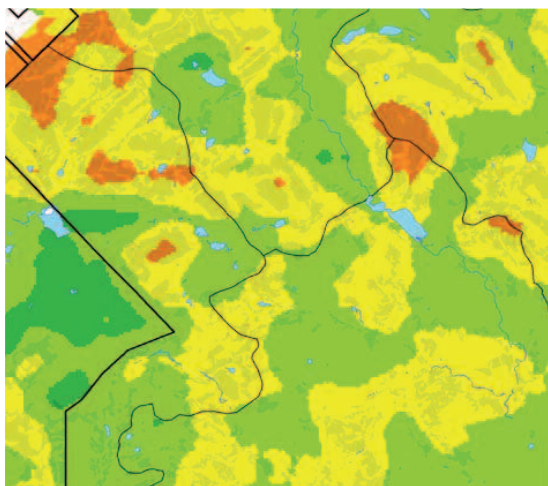
A. Plantations agglomérées dans une matrice altérée.



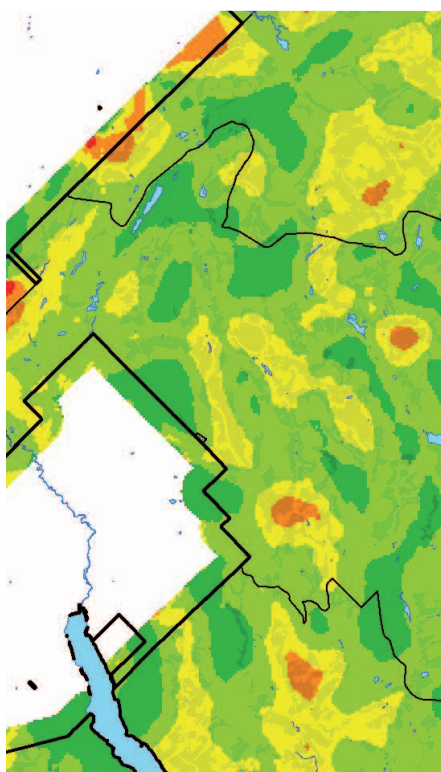
B. Plantations agglomérées dans une matrice quasi naturelle.



C. Plantations dispersées dans une matrice semi-naturelle.



D. Plantations dispersées dans une matrice quasi naturelle.



Classes de naturalité
des peuplements

- Naturelle
- Quasi naturelle
- Semi-naturelle
- Altérée
- Artificielle

Plantations

Fig. 5. Scénarios d'agencement spatial dans le paysage de peuplements des classes altérée et artificielle, lesquels correspondent à des plantations dans l'étude de cas.

plus ces risques seront amplifiés. Pour atteindre les objectifs de la sylviculture intensive, les interventions sylvicoles liées au scénario de plantation auront tendance à simplifier les caractéristiques des forêts naturelles, voire à faire disparaître certaines d'entre elles. Le résultat de ces interventions pourrait alors se traduire par un degré de naturalité peu élevé. Pour répondre aux enjeux que soulèvent l'aménagement éco-

systemique et la production ligneuse, nous croyons que certains seuils doivent être proposés dans le contexte de la gestion des forêts. Étant donné qu'il existe peu d'information de nature scientifique disponible sur ce sujet, nous proposons que le total des superficies occupées par des peuplements des classes de naturalité *altérée* ou *artificielle* (issus ou non de plantations) puisse atteindre un maximum de 10% du terri-

toire forestier productif de chaque unité d'aménagement. Au Québec, les unités d'aménagement servent de base au calcul de la possibilité forestière et à la planification des interventions en milieu forestier. Leur superficie varie de 132 à 25 724 km², avec une moyenne de 4969 km². De plus, considérant le risque élevé d'impacts sur la biodiversité des peuplements de la classe *artificielle* (le degré de naturalité le plus faible), nous jugeons que la proportion de ceux-ci devrait être limitée à 5% du territoire forestier productif de chaque unité d'aménagement, et qu'un poids supérieur leur soit accordé. Cette pondération ferait en sorte que le total des superficies occupées par des peuplements de la classe de naturalité *artificielle* compte pour deux fois plus que le total des superficies occupées par des peuplements de la classe *altérée*. Ainsi, une unité d'aménagement n'ayant pas de peuplements de la classe *artificielle* pourrait accueillir des peuplements de la classe *altérée* sur 10% de son territoire forestier productif, mais une unité d'aménagement ayant déjà 5% de son territoire forestier productif occupé par des peuplements de la classe *artificielle* ne pourrait pas accueillir de peuplements de la classe *altérée*. Nous estimons que ces proportions maximales de peuplements des classes *altérée* et *artificielle* rendront suffisamment de territoires disponibles pour la sylviculture intensive de plantations (à titre d'exemple, l'actuel projet TRIADE qui se déroule au Québec prévoit des proportions bien inférieures; Messier *et al.* 2009). Toutefois, nous croyons que ces pourcentages ne devraient pas être prescriptifs, c.-à-d. qu'ils ne devraient pas être obligatoirement atteints dans une unité d'aménagement donnée.

Pour répondre aux enjeux écologiques, les sylviculteurs devraient aussi identifier et appliquer les meilleures pratiques possibles de manière à augmenter le degré de naturalité des plantations et, par conséquent, celui de la matrice forestière. À titre d'exemple, il arrive parfois que l'intensité des traitements de préparation de terrain dépasse le niveau requis pour atteindre les objectifs de production (Buitrago *et al.* 2014). De telles pratiques parfois excessives ont des conséquences qu'il serait possible d'éviter, comme le scalpage du sol qui a un impact sur la survie et la croissance des plants, en plus de créer des problèmes potentiels d'érosion. Nous suggérons plutôt de réduire l'intensité des traitements de préparation de terrain au plus faible niveau possible pour atteindre les objectifs de production, sur la base des connaissances scientifiques les plus à jour. Par exemple, la mise en andains devrait être limitée aux seuls cas où la sécurité des travailleurs forestiers (reboiseurs et débroussailliers) serait compromise par l'abondance des débris de coupe.

Le suivi est souvent une activité du cycle de planification qui reçoit peu d'attention. Néanmoins, dans une perspective de gestion adaptative, essentielle à l'ajustement en continu du déploiement de l'aménagement écosystémique, il s'avère fondamental de vérifier si les objectifs ont été atteints (suivi de l'efficacité) et si les objectifs poursuivis sont encore valables ou si d'autres objectifs ont pu s'ajouter (suivi de la pertinence). Ainsi, il importe de prévoir les ressources nécessaires (humaines, financières et techniques) et d'identifier les hypothèses de production de services dès la mise en place des scénarios de plantation afin de vérifier, au cours des opérations courantes, l'atteinte non seulement des objectifs et prédictions de rendement ligneux, mais également de ceux liés à la naturalité des plantations.

Finalement, nous croyons que les efforts de recherche devraient être poursuivis ou entrepris sur les thèmes des enjeux de biodiversité associés à la sylviculture de plantations tant à l'échelle du peuplement qu'à l'échelle du paysage. Notamment, des efforts de recherche sont requis pour documenter les effets de la répartition des plantations dans le paysage sur différents attributs forestiers, de même que sur les espèces cibles (Tittler *et al.* 2012). Également, les efforts de recherche sur le risque d'envahissement et de dérive génétique par les espèces forestières exotiques plantées devraient être poursuivis (Gagné 2010). Il importe de vérifier les seuils établis pour gérer la proportion des peuplements jugés *altérés* ou *artificiels*, la rentabilité financière et économique des modulations du nettoiement, de l'éclaircie précommerciale et de l'éclaircie commerciale, ainsi que les effets de ces traitements sur les enjeux écologiques et les rendements ligneux réels des plantations dans un contexte opérationnel. La recherche appliquée devrait également s'attarder à l'élaboration de modulations opérationnelles de scénarios sylvicoles de plantation en vue de favoriser une plus grande naturalité des plantations, par exemple lors de la préparation de terrain et des traitements d'éducation. Les recherches devraient inclure l'évaluation de la rentabilité financière et économique de ces scénarios de plantation, en intégrant les retombées socioéconomiques et écologiques des plantations ayant un degré de naturalité plus élevé. Enfin, il est impératif de documenter l'apport des plantations plurispécifiques à la production ligneuse, à la naturalité et à la création d'autres services.

En conclusion, l'intégration de la sylviculture intensive de plantations à l'aménagement écosystémique fait appel à l'expertise et à la créativité des équipes de sylviculteurs et d'aménagistes. Dans le contexte de l'aménagement écosystémique, ou même, dans celui plus large de l'aménagement durable des forêts, nous estimons qu'il serait difficilement défendable de ne pas appliquer le type de solutions présentées lorsqu'on intervient dans une forêt comme celle du Québec qui, *a priori*, a largement conservé plusieurs des attributs de la forêt naturelle.

Remerciements

Nous remercions Alison Munson et Christian Messier qui ont révisé le rapport original ayant inspiré cet article. Nous remercions également Véronique Yelle qui a contribué à bonifier l'enjeu portant sur l'acceptabilité sociale. Enfin, nous remercions Denise Tousignant pour la révision linguistique de la version française de l'article, Aimée LeBreton pour sa traduction d'une première version en anglais et Maripierre Jalbert et Véronique Poirier pour le graphisme. Cet article est une adaptation du rapport du groupe d'experts sur la sylviculture intensive de plantations « *La sylviculture intensive de plantations dans un contexte d'aménagement écosystémique* ».

Bibliographie

- Beaulieu, J., G. Daoust, A. Deshaies, M.S. Lamhamedi, A. Rainville and M. Tourigny. 2009. Amélioration génétique des arbres, gestion des vergers à graines et de semences, et production de plants forestiers. In *Ordre des ingénieurs forestiers du Québec* (ed.). Manuel de foresterie. pp: 1093–1146. Éditions MultiMondes. Québec, QC.
- Boucher, Y., D. Arseneault and L. Sirois. 2009. Logging history (1820–2000) of a heavily exploited southern boreal forest landscape: insights from sunken logs and forestry maps. *For. Ecol. Manage.* 258(7): 1359–1368. doi:10.1016/j.foreco.2009.06.037.

- Boulay, E.** 2013. Ressources et industries forestières. Portrait statistique. Gouvernement du Québec. Ministère des Ressources naturelles.
- Bridgewater, P., E.S. Higgs, R.J. Hobbs and S.T. Jackson.** 2011. Engaging with novel ecosystems. *Front. Ecol. Environ.* 9(8): 423. doi:10.1890/1540-9295-9.8.423.
- Brockerhoff, E., H. Jactel and J. Parrotta.** 2008. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiver. Conserv.* 17(5): 925–951. doi:10.1007/s10531-008-9380-x.
- Brooks, J.J., A.N. Bujak, J.G. Champ and D.R. Williams.** 2006. Collaborative capacity, problem framing, and mutual trust in addressing the wildland fire social problem: an annotated reading list. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-182.
- Buitrago M., A. Paquette, N. Thiffault, N. Bélanger and C. Messier.** 2014. Early performance of planted hybrid larch: Effects of mechanical site preparation and planting depth. *New For.* (In press). doi: 10.1007/s11056-014-9463-3.
- Burkley, T.V.** 1989. Extinction in nature reserves: the effect of fragmentation and the importance of migration between reserve fragments. *Oikos* 55(1): 75–81.
- Colak, A., I. Rotherham and M. Calikoglu.** 2003. Combining 'naturalness concepts' with close-to-nature silviculture. *Forstw. Cbl.* 122(6): 421–431. doi:10.1007/s10342-003-0007-1.
- Comité scientifique sur les enjeux de biodiversité.** 2010. Enjeux de biodiversité de l'aménagement écosystémique dans la réserve faunique des Laurentides. Rapport du comité scientifique sous la direction de N. Thiffault. Min. Ress. Nat. Faune.
- Dare, M.** 2011. Improving the theory and practice of community engagement in Australian forest management. Ph.D. Thesis, University of Tasmania, Australia.
- Dare, M.L., J. Schirmer and F. Vanclay.** 2011. Does forest certification enhance community engagement in Australian plantation management? *For. Policy Econ.* 13(5): 328–337. doi:10.1016/j.forpol.2011.03.011
- Dennison, W.C.** 2008. Environmental problem solving in coastal ecosystems: a paradigm shift to sustainability. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 77(2): 185–196. doi:10.1016/j.ecss.2007.09.031.
- Desmarais, M.-È.** 2006. Le « processus d'harmonisation enjeux-solutions », un moyen efficace pour la gestion intégrée des ressources forestières du Québec. M.Sc. Thesis, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, QC.
- Duncan, S.L., B.C. McComb and K.N. Johnson.** 2010. Integrating ecological and social ranges of variability in conservation of biodiversity: past, present, and future [online]. *Ecol. Soc.* 15(1): 5. Disponible à www.ecologyandsociety.org/vol15/iss1/art5 [accessed 5 February 2014].
- Fahrig, L.** 2013. Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *J. Biogeogr.* 40(9): 1649–1663. doi:10.1111/jbi.12130.
- [FAO] **Organisation des Nations Unis pour l'alimentation et l'agriculture.** 2006. Global forest resources assessment 2005; progress towards sustainable forest management. Rome, Italy. FAO Forestry paper 147.
- Folke, C., S.R. Carpenter, B.H. Walker, M. Scheffer, T. Elmqvist, L.H. Gunderson and C.S. Holling.** 2004. Regime shifts, resilience and biodiversity in ecosystem management. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35: 557–581. doi:10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711.
- Franklin, J.F., R.J. Mitchell and B.J. Palik.** 2007. Natural disturbance and stand development principles for ecological forestry. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. NRS-19.
- [FSC] **Forest Stewardship Council.** 2009. Review of FSC Conversion Policy. Final Report of Expert Team D. FSC-DIS-30-005-V1-0 EN.
- Gagné, P.** 2010. État des connaissances sur les risques d'invasion par les hybrides de peupliers et de mélèzes. Réseau Ligniculture Québec, Québec, QC.
- Geneletti, D.** 2007. Expert panel-based assessment of forest landscapes for land use planning. *Mount. Res. Develop.* 27(3): 220–223.
- Grenon, F., J.-P. Jetté and M. Leblanc.** 2010. Manuel de référence pour l'aménagement écosystémique des forêts au Québec, Module 1—Fondements et démarche de la mise en œuvre. CERFO Min. Ress. Nat. Faune.
- Groupe d'experts sur la sylviculture intensive de plantations.** 2013. La sylviculture intensive de plantations dans un contexte d'aménagement écosystémique—Rapport du groupe d'experts, sous la direction de M. Barrette et M. Leblanc, Québec, QC.
- Gunningham, N., R.A. Kagan and D. Thornton.** 2004. Social licence and environmental protection: why businesses go beyond compliance. *Law & Soc. Inquiry* 29(2): 307–341. doi:10.1111/j.1747-4469.2004.tb00338.x.
- Howe, G.T., B. Shindler, B. Cashore, E. Hanson, D. Lach and W. Armstrong.** 2005. Public influences on plantation forestry. *J. For.* 103(2): 90–94.
- Hooper, D.U. et al.** 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol. Monogr.* 75(1): 3–35. doi:10.1890/04-0922.
- Jetté, J.-P., M.-A. Vaillancourt, A. Leduc and S. Gauthier.** 2008. Aménagement forestier écosystémique : origines et fondements. In S. Gauthier, M.-A. Vaillancourt, A. Leduc, L. De Grandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau and Y. Bergeron (dir.). *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. pp. 13–40. Presses de l'Université du Québec, Québec, QC.
- Jobidon, R.** 2000. Density-dependent effects of northern hardwood competition on selected environmental resources and young white spruce (*Picea glauca*) plantation growth, mineral nutrition, and stand structural development – a 5-year study. *For. Ecol. Manage.* 130(1-3): 77–97. doi:10.1016/S0378-1127(99)00176-0.
- Kelty, M.J.** 2006. The role of species mixtures in plantation forestry. *For. Ecol. Manage.* 233(2–3): 195–204. doi:10.1016/j.foreco.2006.05.011.
- Klooster, D.** 2010. Standardizing sustainable development? The Forest Stewardship Council's plantation policy review process as neoliberal environmental governance. *Geoforum* 41(1): 117–129. doi:10.1016/j.geoforum.2009.02.006.
- McKay, H.M.** 1996. A review of the effect of stresses between lifting and planting on nursery stock quality and performance. *New For.* 13(1-3): 363–393. doi:10.1023/A:1006563130976.
- Messier, C., R. Tittler, D.D. Kneeshaw, N. Gélinas, A. Paquette, K. Berninger, H. Rheault, P. Meek and N. Beaulieu.** 2009. TRIAD zoning in Quebec: experiences and results after 5 years. *For. Chron.* 85(6): 885–896. doi:10.5558/tfc85885-6.
- Messier C., K.J. Puettmann and K.D. Coates (eds).** 2013. Managing forests as complex adaptive systems: Building Resilience to the Challenge of Global Change. EarthScan, New York.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.** 2009. Document explicatif du projet de loi sur l'occupation du territoire forestier. Gouv. Québec.
- Nature Québec.** 2008a. Dossier noir de la réserve faunique de Matane : une réserve faunique qui ne réserve rien.
- Nature Québec.** 2008b. Dossier noir de la réserve faunique de Rimouski : une foresterie qui dégrade les habitats fauniques.
- Oliver, I.** 2002. An expert panel-based approach to the assessment of vegetation condition within the context of biodiversity conservation: Stage 1: the identification of condition indicators. *Ecol. Indic.* 2(3): 223–237. doi:10.1016/S1470-160X(02)00025-0.
- Paquette, A. and C. Messier.** 2010. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Front. Ecol. Environ.* 8(1): 27–34. doi:10.1890/080116.
- Paquette, A. and C. Messier.** 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 20(1): 170–180. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00592.x.

- Paquette A. and C. Messier. 2013.** Managing tree plantations as complex adaptive systems. *In* C. Messier, K.J. Puettmann and K.D. Coates (eds.). *Managing forests as complex adaptive systems: building resilience to the challenge of global change*. pp. 299–326. Earth-Scan from Routledge, New York.
- Paquette, A., A. Bouchard and A. Cogliastro. 2006.** Survival and growth of under-planted trees: A meta-analysis across four biomes. *Ecol. Appl.* 16(4): 1575–1589. doi:10.1890/1051-0761(2006)016[1575:SAGOUT]2.0.CO;2.
- Park, A. and E.R. Wilson. 2007.** Beautiful Plantations: can intensive silviculture help Canada to fulfill ecological and timber production objectives? *For. Chron.* 83(6): 825–839. doi: 10.5558/tfc83825-6.
- Pawson, S.M., A. Brin, E.G. Brockerhoff, D. Lamb, D.B. Lindenmayer, T.W. Payn, A. Paquette and J.A. Parrotta. 2013.** Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodivers. Conserv.* 22(5): 1203–1227. doi:10.1007/s10531-013-0458-8.
- Pitt, D.G., R.G. Wagner and W.D. Towill. 2004.** Ten years of vegetation succession following ground-applied release treatments in young black spruce plantations. *North. J. Appl. For.* 21(3): 123–134.
- Prégent, G. 1998.** Léclaircie des plantations. *Min. Ress. Nat. Mém. Rech. For.* 133.
- Prégent, G., G. Picher and I. Auger. 2010.** Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec. *Min. Ress. Nat. Mém. Rech. For.* 160.
- Pretzsch, H. 2009.** Effects of species mixture on tree and stand growth. *In* H. Pretzsch (ed.). *Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model*. pp. 337–380. Springer, Berlin.
- Pretzsch, H., J. Block, J. Dieler, P.H. Dong, U. Kohnle, J. Nagel, H. Spellmann and A. Zingg. 2010.** Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. *Ann. For. Sci.* 67(7): 712. doi:10.1051/forest/2010037.
- Prévost, M. and N. Thiffault. 2013.** La préparation de terrain. *In* C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond and J.-P. Saucier (eds.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2, Les concepts et l'application de la sylviculture*. pp. 135–157. Les Publications du Québec, Québec, QC.
- Prno, J. and D.S. Slocombe. 2012.** Exploring the origins of 'social license to operate' in the mining sector: Perspectives from governance and sustainability theories. *Resour. Policy* 37(3): 346–357. doi:10.1016/j.resourpol.2012.04.002.
- Puettmann, K.J. 2011.** Silvicultural challenges and options in the context of global change: "simple" fixes and opportunities for new management approaches. *J. For.* 109(6): 321–331.
- Puettmann, K.J., K.D. Coates and C. Messier. 2009.** A critique of silviculture: managing for complexity. Island Press, Washington, DC.
- Radosevich, S.R. and K. Osteryong. 1987.** Principles governing plant-environment interactions. *In* J.D. Walstad and P.J. Kuch (eds.). *Forest Vegetation Management for Conifer Production*. pp. 105–156. John Wiley and Sons, New York.
- Roy, M.-É., A. Roberge, L. Deschênes and J. Pâquet. 2010.** Évaluation du processus de gestion participative du projet de développement d'une approche d'aménagement écosystémique dans la réserve faunique des Laurentides. *Min. Ress. Nat. Faune*.
- Rüdiger, J., E. Tasser and U. Tappeiner. 2012.** Distance to nature—A new biodiversity relevant environmental indicator set at the landscape level. *Ecol. Indic.* 15(1): 208–216. doi:10.1016/j.ecolind.2011.09.027.
- Simard, M., N. Lecomte, Y. Bergeron, P. Y. Bernier and D. Paré. 2007.** Forest productivity decline caused by successional paludification of boreal soils. *Ecol. Appl.* 17(6): 1619–1637. doi:10.1890/06-1795.1.
- Stephens, S.S. and M.R. Wagner. 2007.** Forest plantations and biodiversity: a fresh perspective. *J. For.* 105(6): 307–313.
- St-Hilaire, G. 2011.** L'enrichissement en épinette blanche à la Forêt Montmorency, un traitement sylvicole de restauration écosystémique dans la sapinière à bouleau blanc de l'Est. M.Sc. Thesis, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, QC.
- Szaro, R.C. and C.E. Peterson. 2004.** Evolving approaches toward science-based management. *For. Snow Landsc. Res.* 78(1–2): 9–20.
- Thiffault, N. and V. Roy. 2011.** Living without herbicides in Québec (Canada): historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management. *Eur. J. For. Res.* 130(1): 117–133. doi:10.1007/s10342-010-0373-4.
- Thiffault, N., V. Roy, J. Ménérier, G. Prégent and A. Rainville. 2013.** La plantation. *In* C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond and J.-P. Saucier (eds.). *Le guide sylvicole du Québec, Tome 2, Les concepts et l'application de la sylviculture*. pp. 196–225. Les Publications du Québec, Québec, QC.
- Tittler, R., C. Messier and A. Fall. 2012.** Concentrating anthropogenic disturbance to balance ecological and economic values: applications to forest management. *Ecol. Appl.* 22(4):1268–1277. doi:10.1890/11-1680.1.
- Tjørve, E. 2010.** How to resolve the SLOSS debate: lessons from species-diversity models. *J. Theor. Biol.* 264(2): 604–612. doi:10.1016/j.jtbi.2010.02.009.
- Tobner, C.M., A. Paquette, P.B. Reich, D. Gravel and C. Messier. 2014.** Advancing biodiversity – ecosystem functioning science with the use of high-density tree-based experiments. *Oecologia* 174(3):609–621. doi:10.1007/s00442-013-2815-4.
- Wagner, R.G., K.M. Little, B. Richardson and K.L. McNabb. 2006.** The role of vegetation management for enhancing productivity of the world's forests. *Forestry* 79(1): 57–79. doi:10.1093/forestry/cpi057.
- Walker, B., C.S. Holling, S.R. Carpenter and A. Kinzig. 2004.** Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems [online]. *Ecol. Soc.* 9(2): 5. Available at www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/ [Accessed 5 February 2014].
- Wilshusen, P.R. and R.L. Wallace. 2009.** Integrative problem-solving: the policy sciences as a framework for conservation policy and planning. *Policy Sci.* 42(2): 91–93. doi:10.1007/s11077-009-9092-4.
- Winter, S. 2012.** Forest naturalness assessment as a component of biodiversity monitoring and conservation management. *Forestry* 85(2): 293–304. doi:10.1093/forestry/cps004.
- Winter, S., H.S. Fischer and A. Fisher. 2010.** Relative quantitative reference approach for naturalness assessments of forests. *For. Ecol. Manage.* 259(8): 1624–1632. doi:10.1016/j.foreco.2010.01.040.
- Zhang, Y., H.Y.H. Chen and P.B. Reich. 2012.** Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. *J. Ecol.* 100(3): 742–749. doi:10.1111/j.1365-2745.2011.01944.x.