

PROGRAMME DE MISE EN VALEUR DES RESSOURCES DU MILIEU FORESTIER – VOLET 2

Rapport final

DÉFINITION DES OBJECTIFS DE PRODUCTION ET SCÉNARIOS SYLVICOLES POUR LES PRINCIPALES PRODUCTIONS DES FORÊTS PRIVÉES DE L'ABITIBI

Présenté à :

Agence de mise valeur des forêts privées de l'Abitibi

Et

Société d'Exploitation Sylvicole Rousseau inc.

Syndicat des producteurs de bois de l'Abitibi-
Témiscamingue
Ville de Rouyn-Noranda
MRC Abitibi
MRC Abitibi-Ouest
MRC Vallée de l'Or

Par :



Centre d'enseignement et de recherche
en foresterie de Sainte-Foy inc.

Sylvie Côté, ing.f., M. Sc.
Guy Lessard, ing.f., M. Sc.
Donald Blouin, ing.f., M.Sc.

Juin 2011

Référence à citer :

Côté, S., G. Lessard et D. Blouin. 2011. Définition des objectifs de production et scénarios sylvicoles pour les principales productions des forêts privées de l'Abitibi. CERFO. Rapport 2011-17. 63 pages + 2 annexes.

BÉNÉFICIAIRE DU PROJET

- **Agence de mise en valeur des forêts privées de l'Abitibi**

PARTENAIRES DU PROJET

- **Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO)**
Mme Sylvie Côté, ing.f., M.Sc.
M. Guy Lessard, ing.f., M.Sc.
M. Donald Blouin, ing.f., M.Sc.
- **Société d'Exploitation Sylvicole Rousseau inc.**
M. Félix Guay, ing.f.
- **Agence de mise valeur des forêts privées de l'Abitibi**
- **Syndicat des producteurs de bois de l'Abitibi-Témiscamingue**
- **Ville de Rouyn-Noranda**
- **MRC Abitibi**
- **MRC Abitibi-Ouest**
- **MRC Vallée de l'Or**

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| BÉNÉFICIAIRE DU PROJET | I |
| PARTENAIRES DU PROJET | I |
| TABLE DES MATIÈRES | II |
| LISTE DES FIGURES | IV |
| LISTE DES TABLEAUX | IV |
| REMERCIEMENTS | V |
| RÉSUMÉ | VI |
| INTRODUCTION | 1 |
| OBJECTIFS | 1 |
| 1. CONTEXTE ACTUEL..... | 2 |
| 1.1. <i>Portrait forestier actuel</i> | 2 |
| 2. REVUE DE LITTÉRATURE..... | 4 |
| 2.1. <i>Les propriétés du bois</i> | 4 |
| 2.1.1. La qualité des bois..... | 4 |
| 2.1.2. Effets de la densité du peuplement sur les propriétés du bois..... | 8 |
| 2.1.2.1. Effets sur les caractéristiques anatomiques..... | 8 |
| 2.1.2.2. Effets sur les caractéristiques physiques..... | 9 |
| 2.1.2.3. Effets sur les caractéristiques mécaniques..... | 9 |
| 2.1.3. Propriétés des bois résineux de plantations..... | 10 |
| 2.2. <i>Nouveaux produits forestiers</i> | 12 |
| 2.2.1. Bioénergie et biocombustibles..... | 13 |
| 2.2.2. Produits biochimiques..... | 15 |
| 2.2.3. La cellulose nanocristalline (CNC)..... | 15 |
| 2.2.4. Biomatériaux..... | 16 |
| 2.2.4.1. Bois classé mécaniquement (MSR)..... | 16 |
| 2.2.4.2. Bois d'œuvre lamellé croisé (BOLC)..... | 17 |
| 2.2.4.3. Bois transformé..... | 18 |
| 2.3. <i>Exemples de produits en fonction des caractéristiques du bois</i> | 19 |
| 2.3.1. Caractéristiques et utilisations potentielles du bois de mélèze..... | 21 |
| 2.4. <i>Qualité des bois et sylviculture</i> | 21 |
| 2.4.1. Éclaircie..... | 22 |
| 2.4.1.1. Éclaircie commerciale..... | 24 |
| 2.4.1.2. Éclaircie précommerciale..... | 31 |
| 2.4.2. Fertilisation..... | 33 |
| 2.4.3. Élagage..... | 34 |
| 2.4.4. Méthodes de régénération pour l'épinette noire..... | 36 |
| 2.4.4.1. Problématique de la régénération naturelle de l'épinette noire à la suite de CPRS..... | 36 |
| 2.4.4.2. Les coupes progressives comme méthodes de régénération des forêts naturelles..... | 36 |
| 2.4.4.3. La plantation..... | 40 |
| 2.4.5. Sylviculture des peupliers..... | 41 |
| 3. OBJECTIFS DE PRODUCTION ET SYLVICULTURE..... | 42 |
| 3.1. <i>Densité du peuplement, propriétés du bois et produits anticipés</i> | 42 |
| 3.2. <i>Actions sylvicoles, propriétés du bois et produits anticipés</i> | 44 |
| 4. SCÉNARIOS SYLVICOLES..... | 47 |
| 4.1. <i>Grands principes retenus pour l'élaboration des scénarios sylvicoles</i> | 48 |
| 4.1.1. Densité initiale..... | 48 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 4.1.2. | Éclaircies | 49 |
| 4.1.3. | Élagage et taille de formation | 50 |
| 4.1.4. | Durée de la révolution | 50 |
| 4.1.5. | Mode de régénération | 50 |
| 4.2. | <i>Présentation des scénarios sylvicoles</i> | 52 |
| 4.2.1. | Production SEPM | 52 |
| 4.2.2. | Production mixte..... | 53 |
| 4.2.3. | Production peupliers | 54 |
| 5. | CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES | 56 |
| 6. | AUTRES PISTES DE SOLUTIONS | 57 |
| CONCLUSION | | 58 |
| RÉFÉRENCES..... | | 59 |
| ANNEXE 1. SCÉNARIOS DÉTAILLÉS..... | | 64 |
| ANNEXE 2. SCÉNARIOS RÉSUMÉS À L'INTENTION DES PROPRIÉTAIRES | | 70 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1. Tailles maximales des nœuds permises sur les bords et au centre des pièces de 2X4, 2X8 et 2X12 pour le classement des sciages de la catégorie « solives et madriers structuraux » pour le groupe épinette-pin-sapin | 6 |
| Figure 2. Orientation des microfibrilles dans le bois mature, le bois juvénile et le bois de compression | 7 |
| Figure 3. Gamme de produits et coproduits possibles à valeur ajoutée | 13 |
| Figure 4. Diagramme de gestion de la densité pour les pessières noires à mousses et hypnacées | 26 |
| Figure 5. Diagramme de gestion de la densité pour les pessières noires à sphaignes | 27 |
| Figure 6. Diagramme de gestion de la densité pour les pinèdes grises de classe de fertilité I | 28 |
| Figure 7. Diagramme de gestion de la densité pour les pinèdes grises de classe de fertilité II | 29 |
| Figure 8. Rendement en sciages de dimensions diverses selon les classes de diamètre au fin bout | 30 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Liste des preneurs actuels pour les bois provenant du territoire couvert par la SES Rousseau | 2 |
| Tableau 2. Produits et caractéristiques recherchées | 19 |
| Tableau 3. Proportions de sciages par classe MSR en fonction de l'intensité de l'EPC | 32 |
| Tableau 4. Relations générales entre la densité du peuplement, les propriétés du bois et les produits anticipés | 43 |
| Tableau 5. Relations générales entre les produits et les interventions sylvicoles | 44 |

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude a été possible grâce à l'engagement financier de l'Agence de mise en valeur des forêts privées de l'Abitibi, du Syndicat des producteurs de bois de l'Abitibi, du ministère des Ressources naturelles et de la Faune par le biais du programme de volet 2, de la Ville de Rouyn-Noranda, des MRC d'Abitibi, d'Abitibi-Ouest et de la Vallée de l'Or, ainsi que la contribution de la Société d'exploitation sylvicole de Rousseau inc. Nous tenons à remercier M. Félix Guay, directeur de la Société d'exploitation sylvicole Rousseau pour sa confiance, sa contribution au portrait actuel et sa participation active aux discussions entourant l'élaboration des scénarios.

RÉSUMÉ

Ce projet s'inscrit dans le cadre des activités de l'Agence de mise en valeur des forêts privées de l'Abitibi dont les orientations, pour l'horizon 2010-2014, visent notamment à y intensifier l'aménagement forestier (orientation No 1) et améliorer la planification des travaux sylvicoles (orientation No 2).

Les buts spécifiques étaient de définir des objectifs de production et élaborer les scénarios sylvicoles intégrant la prise en compte de la qualité des bois produits, à partir d'une revue de littérature portant sur l'effet des pratiques sylvicoles sur les propriétés du bois. Il s'agissait notamment de mieux documenter l'incidence de la densité des plantations sur les caractéristiques du bois.

Les scénarios sylvicoles élaborés permettront de doter les conseillers forestiers oeuvrant dans les forêts privées de l'Abitibi d'outils visant à faciliter et orienter leur prise de décision en forêt.

INTRODUCTION

Pour l'horizon 2010-2014, les orientations stratégiques de l'Agence de mise en valeur des forêts privées de l'Abitibi¹ visent notamment à y intensifier l'aménagement forestier (orientation No 1) et améliorer la planification des travaux sylvicoles (orientation No 2). En ce qui a trait à l'intensification de l'aménagement forestier, l'Agence vise, entre autres, à définir les objectifs de production visant une diversité de produits et une valeur ajoutée aux bois, à définir des scénarios sylvicoles optimaux et à exercer une veille sur les opportunités à venir dans l'industrie du bois en s'informant sur les nouveaux produits et sur l'utilisation des produits à valeur ajoutée et de la biomasse. Pour ce qui est de l'amélioration de la planification des travaux, l'Agence désire notamment sécuriser les investissements en assurant la réalisation complète des scénarios sylvicoles, améliorer la planification de ses travaux futurs et mieux définir ses priorités.

Dans ce contexte, la Société d'Exploitation Sylvicole Rousseau, en collaboration avec le CERFO, a été mandatée pour réaliser ce projet.

OBJECTIFS

Ce projet a pour buts spécifiques de définir des objectifs de production et d'élaborer les scénarios sylvicoles intégrant la prise en compte de la qualité des bois produits. À cet effet, une enquête auprès de l'industrie a été réalisée afin de dresser le portrait des besoins actuels. Ensuite, une revue de littérature a permis de préciser l'incidence des pratiques sylvicoles sur les propriétés du bois, en s'attardant notamment à mieux documenter les effets de la densité des plantations sur les caractéristiques du bois. La recherche visait aussi à glaner les informations relatives aux nouvelles utilisations du matériau bois. L'information recueillie a servi de base à l'élaboration de scénarios sylvicoles intégrant la prise en compte de la qualité des bois produits.

¹ http://www.arfpa.ca/documents/pages/agence_orientations-strategiques-2010-2014.pdf

1. CONTEXTE ACTUEL

Le contexte économique actuel dans le monde forestier exige de faire mieux avec ce que l'on a.

1.1. PORTRAIT FORESTIER ACTUEL

Les espèces présentes sur le territoire couvert par l'Agence de mise en valeur des forêts privées de l'Abitibi sont : l'épinette noire, l'épinette blanche, le sapin baumier, le pin gris, le mélèze, le peuplier faux-tremble, le peuplier baumier et le bouleau à papier. Il y a également eu quelques reboisements en peupliers hybrides.

Pour le peuplier, l'offre dépasse la demande, si bien que plusieurs peuplements vieillissants se perdent.

Les preneurs de bois potentiels sont présentés au tableau suivant.

Tableau 1. Liste des preneurs actuels pour les bois provenant du territoire couvert par la SES Rousseau

| Nom de l'entreprise | Produits | Essences | Remarques |
|---|----------|--|---|
| Industries Norbord inc. (La Sarre – Panneaux) | F | BOP, PEU | |
| Industries Norbord inc. (Val d'Or – Panneaux) | F | BOP, PEU | |
| Tembec (La Sarre) | C, S | SEPM | Pas d'achat de bois de forêt privée depuis 2006 |
| Tembec (Tachereau) | C, S | SEPM | Fermeture permanente annoncée en février 2011 |
| Matériaux Blanchet inc. (Amos) | C, S | SEPM | |
| Scierie Landrienne inc. (Landrienne) | C, S | SEPM | |
| Global LVL (Ville-Marie) | D | PEU, BOP | |
| Stella-Jones inc. (Masson-Angers – Poteaux) | G | PIG | |
| Uniboard | F | Principalement SEPM, mais peut mettre n'importe quelle essence | Achète uniquement des copeaux |

Produits :

C : Copeaux

S : Sciage

F : Panneaux

G : Tournage, façonnage (poteaux)

Actuellement, il y a des preneurs pour les bois de sciage mesurant au moins 8 cm au fin bout, mais le marché pour les bois résineux de qualité « pâte » est limité et instable. Pour le moment, ces bois sont utilisés par les Industries Norbord qui peuvent intégrer une petite portion de résineux dans leurs panneaux. Il y a aussi la SOCCAM de Senneterre qui achète du bois pour le déchiqueter, puis vend les copeaux à Uniboard.

Deux industriels ont fourni des précisions concernant les produits qu'ils recherchent : Matériau Blanchet et Eacom. Ces précisions sont rapportées ci-dessous.

Matériaux Blanchet inc.

Billes idéales

Longueur : épinette noire, la plus grosse possible, la plus droite possible, avec le moins de défilement possible.

Tronçonné : épinette noire 16' 6'', la plus grosse possible, la plus droite possible, avec le moins de défilement possible.

Billes acceptables

Longueur : résineux (incluant MEL mais en faible quantité), au minimum 14 cm de diamètre à la souche sous écorce avec au maximum la demie du diamètre en courbure.

Tronçonné : résineux, 8' 4'' ou 10' 4'' au minimum de 8 centimètres au fin bout sous écorce avec au maximum la demie du diamètre en courbure.

Marchés futurs

Avec la venue des bois d'ingénierie sur les marchés, les produits qui nous intéressent sont ceux avec des particularités supérieures en résistance, par exemple les bois MSR. Donc, des produits issus de l'épinette noire avec une croissance plutôt lente. Dans le même ordre d'idée, les bois d'apparence offrent de bonnes opportunités d'affaires. Ces produits sont généralement issus de bois de plus forte dimension.

Eacom

Pour le bois de sciage SEPM colompage, Eacom privilégie l'épinette, de haute densité, en tronçons de 10 pieds 4 pouces présentant peu de courbes. Le volume par bille doit être idéalement de plus de 40 dm³. L'épinette haute densité permet de produire plus de valeur (MSR) et ce marché est en développement. Le diamètre moyen minimum des billes devrait donc être de plus de 12 cm.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature est divisée en 3 parties : les propriétés du bois, les nouveaux produits forestiers, puis la qualité des bois en relation avec la sylviculture.

2.1. LES PROPRIÉTÉS DU BOIS

La qualité du bois se définit sur la base de facteurs mécaniques, physiques, biologiques, esthétiques et structuraux qui déterminent plusieurs propriétés du bois (Cloutier, 2008). Les propriétés physiques et mécaniques couramment utilisées pour déterminer la qualité de bois correspondent à la masse volumique, la densité basale, la dureté, les différents types de retraits (total, radial, tangentiel), ainsi que les modules d'élasticité et de rupture. Les facteurs biologiques sont la résistance à la pourriture, aux termites et au vieillissement et ils déterminent la durabilité naturelle du bois. Les facteurs esthétiques sont la couleur, le grain et la texture, alors que les facteurs structuraux correspondent à la proportion duramen/aubier, la forme des billes, la taille et la fréquence des nœuds et la pente du fil.

2.1.1. La qualité des bois

La qualité du bois est perçue différemment par les forestiers, les manufacturiers et les consommateurs (Zhang, 1997b dans Alteryac, 2005). En fait, il s'agit d'une notion reliée à l'utilisation et une caractéristique pourra être recherchée dans un cas (ex : faible masse volumique du bois pour l'isolation thermique), alors que ce sera son contraire pour un autre usage (forte masse volumique pour les parquets). Étant donné les multiples utilisations possibles du bois, on se réfère souvent aux caractéristiques chimiques, anatomiques, physiques et mécaniques du bois, qui sont considérées comme des facteurs de qualité du bois.

La notion de qualité dépend donc du produit désiré (Beaulieu, 2006). À titre indicatif, les bois de structure doivent avoir une résistance et une rigidité élevées, alors que les bois d'apparence doivent être durs et présenter une bonne stabilité dimensionnelle. Dans l'industrie du sciage, la classification visuelle des bois utilisée se base sur la grosseur, l'emplacement et la fréquence des nœuds (Alteryac, 2005) (voir figure 1). Il existe également un classement mécanique (MSR, par essais de flexion statique) pour les produits destinés à la construction. L'angle des microfibrilles de la paroi cellulaire S2 par rapport à l'axe de la cellule joue un rôle important sur le retrait et les propriétés mécaniques (voir figure 2). Les modules d'élasticité (MOE) (ou rigidité) et de rupture

(MOR) en flexion (ou résistance) sont les caractéristiques mécaniques les plus utilisées pour déterminer la qualité du bois, bien qu'il en existe de nombreuses autres. Le module d'élasticité correspond à la force maximale que la pièce peut supporter sans subir de déformation permanente, alors que le module de rupture équivaut à la force nécessaire pour casser la pièce (Zhang *et al.*). Enfin, plusieurs caractéristiques anatomiques permettent de distinguer le bois juvénile du bois mature, dont l'orientation des microfibrilles et la longueur des fibres (Alteryac, 2005) (figure 2). Chez les bois résineux, il peut y avoir formation de bois de compression en raison de l'effet de la pente, de vents dominants ou de cimes déséquilibrées (qui peut être évitée grâce à l'éclaircie). La présence de bois de compression dans une pièce de bois en réduit la résistance mécanique et augmente le retrait longitudinal à cause de l'angle très fort des microfibrilles (Cloutier, 2007).

Dans l'industrie des pâtes et papiers, la longueur des trachéïdes, l'épaisseur des parois et la surface des rayons ligneux en coupe tangentielle sont les principaux descripteurs utilisés pour déterminer la qualité, étant donné leur incidence sur le procédé de fabrication et la résistance du papier (Alteryac, 2005). Règle générale, des fibres plus longues donnent des papiers plus résistants (Cloutier, 2007). Plus spécifiquement, la fabrication de papiers fins nécessite des bois ayant des trachéïdes longues (>2 mm) et fines, les papiers journaux, des trachéïdes longues et plus grosses, les papiers absorbants, des trachéïdes courtes mais grosses et les papiers mouchoirs, de petites trachéïdes fines (Beaulieu, 2006).

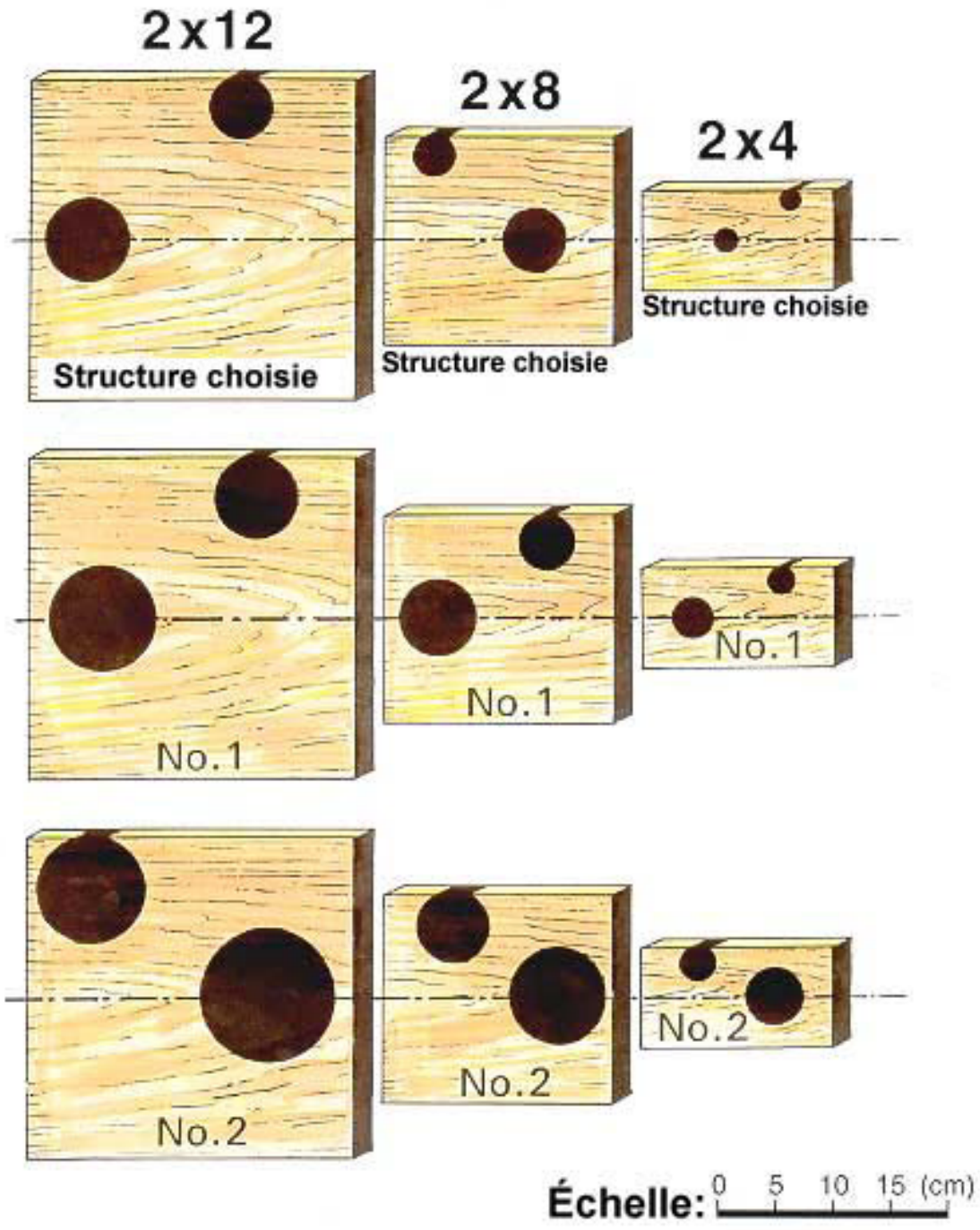


Figure 1. Tailles maximales des nœuds permises sur les bords et au centre des pièces de 2X4, 2X8 et 2X12 pour le classement des sciages de la catégorie « solives et madriers structuraux »² pour le groupe épinette-pin-sapin

² NLGA, 1991 dans Cloutier, 2007

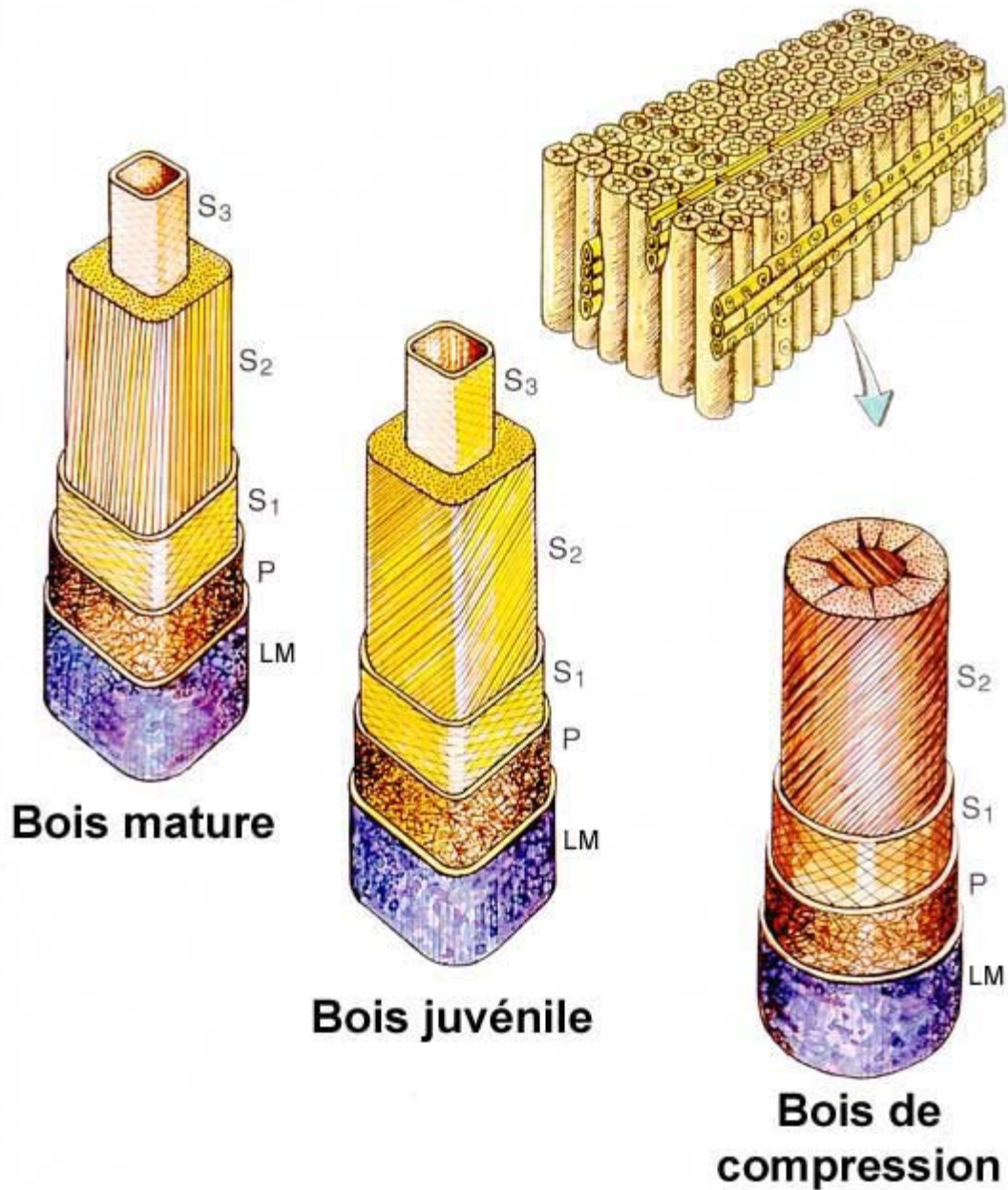


Figure 2. Orientation des microfibrilles dans le bois mature, le bois juvénile et le bois de compression³

Les propriétés du bois varient à l'intérieur même de l'arbre. La prise en compte de ces variations, notamment des différences entre le bois juvénile et le bois mature, peut permettre de réduire l'hétérogénéité et d'augmenter la valeur des produits. De plus, les différences de propriétés en fonction de la hauteur dans l'arbre indiquent qu'il serait possible d'obtenir des prix

³ Adapté de Jozsa et Middleton, 1997, dans Cloutier, 2007

différents selon que la bille de 8 pi provienne du bas ou du haut de l'arbre (Alteryac, 2005). Les pièces de bois provenant du haut de la tige présentent généralement des nœuds plus importants et plus fréquents, ce qui se traduit par des propriétés mécaniques plus faibles (Zhang *et al.*).

2.1.2. Effets de la densité du peuplement sur les propriétés du bois

La densité du peuplement a un effet plus important sur les caractéristiques associées à la croissance de l'arbre que sur la masse volumique du bois (Alteyrac, 2005).

2.1.2.1. Effets sur les caractéristiques anatomiques

La largeur et la surface des cernes annuels tendent à diminuer avec une augmentation de la densité du peuplement. Aussi, plus la croissance est rapide, plus les fibres sont courtes.

Règle générale, un espacement large entre les arbres favorise la croissance des branches, ce qui peut nuire à la qualité du bois. L'espacement entre les arbres influence aussi le diamètre du tronc, la hauteur des arbres, leur défilement et la localisation des branches (Alteryac, 2005). Le diamètre du tronc, la taille du houppier et le diamètre des branches augmentent lorsque la densité du peuplement diminue. La hauteur de l'arbre, qui est une variable principalement reliée à la qualité de station, peut tout de même être affectée négativement lorsqu'il y a trop d'oppression dans le peuplement. Les arbres se développant en milieu ouvert ont un moins bon rendement en sciage en raison de la présence de gros nœuds et de la plus grande proportion de bois juvénile. De plus, la présence de nœuds affecte leur classement.

Indications spécifiques

Les épinettes noires très espacées ont des trachéïdes plus courtes et il semble que les trachéïdes des arbres des peuplements naturels soient plus longues que celles des peuplements aménagés (Yang et Hazenberg, 1993).

Chez le pin gris, la nodosité constitue un facteur déterminant pour la qualité des sciages. La nodosité augmente de manière exponentielle lorsque la densité passe de 2500-5000 tiges/ha à 1000-2500 tiges/ha (Schneider *et al.*).

2.1.2.2. Effets sur les caractéristiques physiques

L'espacement entre les arbres influence la masse volumique du bois qui est très variable d'une espèce à l'autre. Étant donné qu'il existe des liens entre la masse volumique et le retrait du bois, l'espacement entre les arbres peut aussi influencer le retrait, particulièrement les retraits radial et tangentiel (Alteyrac, 2005).

Indications spécifiques

Pour l'épinette noire, une comparaison de la masse volumique obtenue avec 3 espacements initiaux (1.8 m, 2.7 m et 3.6 m) a permis de constater que la masse volumique la plus élevée provenait d'un espacement de 1,8 m X 1,8 m (soit environ 3000 tiges/ha) (Yang et Hazenberg, 1993). La masse volumique demeurerait élevée jusqu'à une densité de 1400 arbres/ha, et diminuerait significativement en deçà de cette densité (Zhang et Chauret, 2001 dans Alteyrac, 2005).

Pour l'épinette de Norvège, le bois le plus dense serait obtenu dans un peuplement faiblement espacé (1,5 m X 1,5 m) (Johansson, 1993 dans Alteyrac, 2005).

Pour le peuplier, l'espacement aurait une influence importante sur la longueur des fibres, le diamètre et l'épaisseur de la paroi des fibres, la longueur des vaisseaux et leur diamètre (Kasir, 1990 dans Alteyrac, 2005).

2.1.2.3. Effets sur les caractéristiques mécaniques

De manière générale, la densité du peuplement affecte les modules d'élasticité et de rupture, mais d'une façon qui peut différer selon les espèces. Les propriétés mécaniques dépendent de la structure de la paroi cellulaire et il existe de fortes relations entre l'angle des microfibrilles, l'épaisseur des parois et les propriétés mécaniques du bois (Alteyrac, 2005).

La densité du peuplement, lorsqu'elle se situe entre 1790 et 3400 tiges/ha, a davantage d'effets sur la croissance (largeur et surface des cernes) que sur les propriétés liées à la masse volumique. Les effets plus importants se feraient sentir en deçà de ces densités (Alteyrac, 2005).

Indications spécifiques

Chez l'épinette noire, les modules de rupture et d'élasticité seraient plus faibles chez les arbres des peuplements moins denses (Zhang *et al.* 2002). Ces modules sont significativement moindres dans la plantation de 1372 ti/ha, lorsque comparés à des densités de 2066, 2500 ou 3086 ti/ha.

Les valeurs obtenues pour ces trois derniers niveaux de densités étaient du même ordre, avec une tendance à être très légèrement supérieures avec une densité de 3086 ti/ha.

Chez le pin gris, les propriétés mécaniques (MOR et MOE) augmentent avec la densité de la plantation (Zhang *et al.*). Les billes de pied présentent des caractéristiques plus intéressantes que les billes du haut, pour toutes les densités de plantation.

2.1.3. Propriétés des bois résineux de plantations

Les propriétés du bois diffèrent à l'intérieur de l'arbre, notamment entre le bois juvénile et le bois mature. Le bois juvénile correspond au bois des premiers cerne à partir de la moelle, formés durant les premières années de la vie de l'arbre alors qu'il était en phase de croissance rapide (période qui dure environ 20 ans). Ensuite, la croissance ralentit progressivement avec la fermeture du couvert, ce qui modifie les caractéristiques et propriétés du bois. Par rapport au bois mature, le bois juvénile est moins dense, il possède des trachéïdes plus courtes, l'angle des microfibrilles est plus grand, la quantité de lignine est plus élevée, tandis que la quantité de cellulose est plus faible (Beaulieu, 2006). Les propriétés du bois changent aussi selon la hauteur dans l'arbre. D'ailleurs, les variations dans les caractéristiques du bois en fonction de la hauteur dans l'arbre peuvent être plus importantes que celles induites par des différences de densité du peuplement (Alteyrac, 2005).

À diamètre égal, la proportion de bois juvénile est plus importante chez les arbres ayant une croissance rapide et une cime développée. Ainsi, les mesures sylvicoles visant à accélérer la croissance en bas âge peuvent engendrer une augmentation de la proportion de bois juvénile et même en prolonger la période de production (Cloutier, 2007).

Une proportion plus importante de bois juvénile provoque davantage de gauchissement au séchage, en raison du retrait longitudinal qui est 5 fois plus important dans le bois juvénile (Cloutier, 2007). La résistance mécanique du bois juvénile est inférieure par rapport au bois mature, ce qui confère à ces bois une valeur moindre dans les produits structuraux en bois d'ingénierie (Beauregard, 2008). L'abondance de bois juvénile réduit le rendement en bois classé mécaniquement (bois MSR) (Beauregard, 2008). Enfin, le rendement du bois juvénile est plus faible que celui du bois mature pour la production de pâtes et papiers (Cloutier, 2007).

Plus la densité du bois est élevée, meilleure est la qualité des produits de seconde transformation (Beaulieu, 2004). De faibles propriétés mécaniques peuvent être améliorées par un allongement de la révolution, puisque la proportion de bois juvénile diminue avec l'âge de l'arbre. Le taux de récupération du bois d'œuvre (pmp/ti) et la valeur de la tige individuelle augmentent avec l'âge du peuplement. Aussi, la maximisation du rendement financier et des propriétés mécaniques pour un territoire donné nécessite une récolte plus tardive en comparaison avec un scénario qui maximise le volume produit (Zhang *et al.*). À titre indicatif, les propriétés mécaniques du bois d'œuvre issu d'un peuplement de pin gris âgé de 73 ans sont supérieures à celles du bois d'œuvre provenant d'un peuplement de 50 ans, mais aucune différence n'a été observée par rapport à un peuplement de 90 ans, car le déclassement causé par la présence de carie s'accroît avec l'âge du peuplement.

Le bois d'éclaircie de jeunes plantations (d'épinette blanche) est largement juvénile et les faibles propriétés mécaniques ne rencontrent pas les normes de bois de charpente. Par contre, il pourrait être utilisé dans la fabrication de contreplaqués de revêtement et une forte proportion pourrait aussi être utilisée dans les plaquages stratifiés. L'élagage des plantations d'épinette blanche pourrait permettre d'accélérer la production de bois mature. L'élagage artificiel ou l'utilisation d'espacements favorisant l'élagage naturel aiderait à l'obtention d'une meilleure qualité. Soulignons que le problème de nodosité est plus important avec l'épinette blanche par rapport à la noire, puisque cette dernière a des branches plus petites. D'ailleurs, pour l'épinette noire, bien que la dimension des branches augmente de façon constante avec une diminution de la densité passant de 3086, à 2500, puis à 2066 arbres/ha (Zhang *et al.* 2002), il n'y aurait pas d'effets sur le classement « *select structural grade* » résultant de chacune de ces densités, lorsque les plantations sont âgées de 48 ans. Ces résultats s'expliquent par la petite taille des branches de l'épinette noire qui fait en sorte que les noeuds ne dépassent pas la dimension maximale autorisée pour maintenir la cote de qualité élevée lors de la production de sciage de 2 X 4 ou de 2 X 6. Par contre, avec une densité de 1372 tiges/ha, il y a une proportion moindre des échantillons qui a été classée dans le grade « *select* » et une plus grande partie dans le grade No 2 (Zhang *et al.* 2002). Le module d'élasticité longitudinal, qui correspond à une mesure de la rigidité, est corrélé positivement à la densité mais négativement à la croissance radiale (Beaulieu, 2006).

Il existe des différences significatives entre le bois d'épinette blanche de plantation et celui provenant de forêts de seconde venue, en ce qui a trait au retrait et au gauchissement. Par rapport au bois des arbres de la forêt de seconde venue, le bois des plantations présente davantage de torsion mais moins de cambrure, phénomènes qui causent des déformations lors du séchage et de la transformation du bois.

La longueur des trachéïdes est liée positivement à l'indice de qualité de station. Elle est également légèrement à modérément influencée par la génétique de l'arbre et peut donc être augmentée par l'amélioration génétique (Beaulieu, 2006). Toutefois, la longueur des trachéïdes et des fibres varie en fonction de la position dans l'arbre. Elles sont plus courtes près de la moelle et plus longues près de l'écorce. Elles sont les plus longues à la base de la cime vivante et plus courtes aux niveaux inférieur et supérieur de l'arbre (Cloutier, 2007). Il n'y aurait cependant pas de lien entre la densité du bois et la longueur des trachéïdes (Beaulieu, 2004)

La densité du bois est souvent liée négativement à la croissance radiale, mais ce n'est pas le cas pour tous les arbres.

Concernant l'espacement en plantation, il est généralement considéré que 1) de larges différences sont nécessaires pour affecter les propriétés du bois, 2) des plantations très espacées produisent des arbres avec plus de bois juvénile et à fort défilement, 3) un espacement faible implique une masse volumique plus élevée, donc un rendement en pâte plus élevé et 4) il y a davantage d'eau disponible pour un espacement large, ce qui produit une masse volumique plus élevée en raison de la disponibilité d'eau lors de la formation du bois final (Cloutier, 2007).

Un espacement initial faible ralentit la croissance juvénile, ce qui permet de contrôler la période de production de bois juvénile et fournit un bois ayant une densité relative plus élevée (Cloutier, 2007). Par contre, un espacement initial plus grand produira davantage de volume.

Si on tient compte de la qualité des bois produits, le meilleur scénario serait celui favorisant une forte densité en bas âge, suivi d'une EPC modérée, de façon à augmenter la taille des tiges sans influencer négativement la qualité des produits (Zhang *et al.*).

2.2. NOUVEAUX PRODUITS FORESTIERS

Les possibilités de production d'énergie et de produits chimiques à partir de la fibre de bois, ainsi que les capacités des forêts à séquestrer le carbone sont les avenues qu'emprunteront l'évolution prochaine de l'industrie canadienne des produits forestiers (APFC, 2010).

Pour être profitables, ces diverses productions devraient être intégrées aux activités traditionnelles. L'industrie du sciage demeurera la pierre angulaire de la compétitivité de l'industrie forestière et les industries émergentes devraient s'y greffer pour que la performance économique de l'ensemble soit optimale (APFC, 2010) (figure 3).

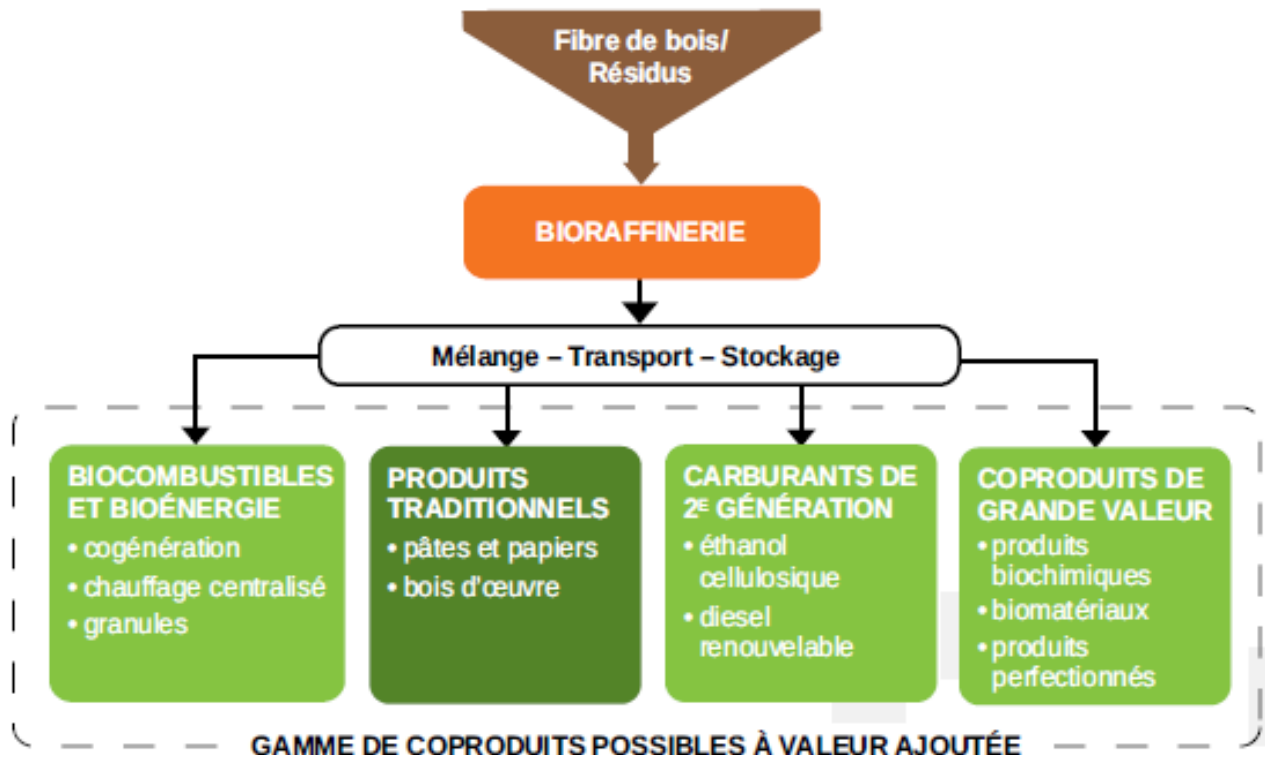


Figure 3. Gamme de produits et coproduits possibles à valeur ajoutée⁴

Les nouvelles technologies viseront des marchés de niche beaucoup plus restreints mais avec des prix beaucoup plus élevés.

2.2.1. Bioénergie et biocombustibles

La biocombustion consiste à brûler de la biomasse solide pour produire de l'énergie (appelée bioénergie). L'énergie peut être produite sous forme de chaleur par combustion directe, ou selon un procédé produisant chaleur ou vapeur et électricité à partir de la même source de combustible (Lachance, 2008). Ce procédé, aussi appelé cogénération, permet de récupérer la chaleur ou la vapeur qui serait autrement perdue, et de l'utiliser à des fins industrielles pour le chauffage ou le

⁴ Tiré de APFC, 2011

refroidissement (APFC, 2011). La combustion de 4 t de résidus de bois permettrait d'économiser 1 t de pétrole et d'éviter l'émission de 2,5 t de CO₂ (Lachance, 2008).

Il est également possible de produire des biocombustibles secs, liquides ou gazeux (Lachance, 2008). Les biocombustibles secs sont obtenus par des procédés de densification de la matière ligneuse pouvant être issue des résidus de la transformation du bois. Ils correspondent aux granules ou aux bûches énergétiques. Les produits liquides, aussi appelés biocarburants, peuvent être utilisés comme substituts à l'essence (bioéthanol, biométhanol, biobutanol) ou au diesel (biodiesel, biohuiles purifiées). Le bioéthanol peut être fabriqué à partir de sucre, d'amidon ou de cellulose. Cette dernière peut être obtenue à partir des résidus forestiers et agricoles, des cultures ligneuses à croissance rapide, ainsi que des cultures énergétiques herbacées. La production d'éthanol cellulosique, grâce à un procédé appelé lignol, permet de séparer la lignine et de la valoriser dans la production de liant, dispersant ou antioxydant. L'éthanol cellulosique peut être produit tant à partir de résidus forestiers d'espèces feuillues que résineuses⁵. Son bilan énergétique est élevé (4 à 6 fois supérieur par rapport au bioéthanol produit à partir du maïs) et il permet une plus grande réduction des gaz à effet de serre (réduction de 85% contre 15 à 30% pour l'éthanol produit à partir du maïs à un coût plus élevé). De plus, l'éthanol cellulosique ne requiert pas l'utilisation intensive de bonnes terres agricoles. La production de biodiesel à partir de la cellulose est en développement. Le procédé (par transestérification de l'huile, suivie de la purification) permet la production complémentaire d'autres produits tels que la glycérine et le tourteau (déchets pouvant servir à l'alimentation animale ou à la production de granules). La biohuile est un condensat liquide noir utilisé comme huile à chauffage et produit à partir des résidus forestiers par liquéfaction directe ou par pyrolyse rapide. Il existe aussi les biogaz (méthane) et les gaz de synthèse. Ce dernier est produit par gazéification thermo-chimique convertissant des matériaux carbonés hétérogènes en CO et en hydrogène. Une fois purifié ce gaz a les mêmes propriétés que le gaz naturel.

Une étude récente de l'APFC (2011) montre qu'il serait aussi économiquement viable de produire davantage de chaleur et d'électricité, de même que des carburants (hydrocarbures synthétiques) dans des bioraffineries, où d'autres sous-produits de grande valeur pourraient aussi être fabriqués, comme par exemple, des biocombustibles liquides utilisés comme additifs aux combustibles fossiles ou encore des biocombustibles liquides de remplacement (biodiesel, biohuile).

⁵ Voir : <http://www.lignol.ca/>

2.2.2. Produits biochimiques

Les usines de pâte traditionnelles peuvent accroître leurs revenus grâce à l'extraction de la lignine et de l'hémicellulose. Cette dernière a déjà plusieurs applications en biochimie, notamment comme additif dans les carburants des moteurs à réaction.

À partir de la cellulose, il est possible de fabriquer de nouveaux produits, comme des gilets pare-balles, des papiers et tissus dotés de fonctionnalités spécifiques (ex : capture et désactivation de microbes ou pathogènes), des emballages « intelligents », ou encore des fibres modifiées entrant dans la fabrication de matériaux de construction à haute valeur (ex : fibres densifiées et isolantes).

La fibre de bois est de plus en plus utilisée dans l'industrie du textile. L'usine Fortress (à Thurso) produit une pâte à rayonne pour l'industrie du vêtement, à partir du bois d'espèces feuillues. Le procédé « lyocell⁶ » permet la production de fibres cellulosiques à partir d'un procédé moins polluant que celui employé pour la production de viscose, grâce à l'utilisation d'un solvant non polluant et réutilisable. Ce procédé est utilisé pour la fabrication de divers tissus (Tencel® : fabriqué à partir d'eucalyptus, Modal® : fabriqué à partir de hêtre, Lenzing FR®).

Il est également possible d'utiliser la fibre de bois dans les produits biochimiques plastiques.

2.2.3. La cellulose nanocristalline (CNC)

La cellulose nanocristalline (CNC) est une composante physique de la cellulose, obtenue par hydrolyse, à partir des régions cristallines des fibres de cellulose⁷. Elle est dotée de propriétés optiques, électriques, magnétiques et de résistance tout à fait unique. À l'heure actuelle, les applications prévues sont les suivantes : polymères renforcés; textiles et fibres filées très résistants; matériaux composites perfectionnés; films protecteurs et pour autres fonctions; additifs pour enduits, laques, vernis et adhésifs; appareils optiques à commutation; produits pharmaceutiques et administration de médicaments; remplacement des os et réparation des dents; produits de papier d'emballage et de construction améliorée; additifs pour aliments et cosmétiques; ainsi que des applications aérospatiales et pour le transport. À titre indicatif, une petite quantité de CNC permet de tripler la résistance au stress de la matière à laquelle elle est incorporée, ce qui en fait un produit particulièrement intéressant pour l'industrie aérospatiale et

⁶ Voir : <http://cerig.efpg.inpg.fr/memoire/2010/fibre-cellulose-textile.htm>

⁷ Voir : <http://www.fpinnovations.ca/pdfs/NCC%20brochure%20FR.pdf>

automobile⁸. Elle peut aussi modifier la surface de matériaux et ainsi changer leur perméabilité, leur résistance, leur flexibilité et leurs propriétés optiques. Ajoutée au papier, elle en améliore la résistance à la traction, la rigidité, la rugosité de surface et l'épaisseur. Il est possible d'en faire des pellicules dotées de reflets irisés pouvant être utilisées pour la décoration du papier. Les pellicules optiques composées en partie de CNC peuvent être utilisées dans les emballages spécialisés, les biocapteurs et les dispositifs de sécurité. Aussi, grâce à sa sensibilité aux champs magnétiques et électriques, elle pourrait avoir des applications intéressantes comme composante des papiers magnétiques, cartes mémoires, lecteurs de cartes mémoires et autres produits électroniques. Un projet pilote intégrant l'implantation de nouvelles installations pour la production de CNC à la production papetière réalisée à partir de copeaux de bois feuillus est en cours à Windsor, chez la papetière Domtar.

2.2.4. Biomatériaux

Le bois d'ingénierie, la construction en bois préfabriqué, les produits d'isolation et d'emballage à très faible densité et les systèmes pour la réparation et la rénovation sont autant de possibilités recensées pour la production de biomatériaux (APFC, 2011).

Des recherches actuellement en cours au Canada visent à mettre au point une pâte thermomécanique blanchie pour la production de nouveaux types de papiers fins (dans lesquels on pourrait ajouter davantage d'autres produits appelés agents de charge), plutôt que d'utiliser la pâte chimique plus coûteuse⁹.

2.2.4.1. Bois classé mécaniquement (MSR)

Les bois d'œuvre classés par contraintes mécaniques (MSR : Machine Stress Rated) passent par un dispositif permettant d'évaluer la résistance mécanique en appliquant une contrainte en flexion (Rycabel, 2007). Ils font ensuite l'objet d'un classement visuel pour les autres défauts. Les bois rencontrant les standards requis pour ce classement ont une qualité supérieure qui leur confère une valeur ajoutée. Ces bois sont caractérisés par leur forte densité. La machine évalue la résistance à la flexion admissible (f) et le module d'élasticité moyen (E). Plus ce dernier est élevé, meilleure est la résistance de la pièce.

⁸ Voir : <http://foretscanada.mcan.gc.ca/article/cellulosenanocristalline>

⁹ Voir : <http://foretscanada.mcan.gc.ca/article/papiersprochainegeneration>

Le bois MSR est particulièrement bien adapté aux usages de bois d'ingénierie comme les fermes de toit, les poutrelles de plancher et le bois lamellé-collé à cause de son efficacité structurale¹⁰.

L'estampille de classification indique la contrainte admissible en flexion (F_b en lb/po²) et le module d'élasticité moyen (E en millions de lb/po²) qui lui ont été assignés. Les classifications les plus courantes du bois MSR sont 1 650 F_b -1.5E, 2 100 F_b -1.8E et 2400 F_b -2.0E. Dans le cas du bois MSR 1 650 F_b -1.5E, les efforts admissibles correspondraient à 1 650 lb/po² en flexion (11,4 MPa) et à 1 500 000 lb/po² pour le module d'élasticité moyen (10 300 MPa).

Des outils de mesure des propriétés des bois sur pied sont en cours de développement.

L'épinette noire est la meilleure espèce au Canada répondant aux critères de classement MSR. Une proportion de 80% des produits obtenus à partir de cette espèce répondent aux critères MSR de 1650f-1.5E ou plus, pour les arbres provenant de forêts naturelles, alors que cette proportion est de l'ordre de 25-30 % avec du bois de plantation âgé de 48 ans (sans éclaircies) dont le diamètre moyen est équivalent à celui des forêts naturelles âgées de plus de 100 ans (Zhang *et al.* 2002).

2.2.4.2. Bois d'œuvre lamellé croisé (BOLC)

Le bois lamellé croisé représente un substitut au béton, à la maçonnerie ou à l'acier, souhaitable sur le plan environnemental. Il convient pour les structures de cinq étages (Crespell, 2010) et est utilisé en Europe dans la construction d'immeubles pouvant atteindre 9 étages.

Le BOLC est un contre-plaqué géant formé de bois massif en couches croisées, ce qui permet la création d'un matériau de construction à résistance élevée¹¹. Il ne nécessite pas de bois de sciage de haute qualité et peut être fabriqué à partir des espèces et classes de bois moins coûteuses. Les applications envisagées pour ce produit sont, à court terme, les dalles de plancher pour les projets de construction résidentielles ou commerciales, et à moyen terme, les planchers et les murs, principalement pour les projets de constructions industrielles (Crespell, 2010). Le panneau en bois lamellé-croisé est reconnu pour ses performances thermiques et acoustiques, son excellent comportement en situation d'incendie, ses fortes résistances structurales et sa bonne stabilité dimensionnelle. De plus, il permet une construction modulaire moins coûteuse. De tels panneaux,

¹⁰ Voir : http://www.cecobois.com/index.php?option=com_content&view=article&id=97&Itemid=156

¹¹ Voir : http://nordicewp.com/literatures/N-X605_f_MSDS.pdf
http://www.nordicewp.com/literatures/N-U261_Nordic_X-Lam_January_2011.pdf
http://www.cecobois.com/index.php?option=com_content&view=article&id=373&Itemid=299

ainsi que des poutres sont actuellement fabriqués au Québec par Chantier Chibougamau Ltée à partir d'épinettes, de pin et de sapin. En Europe, des panneaux et des poutres en bois lamellé collé sont fabriqués à partir de diverses essences (ex : chêne, épicéa, pin, mélèze Européen et de Sibérie, érable, bouleau, hêtre étuvé, frêne...).

2.2.4.3. Bois transformé

Le bois transformé fait référence au bois dont on change les propriétés. Il existe différents traitements qui permettent de modifier les caractéristiques du bois, tels que : la densification par injection de polymères, la torréfaction, le traitement à l'huile végétale chaude, la densification par pression à la chaleur et la densification par compression à la chaleur en présence de vapeur (Cloutier, 2011).

La densification du bois par injection de polymères fournit un produit niche, relativement dispendieux à produire. La torréfaction du bois lui donne une couleur foncée, le rend plus imperméable, augmente sa résistance à la pourriture, accroît sa stabilité dimensionnelle, mais réduit légèrement sa résistance en flexion statique et au cisaillement¹². Le traitement à l'huile végétale chaude correspond à une torréfaction à l'huile qui augmente la durabilité, améliore la stabilité et produit une belle couleur foncée. Le bois densifié par pression à la chaleur possède de meilleures qualités mécaniques mais il n'est pas stable. L'ajout de vapeur lors du procédé améliore la stabilité en éliminant le retour viscoélastique. Ce dernier procédé augmente la densité et la dureté et fournit des produits appropriés à une utilisation intensive (ex : planchers, tables) (Cloutier, 2011).

L'industrie des produits forestiers est appelée à contribuer considérablement à l'écologisation de l'économie en devenant la source d'une multitude de produits allant des charpentes en bois au papier en passant par l'énergie, le caoutchouc, le plastique et même les médicaments.

Bien qu'il soit impossible de prédire les produits qui seront désirés dans 50-60 ans, on sait que nous voudrions disposer de bois en quantité et en qualité, puisque la qualité demeure importante pour certains produits.

¹² Voir : <http://www.torrefactionplus.ca/>

2.3. EXEMPLES DE PRODUITS EN FONCTION DES CARACTÉRISTIQUES DU BOIS

Le tableau 2 présente la synthèse des caractéristiques recherchées pour la fabrication de différents produits, incluant ceux issus des développements technologiques récents.

Il importe cependant de souligner que les propriétés du bois varient à l'intérieur même de l'arbre. La prise en compte de ces variations, notamment des différences entre le bois juvénile et le bois mature, peut permettre de réduire l'hétérogénéité et d'augmenter la valeur des produits. Par exemple, les différences de propriétés en fonction de la hauteur dans l'arbre indiquent qu'il serait possible d'obtenir des prix différents selon que la bille de 8 pi provienne du bas ou du haut de l'arbre.

Tableau 2. Produits et caractéristiques recherchées

| Espèces | Caractéristiques | Produits | Référence |
|--|--|---|---|
| Indéterminées | Masse volumique uniforme (entraîne un gonflement/retrait plus uniforme) | Sculpture Déroutage Tournage Meilleure adhésion des peintures et vernis | Cloutier, 2007 |
| Indéterminées | Dureté Stabilité dimensionnelle | Bois d'apparence | Beaulieu, 2006 |
| Indéterminées | Fibres longues Parois cellulaires minces | Papiers résistants | Beaulieu, 2006; Cloutier, 2007 |
| Peupliers, pins | Faible masse volumique | Panneaux de lamelles orientées | Cloutier, 2007 |
| Épinettes mûres | Bois rigide Bonne résistance mécanique associée aux nœuds de petite taille Fil droit | Bois de charpente | Cloutier, 2007 |
| Épinettes mûres à croissance lente | Densité élevée Paramètres minimaux pour classement MSR : efforts admissibles en flexion : 1 650 lb/po ² (11,4 MPa) et module d'élasticité moyen : 1 500 000 lb/po ² (10 300 MPa). | Bois d'ingénierie (ex : fermes de toit, poutrelles de plancher et bois lamellé-collé) | http://www.ceco-bois.com |
| Épinettes provenant d'éclaircie de plantation (EPB de 36 ans) | Bois largement juvénile | Contreplaqué de revêtement Une certaine proportion (<50%) en plaquage stratifié LVL en utilisant un classement mécanique (inapproprié pour le bois de charpente) | Beaulieu, 2006 |

| Espèces | Caractéristiques | Produits | Référence |
|--|---|---|--|
| Diverses (épinettes – sapin – pin gris, Europe : chêne, épicéa, pin, mélèze Européen et de Sibérie, érable, bouleau, hêtre étuvé, frêne...) | Diverses (pas nécessairement besoin de sciages de haute qualité : sciages de meilleure qualité pour les portions apparentes et de qualité moindre dans le centre) | Bois d'œuvre lamellé collé (panneaux, poutres) | Crespell, 2010 et sites publicitaires de diverses compagnies |
| Épinette blanche | Trachéïdes longues (>2mm) et fines | Papiers fins | Beaulieu, 2006 |
| | Trachéïdes longues et grosses | Papiers journaux | Beaulieu, 2006 |
| | Trachéïdes courtes et fines | Papiers mouchoirs | Beaulieu, 2006 |
| | Trachéïdes courtes et grosses | Papiers absorbants | Beaulieu, 2006 |
| Sapin | Isolant acoustique, gros diamètre | Déroutage (pour l'intérieur des panneaux) | Cloutier, 2011 |
| Pin blanc, pin rouge et épinettes | Gros diamètre, absence de noeuds | Déroutage | Hébert, 2007 |
| Pin blanc, pin rouge et épinettes | Gros diamètre | Constructions en bois rond | |
| Toutes | Peu importantes | Biocombustibles, biocarburants, biogaz | Lachance, 2008 |
| Feuillues (projet pilote à partir de pâte à papier feuillue) | | Cellulose nanocristalline | http://www.fpinnovations.ca/pdfs/NCC%20brochure%20FR.pdf http://foretsCanada.rncan.gc.ca/article/cellulosenanocristalline |
| Feuillues | | Textiles | http://cerig.efpg.inpg.fr/memoire/2010/fibre-cellulose-textile.htm |
| La plupart des essences (principalement BOJ, FR, CH, PEU, PET, ERR, PIG, PIB) | Traitement qui augmente l'imperméabilité, accroît la résistance à la pourriture, améliore la stabilité dimensionnelle | Bois torréfié : recouvrement intérieur ou extérieur, planchers, escaliers, moulures, meubles de patio | http://www.torrefactionplus.ca/ |

| Espèces | Caractéristiques | Produits | Référence |
|---|--|---|---|
| Essais réalisés avec feuillus (PET, ERS) | Procédé qui augmente la densité, la dureté (double les MOR et MOE), augmente la résistance en flexion mais diminue la résistance à la traction | Bois densifiés par compression à la chaleur en présence de vapeur : fournit des produits densifiés en surface appropriés à une utilisation intensive (ex : planchers, tables) | Cloutier, 2011 |
| Sorbier d'Amérique et Cerisier de Pennsylvanie | Coloration du bois | Petits sciages (7 po au fin bout) | http://www.ardente.ca/fr/produits/ |

2.3.1. Caractéristiques et utilisations potentielles du bois de mélèze

Le mélèze offre d'excellentes caractéristiques pour la production de bois d'œuvre, de bois d'apparence (plancher, panneaux muraux et meubles) et de bois d'ingénierie (sous-planchers, planchers, portes, meubles) (Lessard, 2008). Le bois d'aubier de mélèze représente une excellente matière première pour les pâtes Kraft. Il est caractérisé par de longues fibres et une densité plus élevée (par rapport aux autres essences du groupe SEPM), ce qui favorise un meilleur rendement en matière. Parmi les résineux, le mélèze offre les meilleures opportunités pour la fabrication de produits d'apparence, grâce à sa densité élevée et à son grain de bois coloré au dessin zébré. Il présente un bon potentiel comme bois MSR et un certain potentiel au niveau structural. Son utilisation est plus courante en Europe qu'au Québec en raison de la disponibilité d'épinettes, sapin et pins et des difficultés de transformation du mélèze associées au défilement prononcé des billes, à la présence élevée de nœuds, au taux élevé d'extractibles dans le bois de cœur (par rapport aux SEP) qui engendrent des difficultés et coûts plus élevés pour la fabrication de pâte et son blanchiment, ainsi qu'aux difficultés engendrées par la forte différence entre le bois initial et le bois final qui produit un contraste de couleur intéressant mais qui amène plusieurs difficultés dans le séchage, l'usinage et la finition.

2.4. QUALITÉ DES BOIS ET SYLVICULTURE

Les traitements sylvicoles agissent sur la croissance de l'arbre en modifiant son environnement et particulièrement le volume du houppier, qui est le site de synthèse de toutes les molécules organiques nécessaires à la croissance de l'arbre (Zobel et Van Buijtenen 1989 dans Alteyrac, 2005). Ainsi, tous les traitements qui modifient la taille du houppier ont une influence sur la croissance de l'arbre. Ces traitements correspondent généralement à l'éclaircie, l'élagage, ainsi que la fertilisation, dont les effets peuvent interagir sur la croissance de l'arbre et influencer les

propriétés du bois. Le contrôle de la cime vivante a un impact direct sur la fréquence des branches et des nœuds, la proportion de bois juvénile et le défilement de la tige (Cloutier, 2007).

De plus, la densité du peuplement a un effet sur les propriétés du bois : les peuplements de faible densité produisent du bois avec de gros nœuds et une plus grande proportion de bois juvénile, alors que les peuplements denses à croissance lente fournissent du bois dense aux propriétés mécaniques intéressantes. Par conséquent, la densité initiale constitue aussi un facteur influençant la qualité des bois. Sur le plan sylvicole, le mode de régénération permet d'agir sur la densité initiale.

Quelques résultats provenant de la littérature

Les résultats de Rycabel (2007) comparant des pessières riches à des pessières pauvres ont démontré que les arbres du secteur pauvre présentaient des propriétés mécaniques nettement supérieures par rapport aux bois du secteur riche. Par contre, le plus grand volume par tige dans le secteur riche permet l'obtention de sciages de plus grosse dimension. En se basant sur les valeurs de produits de 2004, le secteur riche, avec des densités variant entre 725 et 1200 tiges/ha, présentait une valeur marchande plus élevée (de l'ordre de 3 fois plus) que celui plus pauvre, qui affichait des densités variant entre 1275 et 1825 tiges/ha. Aussi, les densités moyennes enregistrées dans les différents secteurs, soit ≈ 960 tiges/ha, à l'âge de ≈ 90 ans dans le site riche et ≈ 1550 tiges/ha, à l'âge de ≈ 145 ans dans le site pauvre, fournissent des éléments de réflexion quant aux densités initiales envisageables. Il apparaît à cet égard qu'une densité de 2000-2500 tiges/ha au stade de gaulis ne permettra pas de produire des bois de qualité similaire à celle fournie par les peuplements naturels, puisque qu'une densité initiale aussi faible ne permet pas de reproduire des conditions de croissance analogues.

2.4.1. Éclaircie

L'éclaircie vise à accélérer la croissance des arbres et augmenter le volume moyen par tige, ce qui peut permettre d'abaisser l'âge d'exploitabilité pour la production de billes de sciage (voir Rycabel, 2007). Sur le plan de la qualité, les effets des éclaircies sont reliés à l'obtention d'un taux de croissance plus élevé chez les arbres résiduels. Cette accélération de la croissance produit une diminution importante de la longueur des trachéides et de la densité du bois, qui se traduit par de moins bonnes propriétés pour le sciage et un rendement moindre en pâte. Par contre, la perte de densité est compensée par un gain en volume des arbres résiduels. Selon l'intensité du traitement, l'éclaircie peut favoriser l'obtention de tiges ayant un plus fort défilement. L'effet sur le défilement est plus important chez les espèces feuillues. Un fort défilement est sans incidence

pour la production de pâte mais provoque le tranchage du fil du bois lors du sciage, ce qui diminue la résistance mécanique et réduit le rendement en bois de construction. Par contre, les pièces ayant un fil dévié sont appréciées dans l'industrie du meuble. L'éclaircie peut également nuire à l'élagage naturel et ainsi favoriser une forte nodosité du bois. De plus, les éclaircies trop sévères favorisent la formation de bois de compression chez les résineux. L'influence négative sur la résistance et la rigidité du bois dépend de l'intensité de l'intervention (Rycabel, 2007). L'application d'éclaircies légères permet de diminuer ces effets négatifs.

Une seule éclaircie forte dans la vie d'un peuplement produit des contraintes internes importantes entre le bois produit avant et après l'intervention. Ces contraintes peuvent être à l'origine de fentes, de fissures et de déformation des bois sciés lors du séchage. Aussi, les éclaircies sévères combinées à une faible densité initiale accentuent généralement le défilement des tiges (Rycabel, 2007).

Pour le sapin, l'éclaircie a un fort effet sur le défilement et réduit aussi les propriétés mécaniques des sciages produits (Rycabel, 2007). Le sapin produit des sciages de moindre qualité par rapport à l'épinette. Par contre, il posséderait des qualités d'isolant acoustique qui permettraient d'envisager son utilisation dans l'âme des panneaux (Cloutier, 2011).

La diminution de l'âge de révolution fait en sorte d'augmenter la proportion de bois juvénile, de limiter la dimension des billes et d'augmenter le défilement. En revanche, si l'on augmente l'âge de révolution, la proportion de bois de duramen est plus importante, les dimensions des pièces augmentent et le volume disponible pour le sciage est plus important. De plus, la qualité ainsi que la résistance des sciages augmentent avec l'âge d'exploitabilité. Aussi, l'obtention de plus gros bois réduit l'incidence des défauts (courbure, défilement, fissure). Règle générale, l'augmentation de la révolution permet d'atténuer l'effet de la grosseur des noeuds, grâce à la production de pièces de plus grosse dimension (Rycabel, 2007).

La production de bois de qualité a trop souvent été associée à tort à un taux accru d'accroissement en diamètre (Rycabel, 2007). **La production de bois de qualité nécessite une série d'éclaircies légères à modérées pratiquées durant la croissance d'un peuplement.**

2.4.1.1. Éclaircie commerciale

Le choix des traitements sylvicoles doit tenir compte de l'état initial du peuplement. L'effet de l'éclaircie peut varier selon la qualité de la station, l'espacement initial et l'âge du peuplement (Nicholls, 1971 dans Alteryac, 2005).

Règle générale, l'éclaircie commerciale 1) améliore la qualité générale du peuplement grâce à l'obtention de grosses billes de qualité lors de la coupe finale, 2) produit un bois ayant moins de bois juvénile lors de la coupe finale, 3) favorise une activité cambiale plus hâtive au printemps, mais retarde l'apparition du bois final, 4) a le plus d'effets sur les feuillus à zone poreuse, puis les feuillus à pores diffus et enfin, sur les résineux, 5) affecte peu la longueur et la densité des trachéides et 6) comporte des risques de formation de plus grosses branches et de branches adventives, lorsqu'elle est trop intense (Cloutier, 2007).

L'éclaircie commerciale améliore la croissance, mais elle a des impacts négatifs sur les attributs de la qualité du bois (masse volumique, MOE) (Ourais *et al.* 2008). La diminution de la masse volumique et du MOE est beaucoup plus importante sous l'effet combiné de la fertilisation et de l'éclaircie. Toutefois, les variations intra-arbres sont plus importantes que celles dues aux traitements d'éclaircie ou de fertilisation.

Les objectifs doivent être définis tôt dans la vie d'une plantation, car les possibilités de modification des objectifs diminuent à mesure que la plantation vieillit (Prégent, 2004).

La première éclaircie est la plus importante, même si elle génère de faibles revenus, puisqu'elle permet d'améliorer la qualité des futurs produits (en concentrant la croissance sur les bons sujets) et d'obtenir un meilleur volume par tige, ce qui diminue les frais d'exploitation (Villeneuve, 2009). Plus l'écart de prix entre les produits de qualité supérieure et les bois de faible qualité est élevé, plus il est rentable d'éclaircir.

Les diagrammes de gestion de la densité représentent des outils pratiques pour déterminer le volume produit par un peuplement en fonction de l'espacement entre les arbres. Les figures 4 à 7 présentent de tels diagrammes pour l'épinette noire et le pin gris, pour 2 catégories de qualité de station (Bolghari, 1990 non publié).

Les diagrammes de gestion de la densité traditionnels permettent de contrôler la densité et de planifier les éclaircies mais ne tiennent pas compte de la valeur marchande du volume produit, ni de la structure interne des peuplements (Alteryac, 2005). Afin de palier à ces lacunes, Newton

(2009) a développé un diagramme structural de contrôle de la densité qui incorpore un sous-modèle de reconstitution de la distribution de la fréquence du nombre de tiges par classe de diamètre. L'outil de prédiction élaboré pour le pin gris intègre la prise en compte de la valeur basée sur les proportions anticipées de sciages et de copeaux. Il comporte également des équations visant à estimer la densité du bois et le diamètre maximal des branches. Toutefois, ce système est toujours en cours d'élaboration et doit faire l'objet de validations.

Nomogramme pour choisir l'intensité de l'éclaircie dans les pessières à épinette noire et mousses hypnacées

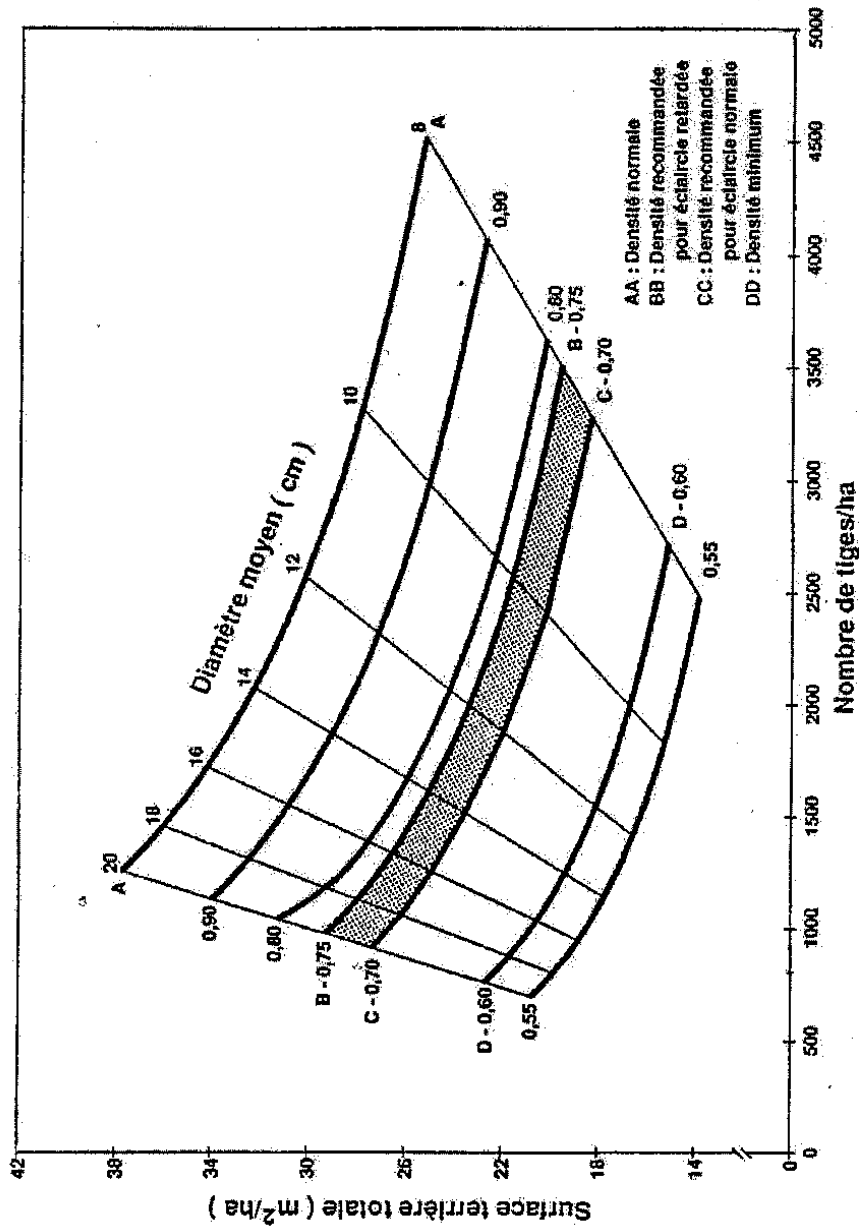


Figure 4. Diagramme de gestion de la densité pour les pessières noires à mousses et hypnacées¹³

Exemple : On devrait en principe éclaircir lorsque la densité se situe près de la ligne A. L'éclaircie à 25% permet de ramener la densité au niveau B, alors que l'éclaircie à 30% la ramène au niveau C. Par exemple, pour un peuplement d'une densité de 2500 tiges/ha, dont le diamètre moyen est d'environ 12 cm, on a une surface terrière d'une peu plus de 30m²/ha. On peut alors ramener la densité à 1875 ti/ha avec une éclaircie à 25%; ainsi, la surface terrière résiduelle se situera aux environs de 22 m²/ha. Ensuite, le couvert sera à nouveau refermé lorsque le diamètre moyen aura atteint environ 15 cm; il serait alors possible d'effectuer une seconde éclaircie. Si cette éclaircie prélève à nouveau 25% des tiges, la densité sera d'environ 1400 tiges qui pourrait croître jusqu'à l'obtention d'un diamètre d'environ 18 cm lorsque le couvert se refermera à nouveau; la surface terrière sera alors d'environ 36 m²/ha.

¹³ Bolghari, 1990 (non publié)

Nomogramme pour choisir l'intensité de l'éclaircie dans les pessières à épinette noire et sphaignes

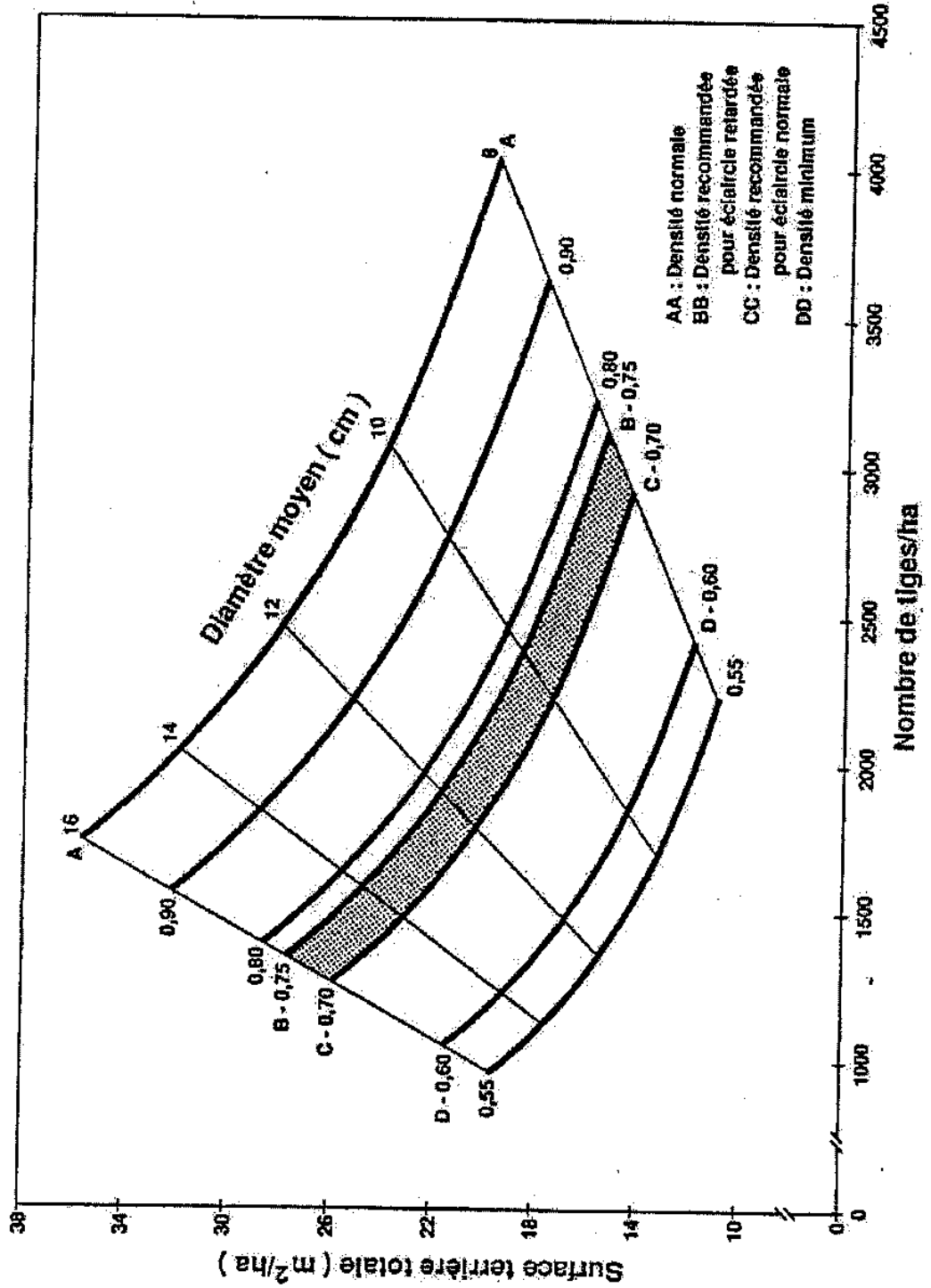


Figure 5. Diagramme de gestion de la densité pour les pessières noires à sphaignes¹⁴

¹⁴ Bolghari, 1990 (non publié)

Nomogramme pour choisir l'intensité de l'éclaircie dans les pineraies grises de classe de fertilité I

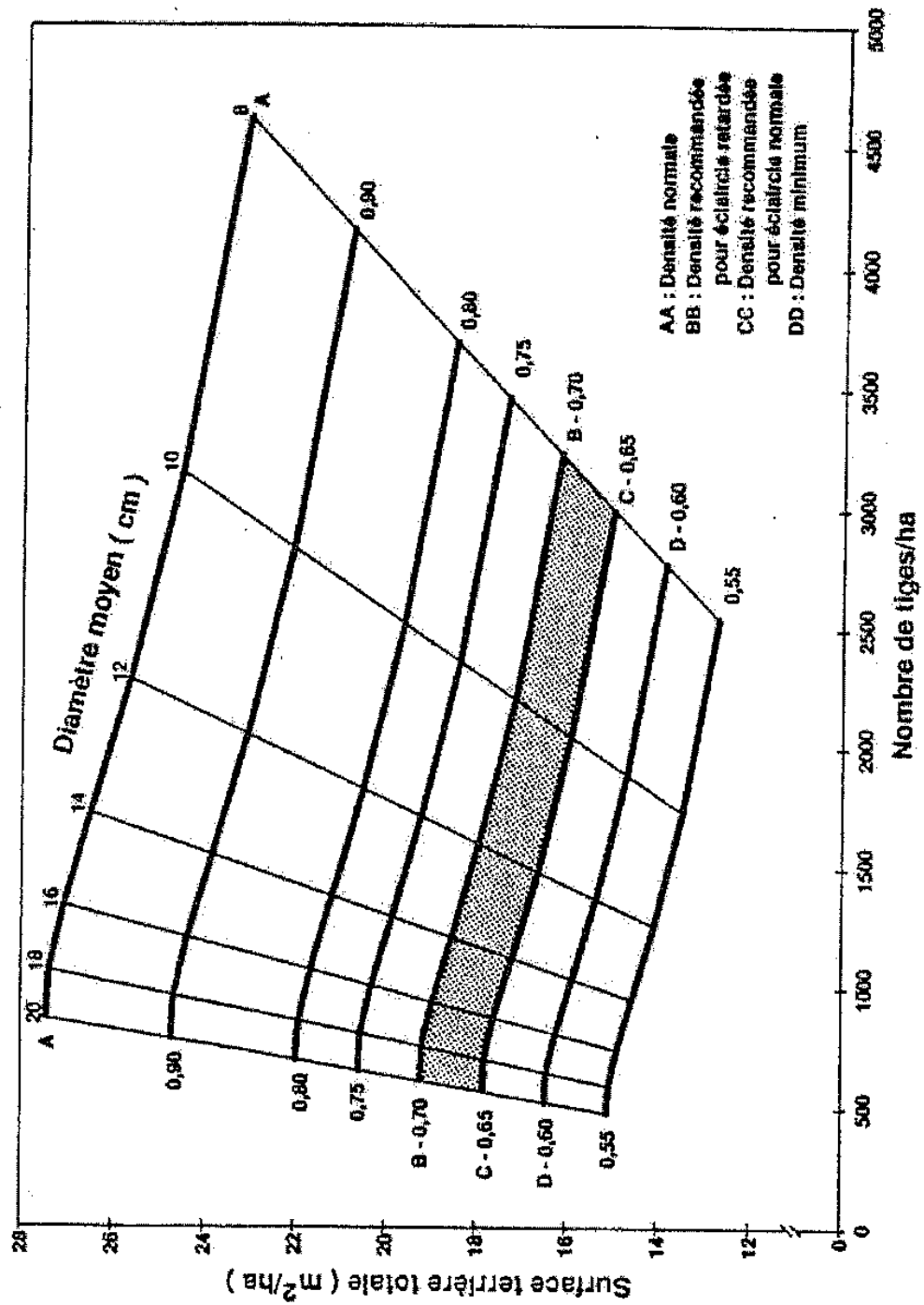


Figure 6. Diagramme de gestion de la densité pour les pinèdes grises de classe de fertilité I¹⁵

¹⁵ Bolghari, 1990 (non publié)

Nomogramme pour choisir l'intensité de l'éclaircie dans les pineraies grises de classe de fertilité II

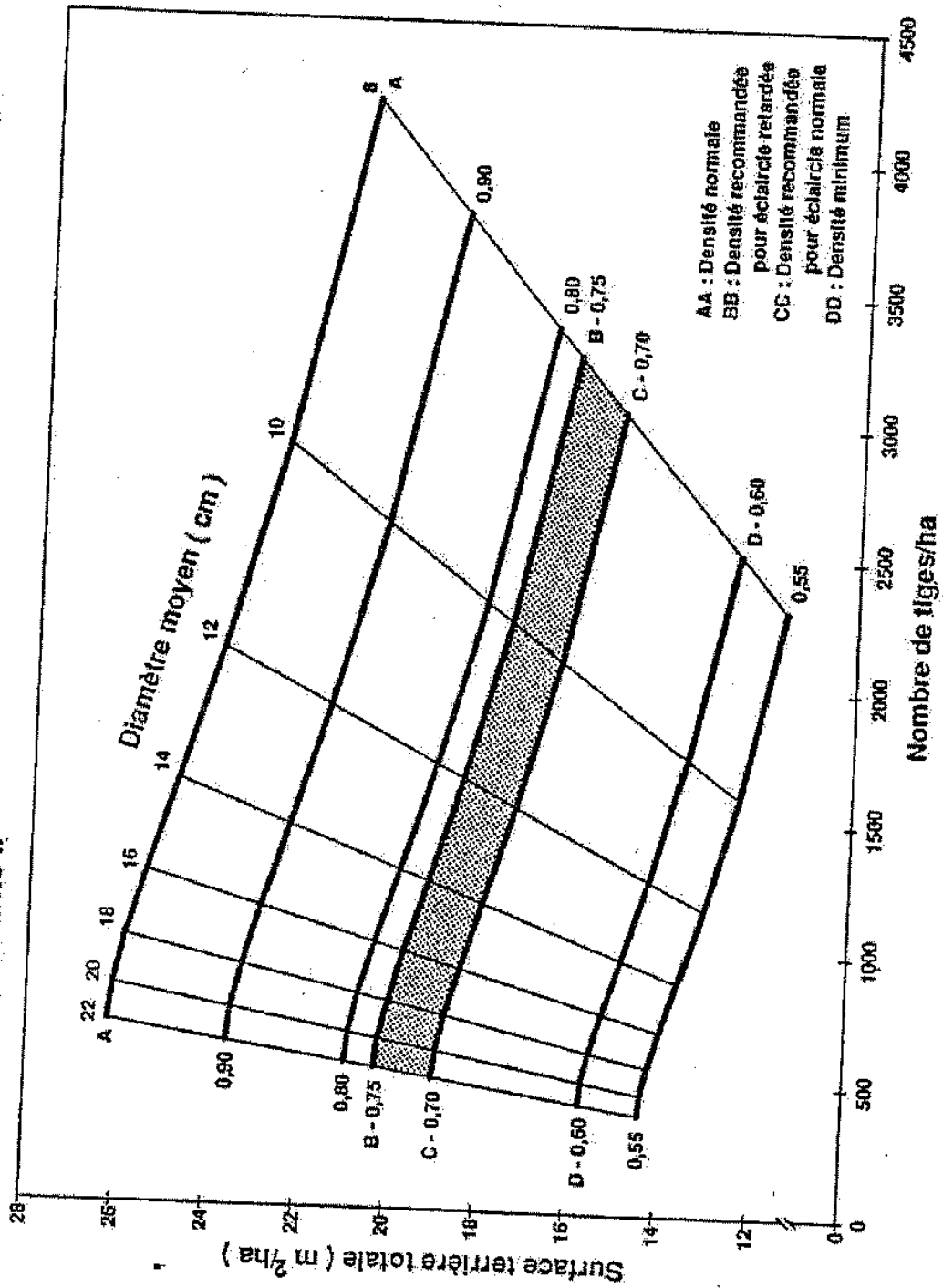


Figure 7. Diagramme de gestion de la densité pour les pinèdes grises de classe de fertilité II¹⁶

¹⁶ Bolghari, 1990 (non publié)

L'obtention de plus grosses tiges influence le rendement en sciages de dimensions diverses (voir figure 8).

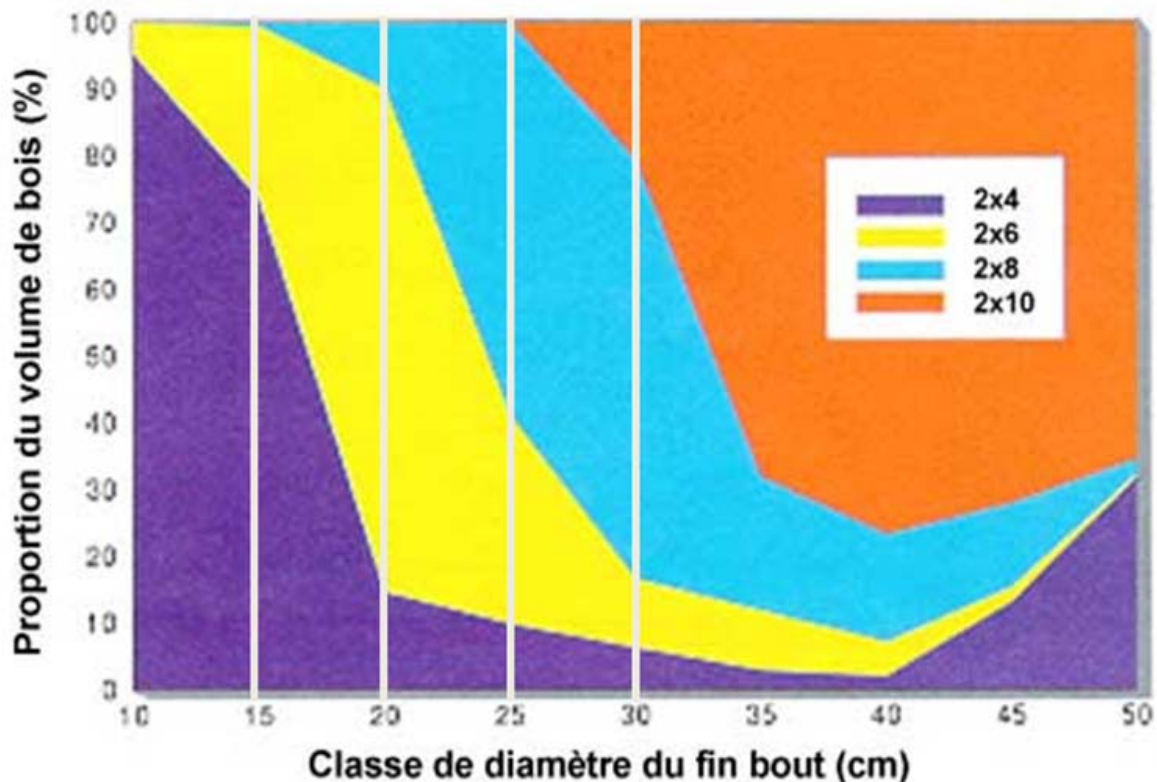


Figure 8. Rendement en sciages de dimensions diverses selon les classes de diamètre au fin bout¹⁷

Le moment opportun pour réaliser l'éclaircie devrait être déterminé en fonction du degré de compétition (et non pas de l'âge, puisque le degré de compétition dépend de l'espèce et il est aussi influencé par la qualité de la station, l'espacement initial et le taux de survie). En principe, la fenêtre pour effectuer une éclaircie efficace se situe lorsque la proportion de cime vivante représente entre la moitié et le cinquième de la hauteur de l'arbre, mais la réaction à l'intervention sera limitée si la cime vivante représente moins du tiers de la hauteur (Prégent). Prégent (2004) recommande l'utilisation de seuils de surface terrière variant entre 25 et 35 m²/ha, en privilégiant le seuil minimal pour les essences de lumière, les jeunes plantations et la production de gros bois. Le seuil plus élevé devrait être graduellement privilégié à mesure que la plantation vieillira ou si l'objectif vise plutôt la production de tiges de dimension moyenne.

¹⁷ Adapté de Jozsa et Middelton, 1997, dans Cloutier, 2007

Quelques résultats provenant de la littérature

Un essai réalisé dans une plantation d'épinette blanche âgée de 20 ans et comportant de 2900 ti/ha au Nouveau-Brunswick a permis de comparer les effets de deux intensités d'éclaircie (20% et 35%) sur les propriétés du bois (Lavoie *et al.* 2006). Ces éclaircies n'ont pas eu d'effets significatifs sur l'accroissement annuel périodique, mais elles ont permis d'augmenter le diamètre quadratique moyen de façon proportionnelle à l'intensité de l'éclaircie. L'accroissement du volume par tige était plus élevé dans l'éclaircie légère et forte, particulièrement pour les dominants et codominants. Les intensités d'éclaircie n'ont pas eu d'effets significatifs sur le retrait longitudinal, le MOE et le MOR. Ces résultats sont expliqués par le fait que les arbres produisaient déjà du bois mature au moment de l'éclaircie. Toutefois, les variations observées ont permis de conclure que l'éclaircie légère semblait être la meilleure option, puisqu'elle offrait de bonnes conditions de croissance et ne produisait qu'une faible diminution des propriétés mécaniques par rapport au témoin.

2.4.1.2. Éclaircie précommerciale

L'éclaircie précommerciale dans les peuplements de pins gris provoque une largeur de cime vivante, un diamètre des branches, un défilement et un accroissement en volume qui augmentent avec l'intensité de l'éclaircie (Zhang *et al.* 2006). Le diamètre des arbres, leur hauteur et le volume marchand augmentent aussi avec l'intensité de l'éclaircie, particulièrement lorsqu'elle est de forte intensité. La rigidité et la résistance à la flexion diminuent avec une augmentation de l'intensité de l'éclaircie et ces caractéristiques diminuent aussi avec la hauteur dans l'arbre. La mortalité diminue avec l'intensité de l'EPC, alors que le défilement et le volume par arbre augmentent. Au niveau du peuplement, il n'y aurait pas nécessairement d'effets sur la production de sciages de qualité sélecte.

Quelques résultats provenant de la littérature

Des essais d'EPC réalisés dans des jeunes pessières âgées de 22-23 ans, comportant 3 intensités d'éclaircie de 0, 20 et 35% de la surface terrière des épinettes noires, et ayant respectivement produit des peuplements d'une densité de 5674, 3689 et 3400 ti/ha immédiatement après l'intervention, ont été évalués à l'âge de 44 ans (Tong *et al.* 2008). Cette étude a montré que la densité, les propriétés en flexion des sciages et la production de bois MSR étaient inférieures dans l'éclaircie à 35% (par rapport à l'EPC à 20% et le témoin) et que le retrait de 20% de la surface terrière avait beaucoup moins d'effets sur ces propriétés. Les proportions obtenues par classe MSR pour les différentes intensités d'éclaircies sont rapportées au tableau 3. On constate que seul le témoin a produit des bois se classant dans la catégorie ayant les valeurs les plus élevées et que l'éclaircie à 20% a permis d'obtenir le meilleur rendement en bois MSR.

Soulignons que la dernière classe de ce tableau ne correspond pas aux classifications les plus courantes pour lesquelles les valeurs minimales requises commencent à 1650f-1.5E (<http://www.cecobois.com>). L'éclaircie à 35% a produit des bois dont le MOE et le MOR étaient significativement plus bas par rapport à ceux provenant du témoin et de l'éclaircie à 20%, pour des pièces de densité équivalente.

Comparativement aux pessières noires actuellement exploitées au Canada (âgées de plus de 100 ans), le MOE dans le peuplement âgé de 44 ans était 10.9, 12.1 et 19.5% plus bas dans le témoin et les essais d'EPC à 20 et 35%, respectivement. Par contre, les fortes densités initiales ont conduit à l'obtention de MOE 19.6, 18.0 et 10.8% plus élevés, dans les témoins, EPC à 20% et EPC à 35%, que dans des plantations d'épinette noire d'âge semblable, mais dont la densité initiale était plus faible (2066 – 3086 ti/ha).

Tableau 3. Proportions de sciages par classe MSR en fonction de l'intensité de l'EPC¹⁸

| MSR grade | Thinning intensity | | | Combined (%) | Average MOE (GPa) |
|------------|--------------------|------|------|--------------|-------------------|
| | T0 | T20 | T35 | | |
| 2400f-2.0E | 2.9 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 14.1 |
| 2100f-1.8E | 21.9 | 9.8 | 1.0 | 11.1 | 12.7 |
| 1650f-1.5E | 61.0 | 82.9 | 41.0 | 60.3 | 10.8 |
| 1450f-1.3E | 11.4 | 0.0 | 39.0 | 17.8 | 9.3 |

Les études réalisées dans les pessières noires mûres naturelles montrent que ces peuplements ont une densité de tiges se situant aux environs de 1000 à 2000 tiges/ha. Plusieurs sylviculteurs considèrent que cet objectif ne peut être atteint par la réalisation d'une éclaircie forte réalisée au stade de gaulis et qu'une telle intervention dégrade la forêt pour des décennies et prive l'industrie d'une matière première de haute qualité (voir Rycabel, 2007).

Un dépressage (effectué à 12 ans, au Michigan) dans les plantations de pin gris ayant fait passer la densité de 4035 à 2190 ti/ha, a permis d'obtenir un DHP plus élevé avec des propriétés mécaniques équivalentes (Zhang *et al.*). Les propriétés mécaniques du bois d'œuvre ne diffèrent pas entre les PIG provenant de la plantation éclaircie (de 4035 à 2190 ti/ha), par rapport à ceux provenant de la plantation d'une densité de 4035 ti/ha non éclaircie et d'un peuplement naturel âgé de 50 ans. Dans les plantations denses (4035 ti/ha), la carie est responsable d'un plus fort taux de déclassement des sciages, alors que dans les densités plus faibles (1325 ti/ha), il y a de plus gros noeuds. L'EPC modérée ou forte dans des peuplements de PIG comportant initialement 10 000 ti/ha ramenant la densité à au moins 4035 ti/ha permet l'obtention de tiges de plus fort

¹⁸ Tiré de Tong *et al.* 2008

diamètre, ce qui leur confère une plus grande valeur. De plus, les coûts de récolte sont moins élevés dans les peuplements ayant fait l'objet d'une EPC. Par contre, en promouvant le développement de la cime, l'EPC favorise également la formation de nœuds et l'obtention de tiges de plus fort défilement. La qualité des bois tendrait donc à diminuer avec l'intensité du traitement. Toutefois, pour l'épinette noire, les effets négatifs seraient minimisés, avec une densité demeurant au-dessus de 2000 ti/ha (Zhang *et al.*).

Des essais d'EPC selon 3 niveaux de densité (1500, 2500 et 3500 ti/ha) réalisés dans des peupleraies âgées de 13 ans ont été remesurés à 27 ans. On a alors constaté que le peuplement résultant comportait moins de peupliers que le témoin, malgré une augmentation générale de la densité de peupliers et qu'il y avait eu recrudescence des feuillus non commerciaux (Blouin *et al.* 2007). Les tiges éclaircies présentaient tout de même un plus fort diamètre, puisqu'elles ont eu un accroissement de 1,33 à 1,75 fois supérieur par rapport au témoin. Toutefois, le gain en diamètre dans les aires traitées ne compensera jamais la perte de tiges par rapport au témoin. Un dégagement à l'européenne (retrait des tiges nuisant à la partie supérieure des peupliers) serait préférable. En plus de limiter la recrudescence de la végétation concurrente, la forte densité présente sous les arbres dominants limite le développement des branches, donc des nœuds. Le scénario sylvicole proposé prévoit une première intervention légère en bas âge (4 à 7 ans) pour réduire la compétition et régler la composition, puis une seconde vers 15 ans pour contrôler la qualité et l'espacement des tiges.

On retient que la production de bois de qualité nécessite un **contrôle graduel** de la densité et que des changements radicaux de densité peuvent avoir des effets délétères importants sur la qualité des bois produits.

2.4.2. Fertilisation

La fertilisation est un traitement coûteux, peu employé pour les conifères (Cloutier, 2007). C'est l'apport d'azote qui occasionne le plus de changements aux propriétés du bois, par rapport aux autres nutriments qui ont moins d'effets (Cloutier, 2007). La fertilisation à l'azote produit généralement une réduction sévère à modérée de la masse volumique pour une période d'environ 5 à 10 ans. De plus, elle produit généralement des trachéïdes plus courtes et augmente la proportion de bois initial. Par contre, les trachéïdes du bois initial ont des parois plus épaisses, alors que celles du bois final ont des parois plus minces, ce qui augmente l'homogénéité du bois dans le cerne annuel. Une application massive d'engrais azoté engendre la formation de quelques cernes annuels de bois juvénile qui causent des problèmes lors du séchage et de l'usinage. C'est

pourquoi il est préférable de faire des applications légères et fréquentes. Ceci étant dit, on considère que la valeur ajoutée issue du gain en volume est annulée par les effets négatifs sur les propriétés du bois (Cloutier, 2007). La fertilisation azotée aurait peu d'effets sur les propriétés des bois feuillus, pour qui les effets sur la masse volumique, la longueur et l'épaisseur des parois cellulaires ne sont pas aussi clairs que chez les conifères. Pour les feuillus, le gain de croissance compenserait largement pour les pertes potentielles en qualité.

Étant donné les effets négatifs associés à la fertilisation azotée, cette intervention n'est pas retenue pour les scénarios préconisés. Les traitements de fertilisation devraient être limités aux stations présentant certaines carences en éléments nutritifs et viser la réduction de ces carences.

2.4.3. Élagage

L'élagage est un traitement à promouvoir pour favoriser l'obtention de billes de sciage claires et sans nœuds de qualité supérieure. Il permet de déplacer la cime vers le haut, ce qui stoppe la production de bois juvénile en bas de la cime, il accélère donc l'obtention de bois mature. En réduisant le défilement de la tige, cette opération produit moins de volume mais fournit un bois de meilleure qualité, équivalent à celui d'une forêt de première venue (Cloutier, 2007). De plus, elle permet d'obtenir un meilleur rendement en sciages lors du débitage (proportion plus élevée du volume utile/volume total) (Cyr, 2006).

L'élagage doit être effectué de manière progressive (Cloutier, 2007) en ne retirant pas plus de 30% de cime vivante à chaque intervention (Cyr, 2006). Il doit être réalisé pendant la période de dormance et lorsque l'arbre est encore jeune (écorce mince) afin de favoriser la cicatrisation et l'obtention d'un fil moins dévié (Cloutier, 2007).

Compte tenu de la dimension des branches, l'élagage devrait être pratiqué de manière prioritaire sur le pin gris, puis sur l'épinette blanche, et enfin sur l'épinette noire dont les branches sont plus fines.

Conditions d'application

L'élagage devrait être réalisé sur les stations de bonne qualité, où les bonnes conditions de croissance favorisent une fermeture plus rapide des plaies, une production accrue de bois sans nœuds et un meilleur retour sur l'investissement (Binot, 2006).

Seules les tiges élite qui constitueront le peuplement final devraient être élaguées. Théoriquement, plus on intervient jeune, plus on produit du bois sans nœuds, mais lorsque les arbres sont encore trop jeunes, l'identification des tiges d'avenir n'est pas encore possible. C'est pourquoi l'intervention est généralement réalisée lorsque le peuplement est au stade de perchis (diamètre moyen autour de 10 cm), alors que la différenciation sociale des tiges est assez avancée pour permettre l'identification des tiges d'avenir (Binot, 2006). L'association de l'élagage au traitement d'éclaircie est avantageuse puisque la promotion de la croissance résultant de l'éclaircie se fera au profit de la production de bois sans nœuds et que la croissance accrue favorisera une fermeture rapide des blessures d'élagage. La réalisation de plusieurs élagages légers, plutôt que d'un seul plus sévère, permet de limiter les effets négatifs sur la croissance (Binot, 2006). Ces effets négatifs deviennent perceptibles lorsque l'élagage retire plus que 30% de la cime vivante pour l'épinette noire et 25% pour le sapin (Cyr, 2006). En revanche, un élagage plus modéré (intensité \approx 20%) se traduirait par de légers gains de croissance en diamètre et en volume (Cyr, 2006). À l'opposé, un élagage de forte intensité (\geq 50%) a, de plus, un effet négatif sur la croissance en hauteur de l'arbre, qui peut avoir une incidence sur le maintien de sa position hiérarchique.

Pour le peuplier hybride en conditions nordiques, l'élagage est recommandé en juin. Le premier élagage (portant sur un maximum de 500 ti/ha) devrait être envisagé lorsque les tiges ont atteint un diamètre de 8 à 10 cm (soit vers l'âge de 4 à 6 ans). L'obtention d'une bille claire de nœuds sur une longueur de 6 ou 8 m requiert respectivement 3 ou 4 élagages successifs, réalisés tous les 2 ou 3 ans (Gagnon, 2006). L'élagage ne doit pas entraîner une diminution de la masse foliaire supérieure à 30-35%. Par conséquent, pour le peuplier, le premier élagage ne devrait pas dépasser 25% de la hauteur totale des arbres. À titre indicatif, on envisage une hauteur élaguée de 1,5-1,75 m au premier passage, 3,5-4 m au second, jusqu'à 6 m au troisième, puis jusqu'à 8 m si un quatrième élagage est effectué (Gagnon, 2006). Il est préférable de ne pas élaguer lors d'une éclaircie puisque l'ouverture du couvert peut favoriser le développement de gourmands et de broussins (loupes, excroissances) sur le tronc des arbres élagués.

La hauteur de l'élagage à préconiser dépend des produits désirés. L'obtention d'une seconde bille sans nœuds dans l'arbre est possible au moyen de plusieurs élagages, mais les coûts augmentent de manière importante avec la hauteur d'élagage.

2.4.4. Méthodes de régénération pour l'épinette noire

Tel que mentionné, les caractéristiques mécaniques des bois des forêts naturelles sont supérieures à celles des bois de plantation, où la densité initiale est plus faible et la croissance plus rapide. Par conséquent, l'application de méthodes de régénération permettant l'obtention d'une densité initiale plus élevée pourrait être considérée comme une piste de solution pour favoriser la production de bois ayant de meilleures caractéristiques mécaniques.

2.4.4.1. Problématique de la régénération naturelle de l'épinette noire à la suite de CPRS

Dans la pessière, la régénération de l'épinette noire à la suite de CPRS diffère de celle ayant donné naissance aux peuplements naturels actuels qui se sont généralement établis après feu. Dans la pessière noire aménagée, les coupes seraient à l'origine d'une diminution de la proportion de peuplements de densité forte à moyenne au profit des peuplements de faible densité et des superficies en régénération (Bouchard *et al.* 2010). Cette faible densité favorise le foisonnement des espèces héliophiles qui différeront selon la station : le peuplier faux-tremble sera souvent favorisé sur les stations plus riches, alors que les stations plus pauvres seront fréquemment envahies par les éricacées. De plus, sur les stations où les espèces arborescentes héliophiles ne peuvent s'installer, l'avènement de perturbations en rafale est responsable de l'expansion des milieux ouverts à lichens (Girard *et al.* 2008). Dans les stations envahies par les éricacées, on a constaté que la croissance des épinettes était ralentie (Thiffault *et al.* 2010). Par contre, de récents essais ont permis de démontrer qu'il était possible de retrouver la fertilité dans la couche organique du sol grâce à la restauration de la dominance des conifères (Moroni *et al.* 2009).

Les bois d'épinette noire provenant des forêts naturelles sont aujourd'hui recherchés pour leurs propriétés mécaniques qui permettent leur utilisation comme bois d'ingénierie. Ces propriétés sont le résultat d'une croissance lente associée à une densité initiale élevée contrôlée par les processus naturels d'autoéclaircie. Les méthodes de régénération auraient donc avantage à être révisées en s'inspirant davantage de la nature.

2.4.4.2. Les coupes progressives comme méthodes de régénération des forêts naturelles

Dans ce contexte, les coupes progressives apparaissent comme une piste de solution pour assurer la régénération des pessières, puisqu'elles permettent d'associer la présence de semenciers à une préparation de terrain favorable à l'établissement et à la croissance subséquente de la régénération. Toutefois, plusieurs essais devraient être réalisés dans diverses stations présentant

différentes problématiques, afin d'améliorer les densités initiales de manière à limiter l'espace disponible pour contrer efficacement l'envahissement par les héliophiles, d'une part, et favoriser l'obtention de bois dense doté de propriétés mécaniques supérieures, d'autre part.

En attendant les résultats de ces essais, il est tout de même nécessaire de définir un seuil de densité de régénération naturelle à partir duquel la réalisation de la coupe finale (qui correspond à une CPRS) permettrait l'obtention d'une régénération assez abondante. Dans les peuplements résineux, les CPRS provoquent une réduction de la densité de l'ordre de 60%, compensée partiellement par une augmentation ultérieure d'environ 40-50% (Tremblay, 2005). Ainsi, avec une densité avant coupe de 5000 ti/ha bien distribuées, on peut anticiper une réduction temporaire à environ 2000 ti/ha immédiatement après la CPRS, puis une densité de l'ordre de 2800-3000 ti/ha 5 ans après la CPRS, ce qui s'avère peu par rapport aux densités naturelles. Il est toutefois possible d'améliorer cette performance en réduisant les pertes attribuables à la coupe, ce qui peut être fait en effectuant la coupe finale pendant l'hiver, ou encore en utilisant une méthode de récolte par sentiers espacés (sentiers que l'on peut aussi regarnir par la suite). Par conséquent, un seuil de 5000 ti/ha bien distribuées avant coupe est proposé comme niveau minimal pour présumer de l'obtention d'une régénération résineuse suffisante par la suite, en supposant que les mesures nécessaires seront prises pour effectivement protéger le plus possible la régénération établie. À titre indicatif, les feux peuvent produire des cohortes de régénération d'épinette noire de densité variable pouvant atteindre quelques milliers à plusieurs centaines de milliers de semis par hectare (Fillion, 1994).

Il existe plusieurs types de coupes progressives, notamment :

- La coupe progressive régulière ou coupe progressive à régénération rapide : Traitement du régime de la futaie régulière visant à favoriser l'établissement d'une cohorte de régénération (naturelle ou artificielle), sous le couvert protecteur d'arbres matures à l'aide d'une ou plusieurs coupes partielles (Smith *et al.*, 1997; Matthews, 1989). Ce couvert est ensuite retiré par une coupe finale dans un délai relativement court après la coupe partielle afin de libérer cette nouvelle cohorte; le délai correspond généralement à moins du cinquième de la révolution de l'essence principale (Nyland, 2002).
- La coupe progressive à régénération lente : Traitement visant à favoriser l'établissement d'une régénération de haute qualité, sous le couvert protecteur d'arbres matures. Cette régénération est installée sur la totalité de la superficie traitée à l'aide de coupes partielles (Smith *et al.*, 1997; Matthews, 1989). L'établissement de la régénération est prévu sur une longue période correspondant, à titre indicatif, à une durée supérieure au cinquième de la révolution de l'essence principale (Smith, 1986; Nyland, 2002). Toutefois, les

interventions ne sont pas nécessairement continues, ni réparties uniformément dans le temps; elles sont plutôt ajustées en fonction du stade de développement des diverses cohortes d'arbres présentes.

- La coupe progressive irrégulière par trouées agrandies : Traitement du régime de la futaie irrégulière dans lequel les coupes sont réalisées par trouées qui sont agrandies à chacune des interventions, de manière à former un couvert forestier constitué de cohortes juxtaposées (Raymond *et al.* 2010)
- La coupe progressive irrégulière à couvert permanent : Traitement du régime de la futaie irrégulière dans lequel les coupes sont réalisées de manière à maintenir un couvert continu et une structure comportant plusieurs cohortes d'âges différents (Raymond *et al.* 2010).

La coupe progressive irrégulière à couvert permanent s'applique à certaines forêts âgées ayant atteint un stade où elles se régénèrent grâce à une dynamique par petites trouées créées par la mortalité par pied d'arbre, formant ainsi des peuplements de structure irrégulière. Ces peuplements, importants sur le plan écologique, devraient être maintenus. De plus, il est possible d'obtenir des revenus périodiques à partir de tels peuplements en y réalisant des interventions d'intensité faible à modérée, tout en maintenant une forêt sur pied, ce qui est susceptible de satisfaire plusieurs objectifs pour certains propriétaires. De tels peuplements doivent cependant faire l'objet de soins particuliers, afin d'éviter que les interventions ne produisent un écrémage, et les prélèvements doivent être plutôt légers afin de réduire les risques de chablis. L'approche à adopter consiste à régénérer certains arbres (ou groupes) mûrs et à assister la croissance de groupes jeunes et intermédiaires, au moyen d'interventions légères et fréquentes. Elle permet également d'intégrer la production de gros bois grâce au détournage d'arbres prometteurs qui pourront être maintenus plus longtemps. Il s'agit là d'une avenue à explorer, les essais réalisés à ce jour étant plutôt limités et pas toujours inscrits dans une optique d'amélioration des stocks sur pied.

Le choix du type de coupe progressive dépend de la structure, de la composition et de l'état du peuplement, ainsi que des objectifs d'aménagement.

Afin de limiter les risques d'envahissement par les espèces héliophiles lors des coupes partielles, il convient d'assurer le maintien d'un couvert résiduel fournissant un ombrage suffisant. À cet effet, le prélèvement ne devrait pas dépasser 50% de la surface terrière afin de limiter le drageonnement du peuplier (Prévost et Pothier, 2003), et la surface terrière résiduelle ne devrait pas descendre en deçà de 14 m²/ha afin de limiter l'envahissement par le framboisier (Dey et MacDonald, 2001 dans OMNR, 2003).

Préparation des lits de germination

Dans les stations sujettes à l'envahissement par les éricacées ou à l'entourbement, l'installation de la régénération requiert la préparation du lit de germination qui peut être effectuée grâce à un scarifiage intense (Thiffault *et al.* 2004; Thiffault *et al.* 2010) et il en va de même dans les pessières ouvertes à lichens (Tremblay, 2009). Cette préparation de terrain aurait avantage à être réalisée avant la récolte afin de favoriser l'établissement de semis plutôt que la croissance des espèces héliophiles (peupliers et éricacées). Soulignons que dans les pessières relativement denses, les éricacées présentes se retrouvent généralement dans les ouvertures (Joanisse, comm. pers.) et que la densité de *Kalmia* croît avec l'ouverture du couvert (Boulangier, 2005). C'est pourquoi, dans les peuplements ouverts, le scarifiage sous couvert sans intervention au niveau du couvert arborescent apparaît de prime abord comme un choix plus judicieux, par rapport à un scarifiage qui serait intégré à la réalisation d'une coupe partielle, car l'augmentation de la lumière risque de bénéficier aux éricacées qui réagissent plus rapidement à l'ouverture du couvert (même partielle) que les épinettes noires (Hébert *et al.* 2010). Un essai de scarifiage seul dans des pessières à lichens a d'ailleurs permis de constater que l'établissement de semis y était fortement supérieur par rapport au scarifiage combiné à la CPRS (Tremblay, 2009). Il est donc possible d'envisager l'application de mesures permettant d'obtenir une régénération naturelle d'épinette noire dans des stations qui présentent actuellement une faible régénération préétablie. Étant donné que le reboisement rapide après la coupe est perçu comme une nécessité pour limiter l'envahissement par les héliophiles, l'obtention d'une bonne régénération avant la récolte représente un atout supplémentaire pour contrer cette menace. Elle permet de plus d'assurer le maintien de l'apport de litière d'aiguilles qui permet de lutter contre les baisses de fertilité associées à l'envahissement par les éricacées. Par contre, la préparation de terrain peut aussi bénéficier au peuplier, surtout lorsqu'elle met du sol minéral à nu, mais ces risques peuvent être mitigés si le couvert résiduel fournit assez d'ombrage et que la préparation de terrain est moins intense. L'intensité de la préparation de terrain doit être déterminée en fonction de l'épaisseur de l'humus.

La préparation mécanique des sols ne devrait pas être réalisée lorsque les sols sont mouillés, afin de limiter le phénomène de compactage qui peut affecter la croissance des arbres.

Coupe finale

Pour les scénarios de coupe progressive prévoyant une coupe finale, celle-ci devrait être réalisée lorsque la régénération résineuse est adéquate et bien établie. Afin d'assurer une protection maximale de la régénération établie, la coupe d'hiver devrait être privilégiée, puisque la couche de neige fournit une certaine protection à la régénération. De plus, l'exploitation d'hiver, lorsque

les sols sont gelés, permet de limiter les risques de compactage qui sont plus importants sur les sols de texture fine à modérée que les sols de texture grossière (Welke et Fyles, 2005).

2.4.4.3. La plantation

Tel que mentionné précédemment, pour l'épinette noire, un espacement de 1,8 m X 1,8 m (soit environ 3000 tiges/ha) permet de maximiser la masse volumique et cette dernière diminue de façon importante avec une densité se situant en deçà de 1400 arbres/ha (Zhang *et al.* 2002). De plus, de faibles densités favorisent la production de bois juvénile (qui se différencie du bois mature par : sa faible densité, ses courtes trachéïdes, l'angle élevé des microfibrilles, la quantité de lignine élevée et la faible quantité de cellulose) et retardent la formation de bois mature (Alteryac, 2005). De faibles densités favorisent aussi la croissance des branches qui peuvent avoir un impact négatif sur la nodosité et occasionner le déclassement de certaines pièces de bois.

La densité initiale utilisée pour les plantations est passée de 2500 à 2000 tiges/ha pour des considérations économiques (Zhang *et al.* 2002). Cette densité ne tient cependant pas compte de la mortalité de certains plants, alors que des données de suivi de plantations d'épinettes noires âgées de 15 à 27 ans affichent des taux de survie variant entre 52 et 93% (Prégent, 2000). Il apparaît donc que la densité initiale utilisée soit non seulement insuffisante pour maximiser la qualité des bois produits, mais qu'elle comporte des risques d'obtention de bois de piètre qualité faute d'un suivi approprié qui doit être très serré, compte tenu de la faible marge de manœuvre imposée par l'utilisation d'une densité initiale axée sur le minimum. Ajoutons que cette densité minimale devrait être au moins de 2500 ti/ha pour le pin gris et l'épinette blanche en raison des problèmes de nodosité plus importants chez ces espèces.

La préparation de terrain préalable à la plantation est essentielle pour l'épinette noire mais pas pour le mélèze, qui peut être planté avec succès sans préparation de terrain (Moroni *et al.* 2009), ce qui permet de tenir compte de la fragilité de certains sites.

Regarni

Lorsque l'humus est épais, le regarni en épinette noire effectué sans préparation de terrain serait nettement moins efficace que la plantation combinée au scarifiage (Prévost et Dumais, 2003). L'humus faiblement décomposé, qui correspond au substrat disponible sans préparation de terrain, contient peu d'éléments nutritifs sous forme disponible pour les plantes et il est également sujet à la dessiccation. C'est pourquoi le regarni en épinette noire devrait être préconisé dans les sentiers, ou encore dans les parterres ayant préalablement fait l'objet d'un scarifiage, ou bien dans les parterres où l'humus est mince.

2.4.5. Sylviculture des peupliers

Les propriétés du bois de peuplier dépendent de la qualité de la station, du clone (pour les peupliers hybrides), de la vitesse de croissance et de l'âge de l'arbre. Il est reconnu que la culture du peuplier sur de courtes rotations favorise la production de bois juvénile, ce qui explique que les peupliers provenant de forêts naturelles produisent du bois de meilleure qualité par rapport à ceux cultivés en plantation (Fortier, 2011).

Le peuplier hybride forme des couches de fibres gélatineuses qui induisent une hétérogénéité dans les propriétés physiques et mécaniques du bois en réduisant la stabilité dimensionnelle, ce qui cause des problèmes lors du séchage et de l'usinage des bois (Fortier, 2011). La densité du bois diffère selon le clone : ceux ayant une densité plus élevée ont des propriétés supérieures en termes de résistance et de stabilité. Par contre, ces mêmes clones comportaient aussi la plus forte proportion de bois de tension¹⁹, ce qui implique une plus forte proportion de fibres gélatineuses. De façon générale, plus la proportion de fibres est élevée, plus forte est la densité et plus grande est la flexion (MOE plus élevé). En revanche, plus la proportion de vaisseaux est importante, moins la densité et la flexion sont élevées. Avec une augmentation de la proportion de bois de tension, il y a augmentation des retraits volumétrique et tangentiel, ainsi que de la capacité de flexion. Le vieillissement des tiges favoriserait une augmentation de la proportion de fibres et de bois de tension, ainsi qu'une diminution de la proportion de vaisseaux.

De récents tests indiquent que le « *mounding* » (création de monticules) serait la meilleure technique de préparation de terrain pour le peuplier hybride (Fortier, 2011).

¹⁹ Bois de tension : Bois caractérisé par un manque de lignification des parois cellulaires et souvent par la présence d'une couche gélatineuse dans les fibres qui donne au bois un aspect pelucheux.

3. OBJECTIFS DE PRODUCTION ET SYLVICULTURE

Puisque les conditions de croissance influencent la qualité des bois, les interventions sylvicoles auront une incidence sur les produits envisagés. L'élaboration d'une séquence d'interventions formant le scénario sylvicole générera des conditions de croissance qui détermineront les produits possibles.

3.1. DENSITÉ DU PEUPEMENT, PROPRIÉTÉS DU BOIS ET PRODUITS ANTICIPÉS

Il est possible de distinguer deux grandes catégories de scénarios sylvicoles fournissant des paniers de produits différents : la forêt naturelle dense, où la croissance lente fournit des bois de petite dimension aux propriétés mécaniques supérieures, et la forêt artificielle plus ouverte, où la croissance accélérée fournit des bois de plus grosse dimension mais dont les propriétés mécaniques sont moindres. Entre ces deux extrêmes, les diverses interventions ou leurs modalités peuvent permettre de nuancer les conditions de croissance et influencer le panier de produits.

Les effets potentiels des conditions de croissances associés aux extrêmes du gradient d'espacement entre les arbres qui ont été considérés pour l'élaboration des scénarios sont synthétisés au tableau 4. La colonne de gauche, correspondant à un espacement réduit, peut être associée aux peuplements naturels issus d'une régénération dense, alors que la colonne de droite, référant à un grand espacement déterminé sur la base des densités naturelles observées à maturité (Candy, 1951), correspond aux plantations.

En réduisant l'espacement, la réalisation d'éclaircies permet de tendre vers la colonne de droite. Toutefois, l'effet sur les produits pourra différer en fonction de l'intensité d'éclaircie. Des éclaircies légères (20-25%) seront favorables à la production de bois d'apparence qui correspondent à de gros sciages caractérisés par leur dureté et leur stabilité dimensionnelle, ce qui nécessite un contrôle mesuré de la croissance. Des éclaircies modérées favoriseront plutôt la dimension des sciages, sans égard à leurs propriétés physiques. Par conséquent, l'utilisation comme bois d'apparence des bois produits à partir de tels scénarios pourra nécessiter un traitement de densification.

Tableau 4. Relations générales entre la densité du peuplement, les propriétés du bois et les produits anticipés

| Caractéristiques | Espacement réduit : Croissance lente | Espacement large : Croissance rapide |
|--|---|--|
| Arbres | | |
| Diamètre du tronc | Petit | Grand |
| Taille du houppier | Petit | Grand |
| Hauteur de la première branche vivante | Élevée | Basse |
| Diamètre des branches | Petit | Grand |
| Défilement du tronc | Faible | Élevé |
| Bois | | |
| Anatomiques | | |
| Largeur et surface de cerne | Petite | Grande |
| Longueur des fibres | Longues | Courtes |
| Nodosité | Limitée | Importante |
| Proportion de bois juvénile (faible densité, courtes trachéïdes, angle des microfibrilles élevé, quantité de lignine élevée, quantité de cellulose faible) | Faible | Élevée |
| Physiques | | |
| Masse volumique | Élevée | Faible (effet très important en deçà de 1400 tiges/ha) |
| Retraits | Faibles | Élevés |
| Mécaniques | | |
| MOR | Élevé | Faible |
| MOE | Élevé | Faible |
| Produits anticipés (proportion relative) | | |
| Déroulage | Faible | Élevée |
| Gros sciages | Faible | Élevée |
| Bois d'apparence (gros sciage durs avec bonne stabilité dimensionnelle) | Faible | Élevée avec régime d'Ec légères (moins avec Ec modérées) |
| Petits sciages | Élevée | Modérée |
| Bois MSR | Élevée | Faible |
| Bois de qualité pâte | Élevée | Faible |

3.2. ACTIONS SYLVICOLES, PROPRIÉTÉS DU BOIS ET PRODUITS ANTICIPÉS

Les facteurs suivants ont été retenus pour l'élaboration des scénarios sylvicoles en raison de leurs effets sur les produits anticipés :

- La densité initiale qui dépend du mode de régénération;
- La densité subséquente contrôlée par les éclaircies;
- L'élagage (et la taille de formation pour les feuillus);
- La durée de la révolution.

Le tableau 5 présente les dispositions sylvicoles favorables ou défavorables à l'obtention des divers produits, en lien avec les facteurs mentionnés ci-dessus.

Tableau 5. Relations générales entre les produits et les interventions sylvicoles

| Espèces | Caractéristiques | Produits | Interventions sylvicoles et modalités | |
|---|--|---|---|--|
| | | | Favorables | Défavorables |
| Indéterminées | Masse volumique uniforme (entraîne un gonflement/retrait plus uniforme) | Sculpture Déroulage Tournage Meilleure adhésion des peintures et vernis | Ec absentes ou légères Élagage | Ec modérées à fortes |
| Indéterminées | Dureté Stabilité dimensionnelle | Bois d'apparence | Ec absentes ou légères Élagage Allongement des révolutions | Ec modérées à fortes |
| Indéterminées | Fibres longues Parois cellulaires minces | Papiers résistants | Densité initiale élevée Ec absentes | Densité initiale faible Ec modérées à fortes |
| Peupliers, pins | Faible masse volumique | Panneaux de lamelles orientées | Ec | |
| Épinettes mûres | Bois rigide Bonne résistance mécanique associée aux nœuds de petite taille Fil droit | Bois de charpente | Densité initiale élevée Ec absentes ou légères Élagage Allongement des révolutions | Densité initiale faible Ec. modérées à fortes |
| Épinettes mûres à croissance lente | Densité élevée | Bois MSR Bois d'ingénierie (ex : fermes de toit, poutrelles de plancher et bois lamellé-collé) | Densité initiale élevée Ec absentes (ou légères) Allongement des révolutions | Densité initiale faible Ec. modérées à fortes |

| Espèces | Caractéristiques | Produits | Interventions sylvicoles et modalités | |
|--|---|---|---|--------------|
| | | | Favorables | Défavorables |
| Épinette blanche | Trachéïdes longues (>2 mm) et fines | Papiers fins | Densité initiale élevée Ec absentes | |
| | Trachéïdes longues et grosses | Papiers journaux | | |
| | Trachéïdes courtes et fines | Papiers mouchoirs | | |
| | Trachéïdes courtes et grosses | Papiers absorbants | Densité initiale faible Ec modérées à fortes | |
| Sapin | Isolant acoustique, gros diamètre | Déroulage (pour l'intérieur des panneaux) | Ec légères à modérées Allongement des révolutions | |
| Pin blanc, pin rouge et épinettes | Gros diamètre, absence de noeuds | Déroulage | Ec modérées à légères Élagage Allongement des révolutions | |
| Pin blanc, pin rouge et épinettes | Gros diamètre | Constructions en bois rond | Ec modérées à légères Allongement des révolutions | |
| Feuilles (projet pilote à partir de pâte à papier feuillue) | | Cellulose nanocristalline | Densité initiale faible Ec modérées à fortes | |
| Feuilles | | Textiles | Densité initiale faible Ec modérées à fortes | |
| La plupart des essences (principalement BOJ, FR, CH, PEU, PET, ERR, FIG, PIB) | Traitement qui augmente l'imperméabilité, accroît la résistance à la pourriture, améliore la stabilité dimensionnelle | Bois torréfié : recouvrement intérieur ou extérieur, planchers, escaliers, moulures, meubles de patio | Densité initiale faible Ec modérées à fortes | |

| Espèces | Caractéristiques | Produits | Interventions sylvicoles et modalités | |
|---|--|---|---|--------------|
| | | | Favorables | Défavorables |
| Essais réalisés avec feuillus (PET, ERS) | Procédé qui augmente la densité, la dureté (double les MOR et MOE), augmente la résistance en flexion mais diminue la résistance à la traction | Bois densifiés par compression à la chaleur en présence de vapeur : fournit des produits densifiés en surface appropriés à une utilisation intensive (ex : planchers, tables) | Densité initiale faible Ec modérées à fortes | |

Pour les matériaux composites, tels que les bois lamellés-collés, les caractéristiques du produit résultant dépendent des éléments qui entrent dans sa fabrication. Ainsi, des placages dont l'âme est faite de feuilles de peuplier hybride auront de moins bonnes propriétés mécaniques par rapport à des placages dont l'âme est faite en tremble. Par ailleurs, les couches apparentes sont produites à partir de sciages de qualité, il faut donc prévoir en disposer pour fabriquer ces produits.

4. SCÉNARIOS SYLVICOLES

Le scénario doit être adapté à la station. Pour les plantations, il faut tenir compte de l'espèce, de la qualité de la station, de la densité du reboisement, du taux de survie, de la qualité des tiges (incluant les dommages causés par les maladies et insectes), de la surface terrière, du rapport H/D des dominants, du drainage et de la protection de la plantation par rapport aux vents (Prégent, 2004). Le choix du scénario dépendra aussi des objectifs de production ainsi que des moyens et ressources disponibles. En forêt naturelle, il faut tenir compte des essences, de la qualité de la station, de la dynamique végétale telle qu'indiquée par la composition des différents étages de végétation, des conditions d'obtention de la régénération naturelle (lits de germination, lumière...), de la densité du peuplement, de sa structure diamétrale, de la qualité des tiges (incluant les dommages causés par les maladies et insectes), de la surface terrière, du rapport H/D des dominants, du drainage et de la protection par rapport aux vents dominants. Le choix du scénario dépendra aussi des objectifs de production ainsi que des moyens et ressources disponibles.

Les densités initiales utilisées dans les scénarios de plantation de conifères sont de 2000 à 3000 ti/ha. Il s'agit là d'un minimum qui ne sera pas favorable à l'obtention de bois présentant des caractéristiques mécaniques supérieures. Par conséquent, les scénarios de plantation prévoient à terme une faible production de bois MSR. Étant donné la convergence entre les préoccupations relatives à la gestion du risque et les objectifs de production de bois de qualité, il pourrait être judicieux d'opter pour une densité initiale de 3000 plants/ha dans les plantations de conifères. Le choix de l'espèce dépend de la station : dans la région de l'Abitibi, l'EPB convient sur les stations de drainage modéré (3) et le PIG sur les dépôts sableux ou argileux. Il est possible de planter du PIG ou du MEL pour contrer le phénomène d'invasion par les éricacées.

Les travaux d'éclaircies, aussi bien commerciale que précommerciale, devraient être réalisés en visant un objectif de réduction de la densité plutôt qu'une densité minimale, puisqu'une diminution radicale de la densité a des effets négatifs sur les propriétés du bois.

Les scénarios sylvicoles élaborés sont présentés à l'annexe 1. En annexe 2 sont présentés les scénarios résumés à l'intention des propriétaires.

4.1. GRANDS PRINCIPES RETENUS POUR L'ÉLABORATION DES SCÉNARIOS SYLVICOLES

La qualité des bois peut être influencée par :

- la densité du peuplement;
- la durée de la révolution;
- les soins culturaux (élagage et taille de formation).

Pour tenir compte de l'évolution des peuplements dans l'élaboration des scénarios sylvicoles, il convient de distinguer la densité initiale qui est reliée au mode de régénération employé et la densité aux stades de développement subséquents qui peut être réglée au moyen d'éclaircies.

Il existe également des soins culturaux visant à améliorer la qualité des bois produits, soit l'élagage et la taille de formation.

Les scénarios élaborés se concentrent donc sur la densité initiale, les éclaircies qui contrôlent la densité par la suite, l'application des soins culturaux appropriés, la durée de la révolution et le mode de régénération.

Pour chacun de ces aspects, les grands principes appliqués en regard de la qualité des bois et des types de produits anticipés sont résumés ci-après.

4.1.1. Densité initiale

► Une densité initiale faible favorise une croissance rapide apte à produire des bois de grosse dimension mais comportant une proportion plus importante de bois juvénile dont les propriétés physiques et mécaniques sont moins intéressantes.

► Plus la densité initiale est élevée, meilleures sont les propriétés physiques et mécaniques, donc la proportion de bois MSR sera plus élevée : les différences sont significatives lorsque l'on compare les bois provenant de forêts naturelles (issus d'une dense régénération) par rapport aux bois de plantation, alors qu'une comparaison entre des bois provenant de peuplements de densité de 3000 ti/ha par rapport à 2000 ti/ha montre souvent les mêmes tendances, mais les différences sont moindres et généralement non significatives.

► Une densité initiale inférieure à ≈ 1500 ti/ha a d'importants effets négatifs sur les propriétés des bois.

► Une densité faible favorise la croissance des branches et le maintien de branches basses, ce qui fait augmenter la taille des nœuds. Pour le pin gris, la taille des branches augmenterait de manière très importante lorsque la densité est inférieure à 2500 ti/ha.

4.1.2. Éclaircies

► Les éclaircies concentrent la croissance sur un nombre de tiges moindre, ce qui permet l'obtention de plus gros diamètres, mais accroît le défilement des tiges.

► Les éclaircies fortes favorisent la croissance de plus grosses branches et l'apparition de branches adventives.

► Une seule éclaircie forte induit des contraintes internes importantes qui peuvent provoquer des fentes, des fissures et des déformations des bois sciés lors du séchage. Les éclaircies fortes réalisées au stade de gaulis ont un effet négatif important sur la production de bois de haute qualité.

► La rigidité et la résistance à la flexion diminuent avec l'intensité de l'éclaircie : Les éclaircies légères (20%) ont significativement moins d'impacts négatifs sur les propriétés du bois que les éclaircies modérées (35%). Ainsi, une forte densité initiale éclaircie à 35% (EPC) pour donner une densité de 3400 ti/ha produit des bois ayant de meilleures propriétés physiques par rapport à des bois de plantation dont la densité varie entre ≈ 2000 et 3100 ti/ha, mais les propriétés sont encore meilleures avec une éclaircie à 20% produisant une densité de ≈ 3700 ti/ha.

► Les forêts naturelles qui fournissent des bois dotés de propriétés mécaniques supérieures avaient une croissance lente et étaient éclaircies par la mortalité. Par conséquent, un régime d'éclaircies visant la production de bois de qualité supérieure devrait prévoir un contrôle léger et graduel de la densité sur tout l'horizon, ce qui implique des interventions légères et fréquentes. Avec le diagramme de densité, on devrait osciller entre la densité normale et la densité éclaircie de 75-80% pour favoriser la production de bois de qualité et éviter de s'approcher de la limite inférieure de densité minimum.

4.1.3. Élagage et taille de formation

- ▶ L'élagage permet de limiter la taille des nœuds. Son effet (sur le classement de bois) est plus important chez les espèces ayant de grosses branches (EPB et PINS par rapport à l'EPN).
- ▶ L'élagage permet de déplacer la cime vers le haut (arrêt de la production de bois juvénile en bas de la cime) et réduit le défilement de la tige (produit moins de volume mais de meilleure qualité et améliore le rendement lors du débitage).
- ▶ L'élagage doit être effectué de manière progressive (retrait $\leq 30\%$ de la cime vivante/intervention pour l'EPN, $\leq 25\%$ pour le SAB).
- ▶ La taille de formation s'applique aux espèces feuillues et vise à éviter la formation de fourches (qui réduisent la longueur utile).

4.1.4. Durée de la révolution

- ▶ La qualité et la résistance des sciages augmentent avec l'âge d'exploitabilité.
- ▶ L'allongement de la révolution permet l'obtention de plus gros bois, pour lequel le taux de récupération du bois d'œuvre et la valeur de la tige sont plus importants. En forêt naturelle, il implique une mortalité plus élevée qui peut toutefois être court-circuitée grâce à la réalisation d'éclaircies (à condition de retirer prioritairement les tiges moins vigoureuses).
- ▶ L'allongement de la révolution se solde par une diminution de la proportion de bois juvénile (doté de propriétés physiques et mécaniques moins intéressantes), un défilement moindre, ainsi qu'une réduction de l'incidence des défauts et une atténuation de l'effet de la grosseur des nœuds grâce à l'obtention de pièces de plus grosse dimension.
- ▶ La maximisation du rendement financier et des propriétés mécaniques nécessite une révolution plus longue que la maximisation du volume.

4.1.5. Mode de régénération

- ▶ Les forêts naturelles qui fournissent des bois dotés de propriétés mécaniques supérieures avaient des densités initiales nettement plus élevées par rapport aux densités de plantation.

► Il existe des méthodes sylvicoles favorables à l'obtention d'une régénération naturelle de forte densité : les coupes progressives. Grâce à la combinaison du maintien des meilleurs semenciers qui offrent aussi une protection aux semis (ex. protection contre le gel printanier et contrôle du climat lumineux) et à la préparation de terrain qui favorise l'établissement des semis (et permet de contrer le phénomène d'accumulation de matière organique en l'absence de feu), la coupe progressive représente un moyen pour favoriser l'obtention de densités initiales élevées.

► Les coupes progressives peuvent être de divers types : rapide (délai entre la coupe d'ensemencement et la coupe finale $\leq 20\%$ de la révolution), lente (délai de 20-50% de la révolution entre la première coupe d'ensemencement et la coupe finale, ce qui permet un chevauchement des révolutions) et irrégulière (qui maintient toujours au moins 2 classes d'âge, souvent au moyen d'interventions réalisées par groupes, ce qui permet le maintien d'une forêt d'une certaine hauteur).

► Selon le type de coupe progressive retenu, il est possible de concilier la production ligneuse avec le respect des stations fragiles ou le désir de maintien d'une forêt d'une certaine hauteur (Cprog lente ou Cprog irrégulière).

► Dans les peuplements ouverts présentant une régénération éparse, une préparation de terrain sous couvert (sans récolte, puisqu'il faut maintenir les semenciers) permet d'améliorer la densité de la régénération naturelle.

► La plantation utilisant des densités de l'ordre de 2000 ti/ha produit de gros bois rapidement mais ses propriétés mécaniques et physiques sont moins intéressantes par rapport à des densités initiales plus importantes s'approchant de celles obtenues par des processus naturels (feux espacés dans le temps, dans le cas des pessières).

► Un régime de coupes partielles réalisé dans un peuplement mixte à PET et laissant une surface terrière minimale suffisante ($\geq 14 \text{ m}^2/\text{ha}$) permet d'aménager les peuplements mixtes à dominance résineuse. La présence d'une proportion limitée de peupliers dans les pessières permet l'obtention de plus grosses tiges. Le maintien d'un ratio d'une tige de tremble pour 5 tiges d'épinette noire au moyen d'éclaircies est recommandé pour maximiser le volume d'épinette noire tout en conservant la biodiversité et les autres avantages (ex. : diversification des produits, protection contre certains ravageurs...) liés à la forêt mixte.

4.2. PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS SYLVICOLES

Des scénarios ont été développés pour les principales productions dans le territoire couvert par l'Agence de mise en valeur des forêts privées de l'Abitibi, soit la production résineuse (R : SEPM), la production mixte (M : SEPM-FI) et la production de peupliers (F : PEU).

4.2.1. Production SEPM

Scénario R1 : Ultra-intensif en plantations résineuses

- Stations à bon potentiel forestier;
- Régénération : Artificielle
 - Faible densité initiale;
- Contrôle de la croissance : Régime intensif d'éclaircies basé sur l'application des diagrammes de densité; éclaircies légères (20-25%) pour une meilleure qualité, ou modérées (30-35%) pour un volume plus élevé;
- Promotion de la production de billes sans nœuds : Élagages ne dépassant pas 30% de la cime vivante des 500 arbres d'avenir combinés aux EC;
- Coûts et niveau d'efforts : Élevés à très élevés;
- Objectifs de production : Un peu de très gros bois et forte proportion de gros et moyens sciages (davantage de très gros et de gros avec allongement des révolutions), incluant proportion faible à modérée de bois MSR (davantage avec régime d'Ec légères et allongement des révolutions).

Scénario R2 : Intensif en plantations résineuses

- Stations à potentiel forestier variable (bon à faible);
- Régénération : Artificielle
 - Faible densité initiale;
- Contrôle de la croissance : Régime d'éclaircies modérées (33%) pour un volume élevé;
- Promotion de la production de billes sans nœuds : **Élagages uniquement sur bonnes stations**, ne dépassant pas 30% de la cime vivante des 500 arbres d'avenir combinés aux EC;
- Coûts et niveau d'efforts : Élevés;
- Objectifs de production : Proportion modérée de gros et moyens sciages (davantage de gros avec allongement des révolutions), incluant faible proportion de bois MSR.

Scénario R3 : Intensif en forêt résineuse naturelle

- Stations à bon potentiel forestier;
- Régénération : Naturelle à densité élevée à très élevée avec possibilité de regarni; promotion de la coupe progressive comme moyen d'obtention de densités initiales élevées
 - Densité initiale : élevée à très élevée;
- Contrôle de la croissance : Régime intensif d'éclaircies basé sur l'application des diagrammes de densité; éclaircies légères (20-25%) pour une meilleure qualité, ou modérées (30-35%) pour un volume plus élevé;
- Coûts et niveau d'efforts : Élevés;
- Objectifs de production : Proportion élevée de petits à gros sciages (davantage de gros avec Ec modérées et allongement des révolutions) incluant proportion modérée de bois MSR (davantage avec Ec légères).

Scénario R4 : Extensif en forêt résineuse naturelle

- Stations à potentiel forestier variable (bon à faible);
- Régénération : Naturelle à densité modérée à très élevée avec possibilité de regarni; promotion de la coupe progressive comme moyen d'obtention de densités initiales élevées
 - Densité initiale : modérée à très élevée;
- Croissance : Laisser pousser;
- Coûts et niveau d'efforts : Faibles à modérés;
- Objectifs de production : Petits à moyens sciages (davantage de moyens avec allongement des révolutions) incluant proportion élevée à très élevée de bois MSR (davantage avec allongement des révolutions) + proportion modérée à élevée de bois à pâte (moins avec allongement des révolutions).

4.2.2. Production mixte

Scénario M1 : Intensif en forêt mixte

- Stations à potentiel forestier bon à modéré;
- Régénération : Naturelle ou en partie artificielle, abondante et de composition mixte
 - Densité initiale : modérée à très élevée;
- Gestion du mélange d'espèces : Régime d'éclaircies d'intensité légère à modérée visant à accélérer la succession végétale en assurant un remplacement progressif des FI par les résineux; les FI retirés doivent permettre de dégager des résineux présents pour assister efficacement la succession végétale; les coupes partielles ne doivent pas excéder une intensité modérée afin de limiter la recrudescence du FI;

- Contrôle de la croissance : Régime intensif d'éclaircies d'intensité légère à modérée pour accélérer la succession; éclaircies légères (20-25%) pour une meilleure qualité, ou modérées (30-35%) pour un volume plus élevé;
- Coûts et niveau d'efforts : Élevés;
- Objectifs de production : Proportion élevée de moyens à gros sciages (davantage de gros avec Ec modérées et allongement des révolutions) incluant proportion modérée de bois MSR (davantage avec Ec légères).

4.2.3. Production peupliers

Scénario F1 : Intensif pour déroulage et sciage à partir de PET

- Stations à potentiel forestier bon à modéré;
- Régénération : Régénération naturelle de PET
 - Densité initiale : très élevée à modérée;
- Croissance : DEG au besoin, mais dépressage remis en question pour son effet incertain sur la croissance et les risques d'infection (chancre hypoxylonien), EC mais élagage remis en question à cause des risques d'infection (chancre hypoxylonien);
- Mode de régénération : CT;
- Coûts et niveau d'efforts : Modérés;
- Objectifs de production : Forte proportion de déroulage, gros et moyens sciages, proportion faible à modérée de bois de qualité supérieure + quantité modérée de bois à pâte.

Scénario F2 : Extensif pour fibre à partir de PET ou de PEB

- Stations à potentiel forestier variable (bon à faible);
- Régénération : Régénération naturelle de PET et/ou de PEB
 - Densité initiale : élevée à faible;
- Croissance : DEG au besoin, laisser pousser jusqu'à maturité;
- Mode de régénération : CT ou réorientation vers production SEPM par Cp;
- Coûts et niveau d'efforts : Faibles;
- Objectifs de production : Faible proportion de déroulage, forte proportion de bois à pâte + petits sciages avec proportion modérée de bois de qualité supérieure.

Scénario F3 : Intensif pour bois d'œuvre et fibre à partir de PEH

- Conditions d'application : Friches, superficies forestières mal régénérées;
- Régénération : Artificielle : SCA (mounding) puis plantation de PEH
 - Densité initiale : 1100 ti/ha;
- Croissance : DEG au besoin, taille de formation + élagage (1 à 4) + EC (réalisée de manière décalée par rapport aux élagages);
- Mode de régénération : initial : SCA-PL; à maturité : CT;
- Coûts et niveau d'efforts : Élevés mais production rapide;
- Objectifs de production : Déroulage (incertain : à vérifier dans le futur, possiblement dépendant du clone planté), gros et moyens sciages, proportion faible à modérée de bois de qualité supérieure + proportion faible à modérée de bois à pâte (essentiellement bois à pâte en l'absence d'Ec).

5. CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES

La sylviculture permet d'obtenir des bois plus gros et/ou de meilleure qualité, ce qui devrait être favorable à l'obtention d'un meilleur prix de vente. D'autre part, la sylviculture diminue les frais d'exploitation future, ainsi que de transformation, grâce à une augmentation du volume par tige (Villeneuve, 2009; Beauregard, 2008). La sylviculture a donc un effet de synergie sur la valeur nette du bois (Villeneuve, 2009). La rentabilité est influencée par la conjoncture du marché, alors que des prix du bois élevés sont favorables à un volume élevé à l'échelle du peuplement, et que des coûts de production élevés favorisent plutôt l'obtention d'un fort volume par tige (Sainte-Marie, 2009). L'optimum est donc variable dans le temps.

De plus, les différentes publications comportant des considérations relatives à la rentabilité des interventions sylvicoles ne tiennent pas toujours compte de la qualité des produits et encore moins des nouveaux produits étant donné l'absence ou la rareté des industries de transformation les produisant.

Les calculs basés sur la valeur actualisée nette des produits actuellement transformés s'avèrent souvent biaisés par l'absence actuelle de marchés ou la prise en compte d'une éventuelle plus value (impossible à évaluer pour le moment) associée au développement de produits de niche. Cette situation comporte des effets pernicioeux sur la sylviculture, puisque les prix offerts sur le marché dans les conditions actuelles ne reflètent pas la future valeur des bois. Le fait de baser ses décisions sur la structure actuelle du marché aboutit à un cul-de-sac sur le plan sylvicole puisqu'elle empêche de tenir compte du gain en valeur réel ou du positionnement sur le marché qui pourrait résulter du traitement. On se prive ainsi des opportunités de plus value qui surviendront avec les différents développements technologiques, d'une part, et avec la raréfaction de certains types de produits ligneux résultant de notre aménagement actuel (ex : gros arbres, EPN à croissance lente), d'autre part.

Une attitude plus visionnaire peut permettre d'élargir la gamme d'opportunités en anticipant les demandes futures comportant une plus value. Toutefois, pour bénéficier des meilleurs prix possibles, dès maintenant et encore plus dans le futur avec la multiplication des produits de niche qui se profile à l'horizon, il faut se doter de moyens pour trier les bois en fonction de leur qualité.

6. AUTRES PISTES DE SOLUTIONS

Les diverses références consultées ont permis d'identifier d'autres pistes de solutions qui permettraient de mieux prendre en compte les caractéristiques des bois pour en établir la valeur.

Il s'agit de :

- trier les bois en fonction de la hauteur dans l'arbre d'où provient la bille;
- trier les bois pour séparer les tiges élaguées de celles qui ne l'ont pas été;
- élaguer les PIG sur une hauteur de 9 pi pour les orienter vers la production de poteaux;
- faire de l'éclaircie commerciale de PET pour accroître la proportion de déroulage;
- promouvoir le développement d'usines de 2^e et 3^e transformation;
- promouvoir le Centre de valorisation de la fibre (pour optimiser la chaîne d'approvisionnement et la gestion intégrée des ressources et aussi gérer la valeur).

CONCLUSION

Les scénarios sylvicoles proposés s'inscrivent dans le cadre des orientations de l'Agence de mise en valeur des forêts privées de l'Abitibi visant à intensifier l'aménagement forestier et à améliorer la planification des travaux sylvicoles.

Les scénarios sylvicoles élaborés tiennent compte de la qualité des bois produits. De plus, d'autres pistes de solutions ont été identifiées pour favoriser l'obtention de meilleurs prix pour les produits présentant des caractéristiques répondant aux besoins de certains marchés de niche.

Les scénarios sylvicoles élaborés permettront de doter les conseillers forestiers oeuvrant dans les forêts privées de l'Abitibi d'outils visant à faciliter et orienter leur prise de décision en forêt.

RÉFÉRENCES

- Alteyrac, J. 2005. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). Thèse de doctorat. Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec. 136 p.
- APFC (Association des Produits forestiers du Canada). 2010. Transformer l'industrie canadienne des produits forestiers. Sommaire des résultats du Projet de la voie biotechnologique. 10 p. En ligne : <http://www.fpac.ca/publications/Biopathways%20RGB%20FRE.pdf>
- APFC. 2011. Le nouveau visage de l'industrie forestière canadienne : une biorévolution en devenir. Le projet de la voie biotechnologique. APFC – FPInnovations. 10 p. En ligne : <http://www.fpac.ca/publications/BIOPATHWAYS%20II%20FR%20web.pdf>
- Beaulieu, J. 2006. Qualité des bois résineux de plantation : connaissances et perspectives. Présentation Power Point datée du 16 mars 2006. En ligne : http://carrefour.cegep-baie-comeau.qc.ca/documents_en_ligne/docs/beaulieu_cfl_ppt.pdf
- Beaulieu, J. 2004. Les caractéristiques de bois d'épinette blanche de plantation : de la fibre à la seconde transformation. Présentation à l'ACFAS, du 12 mai 2004. Montréal, Qc. En ligne : http://www.rlq.uqam.ca/acfas2004/presentation/Jean_beaulieu.pdf
- Beauregard, R. 2008. Transformation du bois des vieilles forêts et modèles d'affaires. Présentation colloque sur les vieilles forêts, Sept-îles, 29 mai, 2008. En ligne : http://carrefour.cegep-baie-comeau.qc.ca/document_colloque/080528/presentations/pres_11_beauregard.pdf
- Binot, J.-M. 2006. Pourquoi élaguer? Dans les actes du colloque sur l'élagage forestier : Élaguer pour enrichir nos forêts! Maniwaki, mars 2006. p. 8-10. En ligne : <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/elagage/documents/actes-elagage.pdf>
- Blouin, D., F. Grenon et G. Lessard. 2007. Suivi 2006 des effets réels de l'éclaircie précommerciale de peuplier. CERFO. Rapport No 2007-09. 26 p.
- Bolghari, H. A. 1990 (non publié). Diagrammes de gestion de la densité pour l'épinette noire et le pin gris. DRF.
- Bouchard, M., et autres. 2010. Intégration des enjeux écologiques dans les plans d'aménagement forestier intégré. Partie I — Analyse des enjeux (version préliminaire 1.0). Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement et de la protection des forêts, 117 p.
- Boulanger, F. 2005. La régénération de l'épinette noire en forêt boréale en présence de *Kalmia angustifolia*; étude des effets de la lumière. Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, Québec, Canada. 48 p.

- Candy, R. H. 1951. Reproduction on cut-over and burned-over land in Canada. Can. Dep. Res. And Developm., For. Res. Div., Silv. Res. Note no 92, 224 p.
- Cloutier, A. 2011. Quelques pistes de développement dans le secteur des produits du bois. Présentation faite dans le cadre des midis de la foresterie, chaire AFD de l'UQAT, le 25 mars 2011. En ligne :
<http://chaireafd.uqat.ca/midiForesterie/pdf/20110315PresentationAlainCloutier.pdf>
- Cloutier, A. 2007. Notes de cours : Anatomie du bois avancée (SBO-63955). Université Laval. Québec. p. 8-1 à 8-31.
- Crespell, P. 2010. Proposition de valeur pour le bois d'œuvre lamellé croisé. Groupe de recherche sur les études de marchés économiques, FPInnovations. 2 p. En ligne :
<http://www.fpac.ca/publications/biopathways/Cross%20Laminated%20Timber%20Fr.pdf>
- Cyr, G. 2006. Les effets de l'élagage sur la croissance. Dans les actes du colloque sur l'élagage forestier : Élaguer pour enrichir nos forêts! Maniwaki, mars 2006. p. 11-14. En ligne :
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/elagage/documents/actes-elagage.pdf>
- Fillion, J. 1994. Distribution spatiale de la régénération d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) 8 ans après un feu de forêt. Mémoire de maîtrise. UQAC. 72 p. En ligne :
<http://bibvir.uqac.ca/theses/1490781/1490781.pdf>
- Fortier, 2011. Qualité du bois de peuplier hybride : effet du site, du clone et de l'âge sur les propriétés anatomiques, physiques et mécaniques de l'arbre. Info_RLQ : 8 (2) 5 p. à partir de : Huda, A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernandez, R., Fortin, Y. 2010. Variations inter sites, inter clones et intra arbre des propriétés anatomiques des peupliers hybrides : implications sur la qualité du bois et sur les procédés de transformation. Affiche présentée lors du Colloque de la Chaire en Aménagement Forestier Durable, 23 novembre 2010, Rouyn-Noranda.
- Gagnon, H. 2006. L'élagage des peupliers hybrides. Dans les actes du colloque sur l'élagage forestier : Élaguer pour enrichir nos forêts! Maniwaki, mars 2006. p. 46-48. En ligne :
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/elagage/documents/actes-elagage.pdf>
- Girard, F., S. Payette et R. Gagnon. 2008. Rapid expansion of lichens woodlands within the closed-crown boreal forest zone over the last 50 years caused by stand disturbances in eastern Canada. *Journal of Biogeography* 35: 529-537.
- Hébert, B. 2007. De l'éclaircie commerciale dans les peuplements résineux? Donnez-moi une bonne raison! Forêt Savoir, Bulletin d'information du Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, no 10, septembre, p. 2. En ligne :
http://www.foretgaspesie-les-iles.ca/fichiers/consortium/Bulletin/Foret_savoir/2007/Bulletin_septembre_2007_sw.pdf
- Hébert F., N. Thiffault, J.-C. Ruel et A.D. Munson. 2010. Ericaceous shrubs affect black spruce physiology independently from inherent site fertility. *For. Ecol. Manage.* 260 : 219-228.

- Lachance, M. 2008. Bioénergie et biocarburants produits à partir de biomasse forestière. CQVB. Présentation au 2^e symposium sur la valorisation de la biomasse forestière et des résidus de transformation. 22 avril 2008, Gatineau (Qc). En ligne :
<http://www.quebecwoodexport.com/biomasse/documents/Lachance.pdf>
- Lavoie, L., J.-M. Binot et L. Gagne. 2006. Incidence de l'éclaircie commerciale sur quelques propriétés physiques et mécaniques du bois dans une plantation d'épinette blanche située dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick. Dans : Colloque sur les éclaircies commerciales dans les plantations, Rivière-du-Loup, Qc. p. 39-40. En ligne :
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/colloque/eclaircies/documents/lavoie.pdf>
- Lessard, J. 2008. Caractéristiques de bois des mélèzes et leur potentiel d'utilisation. Le mélèze en Gaspésie – Potentiel, sylviculture et transformation. Présentation datant du 12 novembre 2008. Bonaventure. En ligne :
http://www.foretgaspesie-les-iles.ca/fichiers/consortium/Transfert_de_connaissances_2008-2009/Meleze/Caracteristiques_bois_melezes_et_potentiel_d_utilisation_PD.pdf
- Lord, D. Remise en production des pessières noires à lichens de la forêt boréale commerciale : Aspects physico-chimiques des sols et croissance et physiologie de la régénération après CPRS et scarifiage. En ligne :
http://www.fqrnt.gouv.qc.ca/parteneriatsInnovation/parteneriats/forums/pdf_avril08/Daniel%20Lord_Pessieres%20noires%20a%20lichens.pdf
- Matthews, J.D., 1989. Silvicultural systems. Oxford University Press, 284 p.
- Moroni, M.T., N. Thiffault, B.D. Titus, C. Mante et F. Makeschin. 2009. Controlling Kalmia and re-establishing conifer dominance enhances soil fertility indicators in central Newfoundland, Canada. Can. J. For. Res. 39: 1270-1279.
- Newton, P.F. 2009. Development of an integrated decision-support model for density management within jack pine stand-types. Ecological modelling 220 (2009) 3301-3324.
- Nyland, R.D., 2002. Silviculture. Concepts and applications. 2nd edition. Waveland Press, Long Grove, IL, USA, 682 p.
- OMNR. 2003. Silviculture guide to managing spruce, fir, birch, and aspen mixedwoods in Ontario's boreal forest. Version 1.0. Ontario Ministry of Natural Resources, Queen's Printer for Ontario, 392 p. En ligne :
http://www.mnr.gov.on.ca/en/Business/Forests/Publication/MNR_E000352P.html
- Ouraïs, M., H. Bouaff, A. Koubaa et G. Larocque. 2008. Variation de la qualité du bois de l'épinette noire avant et après éclaircie. Présentation au Colloque de la chaire en aménagement forestier durable de l'UQAT de 2008. En ligne :
http://web2.uqat.ca/CAFD/colloqueChaire/colloque2009/presentations/09h35_Koubaa.pdf

- Prégent, G. 2004. Éclaircie commerciale dans les plantations : Importance du moment opportun. Progrès forestier. Association forestière des Cantons de l'est. Printemps 2004. 3 p.
En ligne : http://www.afce.qc.ca/progres_forestier/articles_progres_forestier/eclaircie/Eclaircie2_printemps04.pdf
- Prégent, G. L'éclaircie commerciale. Pamphlet de l'Association forestière des Cantons de l'est. 2 p. En ligne : http://www.afce.qc.ca/references_utiles/docs/fiches-forestieres/Eclaircie_Commerciale_SPBCQ.pdf
- Prévost, M. et D. Pothier. 2003. Partial cuts in a trembling aspen–conifer stand : effects on microenvironmental conditions and regeneration dynamics. Can. J. For. Res. 33: 1-15.
- Raymond, P., S. Bédard, S. Tremblay et C. Larouche. 2010. La coupe progressive irrégulière, un outil prometteur pour la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique au Québec. Avis de recherche forestière No 18. DRF, MRNF. 2 p. En ligne : <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Raymond-Patricia/Avis18.pdf>
- Rycabel, T. 2007. Qualité et rendement en sciages selon les conditions de croissance des tiges d'épinette noire (*Picea mariana* Mill.). Thèse de doctorat. Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval (Qc). 173 p. En ligne : <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/24228/24228.html>
- Sainte-Marie, G. 2009. Interactions entre le peuplier faux-tremble et l'épinette noire en forêt boréale de l'ouest du Québec. Mémoire de maîtrise. UQAM. 77 p.
- Schneider R., E. Beaulieu et F. Berninger. Outils pour l'aménagement des plantations de pin gris. Affiche présentée au colloque du CEF. En ligne : <http://www.cef-cfr.ca/uploads/Colloque/SchneiderRobert.pdf>
- Smith, D.M., B.C. Larson, M.J. Kelty et P.M.S. Ashton. 1997. The practice of silviculture. Applied forest ecology, 9th ed., John Wiley & Sons, New York, NY, 537 p.
- Thiffault, N., G. Cyr, G. Prégent, R. Jobidon et L. Charrette. 2004. Régénération artificielle des pessières noires à éricacées : effets du scarifiage, de la fertilisation et du type de plants après 10 ans. For. Chron. 80 (1) : 141-149.
- Thiffault, N., B.D. Titus et M.T. Moroni. 2010. Silviculture and planted species interact to influence reforestation success on Kalmia-dominated site – a 15-year study. For. Chron. 86 (2): 234-242.
- Tong, Q.-J., R.L. Flemming, F. Tanguay et S.Y. Zhang. 2009. Wood and lumber properties from unthinned and precommercially thinned black spruce plantations. Wood and Fiber Science 41(2): 168-179.

- Tremblay, M. 2009. Ensemencement naturel des pessières à lichens par l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) : importance de la source de semences et de la qualité des lits de germination. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi. 54 p.
- Tremblay, S. 2005. Les projets de recherche et la mesure des effets réels réalisés sur les coupes de régénération et l'éclaircie précommerciale : des travaux qui vieillissent bien. Présentation Power Point dans le cadre d'un colloque sur la régénération tenu à Rouyn le 31 octobre 2005. En ligne :
<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/colloque/regeneration/documents/tremblay.pdf>
- Villeneuve, D. 2009. Pourquoi aménager votre forêt? Présentation dans le cadre des soirées conférences dispensées par le syndicat des propriétaires forestiers de la région de Québec. En ligne :
http://www.spfrq.qc.ca/Services/Information_Developpement/Presentation_soiree_confere_nce.pdf
- Welke, S. et J. Fyles. 2005. De l'importance de la texture : le compactage des sols en forêt boréale. RGDF, Note de recherche No 11. 4 p. En ligne :
http://www.ales.ualberta.ca/forestry/SFMN-fr/Publications/~/_media/University%20of%20Alberta/Faculties/ALES/Departments/Forestry/Department%20Site/Reseau%20de%20Gestion%20Durable/Documents/SFMN-fr/Reserach_Notes/RN_Fr11_CompactionAndTexture.ashx
- Yang, K. C. et G. Hazenberg. 1993. Impact on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in *Picea mariana*. Can. J. For. Res. 24: 996-1007.
- Zhang, S.Y., G. Chauret, Q.R. Haiqing et R. Desjardins. 2002. Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. Wood and fiber science. 34 (3): 460-475.
- Zhang, S.Y., G. Chauret, D.E. Swift, et I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. Can. J. For. Res. 36: 945-952.
- Zhang, T., G. Chauret, I. Duchesne, et R. Schneider. Maximisation de la valeur du pin gris. Fiche technique. Partenariat innovation forêt. 4 p. En ligne :
<http://www.partenariat.qc.ca/pdf2/OT-02.pdf>

ANNEXE 1. SCÉNARIOS DÉTAILLÉS

ANNEXE 2. SCÉNARIOS RÉSUMÉS À L'INTENTION DES PROPRIÉTAIRES

Production résineuse (SEPM)

| Stade de développement | Âge | Scénarios sylvicoles pour production SEPM | | | |
|--|-------|--|--|---|--|
| | | Ultra-intensif en plantations résineuses | Intensif en plantations résineuses | Intensif en forêt résineuse naturelle | Extensif en forêt résineuse naturelle |
| Objectifs de production | | Très gros et gros sciages de qualité supérieure | Gros et moyens sciages | Petits à moyens sciages incluant proportion modérée de bois MSR | Petits sciages incluant proportion modérée à élevée de bois MSR |
| Régénération (Hauteur < 1,3 m) | -1 | Scarifiage | Scarifiage | | |
| | 0 | Plantation | Plantation | Naturelle | Naturelle |
| | 2-3 | Regarni DEG | Regarni DEG | Regarni DEG | Regarni DEG |
| Gaulis (de 1.3 m de hauteur à 9 cm au DHP) | 3-20 | DEG | DEG | DEG | DEG |
| | | Régime d'éclaircies légères et fréquentes + élagages | | Régime d'éclaircies légères à modérées | |
| Perchis (DHP : 9,1 – 16 cm) | 20-50 | | 1 ou 2 EC modérées + élagages sur bonne station uniquement | | Laisser pousser |
| Mûr (selon âge de maturité technique) | 50-80 | 1) Allongement de la révolution (poursuite des EC) 2) Coupe de régénération : 2.1) Cprog 2.2) CT-PL | CT-PL | 1) Allongement de la révolution (poursuite des EC ou début de Cprog) 2) Coupe de régénération : 2.1) CPRS + REG 2.2) Cprog | 1) Allongement de la révolution 2) Coupe de régénération : 2.1) CPRS + REG 2.2) Cprog |
| Révolution allongée (au-delà de la maturité technique) | >80 | Coupe de régénération : 1) CPRS 2) CT-PL | | Coupe de régénération : 1) Cprog 2) CPRS + REG 3) CT-PL | Coupe de régénération : 1) Cprog 2) CPRS + REG 3) CT-PL |

- Les chiffres suivis d'une parenthèse représentent différentes options
- Le choix de l'option de coupe de régénération dépend de la régénération préétablie présente
- Les traitements de regarni et de dégagement s'effectuent au besoin
- Les âges fournis ont un caractère indicatif; l'âge à maturité dépend de la station, de la proportion d'espèces longévives et de l'origine (régénération naturelle ou plantée)

CT : Coupe totale
 CPRS : Coupes avec protection de la régénération et des sols
 Cprog : Coupes progressives
 SCA : Scarifiage
 PL : Plantation
 DEG : Dégagement/nettoisement
 EC : Éclaircie

Production mixte (SEPM-FI)

| Stade de développement | Âge | Scénario sylvicole pour production mixte (SEPM-FI) | |
|---|-------|--|--|
| | | Intensif en forêt mixte | |
| Objectifs de production | | Moyens et gros sciages incluant proportion modérée de bois MSR | |
| Régénération (Hauteur < 1,3 m) | 0-3 | Naturelle ou partiellement artificielle | |
| Gaulis (de 1.3 m de hauteur à 9 cm au DHP) | 3-15 | Dégagement/puits des conifères | |
| Perchis (DHP : 9,1 – 16 cm) | 15-50 | Coupe de succession par éclaircies légères à modérées visant à dégager le résineux | |
| Mûr (selon âge de maturité technique) | 50-70 | 1) Allongement de la révolution 2) Coupe de régénération : 2.1) Cprog 2.2) CT-PL 2.3) CPRS (pour production mixte ou feuillue) | |
| Révolution allongée (au-delà de la maturité technique) | > 70 | Coupe de régénération : 1) Cprog 2) CPRS 3) CT-PL | |

- Les chiffres suivis d'une parenthèse représentent différentes options
- Le choix de l'option de coupe de régénération dépend de la régénération préalable présente
- Les âges fournis ont un caractère indicatif; l'âge à maturité dépend de la station et de la proportion d'espèces longévives

CT : Coupe totale
 CPRS : Coupes avec protection de la régénération et des sols
 Cprog : Coupes progressives
 PL : Plantation

Production de peupliers (PEU)

| Stade de développement | Âge | Scénarios sylvicoles pour production de peupliers (PEU) | | |
|--|-------|---|---|---|
| | | Intensif pour déroulage et sciage à partir de PET | Extensif pour fibre à partir de PEB ou PET | Intensif pour bois d'œuvre et fibre à partir de PEH |
| Objectifs de production | | Déroulage, gros et moyens sciages | Petits sciages et bois à pâte | Déroulage?, gros et moyens sciages et bois à pâte |
| Régénération (Hauteur < 1,3 m) | -1 | | | Scarifiage |
| | 0 | Naturelle | Naturelle | Plantation |
| | 1-3 | | | Désherbage |
| Gaulis (de 1.3 m de hauteur à 9 cm au DHP) | 1-10 | | | Taille de formation + élagages (1 à 4 au total) + dépressage* |
| Perchis (DHP : 9,1 – 23 cm) | 10-40 | Régime d'éclaircies modérées | Laisser pousser | Taille de formation + élagages (suite) + éclaircies* |
| Mûr (selon âge de maturité technique) | 40-60 | Coupe de régénération : 1) Cprog pour production SEPM 2) CT pour production PEU | Coupe de régénération : 1) Cprog pour production SEPM 2) CT pour production PEU | Coupe de régénération : CT |

- Les chiffres suivis d'une parenthèse représentent différentes options
- Le choix de l'option de coupe de régénération dépend de la régénération préétablie présente
- Les âges fournis ont un caractère indicatif; l'âge à maturité dépend de la station et de l'espèce de peuplier
- Production PEH : Les traitements de taille de formation et élagage doivent être décalés par rapport aux éclaircies

CT : Coupe totale
 Cprog : Coupes progressives
 SCA : Scarifiage
 PL : Plantation
 EC : Éclaircie