

**APPLICATION D'UNE SYLVICULTURE À FAIBLE IMPACT, DE
FAIBLE INTENSITÉ ET AXÉE SUR LA QUALITÉ (SAFIQ)**

Rapport Final

présenté au
Comité ACCORD sur la production et la transformation du bois de
type feuillu



Ministère du Développement de l'Innovation et de l'Exportation
(MDEIE)



Août 2012



Institut québécois d'Aménagement
de la Forêt feuillue



ISFORT
Institut des Sciences
de la Forêt tempérée

Équipe de réalisation de l'IQAFF*

Coordonnateurs scientifiques et de rédaction :

Philippe Nolet

Pascal Rochon

Yves-Régis Pouliot

*IQAFF : Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue

58 Principale, Ripon, Québec, J0V 1V0

Tél : 819-983-6589 ; Fax : 819-983-6588

Courriel : igaff@iqaff.qc.ca

Site internet : www.iqaff.qc.ca

Pour citation :

Nolet, P., Rochon, P. et Pouliot, R. 2012. Application d'une sylviculture à faible intensité, à faible impact et axée sur la qualité (SAFIQ). Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. Rapport Final. 34 p.

Remerciements

Ce projet a été rendu possible grâce, en partie, à une subvention du programme ACCORD du MDEIE. Par ailleurs, nous tenons à remercier sincèrement Pierre Roy de l'entreprise Portable Winch qui nous a été d'une aide considérable dans le développement du projet de tyrolienne. Nous tenons aussi à remercier Serge Raposo de Gestion forestière Dryade pour l'ensemble des travaux auxquels il a participé dans ce projet (inventaire, martelage, abattage, transport, etc.).

Table des matières

Équipe de réalisation de l'IQAFF*	2
Remerciements	3
Table des matières	4
Liste des tableaux	5
Liste des figures	6
Résumé	7
Introduction.....	8
But	9
Une nouvelle approche	10
Les modalités d'une sylviculture à faible impact, de faible intensité et axée sur la qualité	11
Cadre d'application de l'approche	12
Méthodologie	13
Inventaire	13
Choix des tiges à marteler pour un rendement soutenu	14
Martelage et abattage des tiges.....	15
Récolte.....	16
Le treuil portable mécanique	16
La tyrolienne.....	16
Résultats et discussion	22
Démonstration du rendement soutenu	22
Analyse économique	26
Analyse écologique.....	28
Services écologiques.....	29
Conclusion	31
Références	32

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple de séquence optimisée de martelage	15
Tableau 2 : Évolution de la surface terrière et du diamètre moyen pré-traitement et récoltés selon des scénarios de récolte à rendement soutenu adaptés à chacun des peuplements.....	24
Tableau 3 : Volumes et valeur des bois récoltés	28
Tableau 4 : Rentabilité du projet	28
Tableau 5 : Productivité recherchée	28

Liste des figures

Figure 1 : Treuil mécanique portable	17
Figure 2 : Illustration de l'utilisation de la tyrolienne pour extraire les billors du peuplement forestier.	17
Figure 3 : Structure en diamètre et surface terrière des peuplements échantillonnés.....	23
Figure 4 : Différents scénarios de récolte pour le peuplement no 2. À gauche : L'évolution des récolte et des caractéristiques des peuplements; à droite : les scénarios de martelage correspondants.....	25
Figure 5 : Comparaison visuelle de l'impact au sol de la méthode conventionnelle (a) et de la méthode par tyrolienne (b).	30

Résumé

En raison de coupes abusives passées, les peuplements de feuillus tolérants que l'on désire aujourd'hui traiter par coupe de jardinage présentent souvent de faibles proportions de tiges de qualité. Afin d'améliorer la qualité de ces peuplements, on préconise souvent la coupe de jardinage avec assainissement. Après plusieurs années d'utilisation, on observe que la coupe de jardinage avec assainissement 1) n'est pratiquement jamais rentable, 2) offre des rendements incertains et 3) a des impacts écologiques non-négligeables. Dans le cadre de ce rapport, nous présentons une nouvelle approche qui vise une récolte de faible intensité, des tiges de qualité exclusivement, et ce, à rendement soutenu. Cette approche vise aussi à diminuer les impacts écologiques observés suite à la coupe de jardinage. C'est donc une sylviculture à faible intensité, à faible impact et axée sur la qualité (SAFIQ). Après avoir défini les grands principes de l'approche, nous présentons les résultats de sa mise en place dans 4 peuplements (1 ha chacun). Nos résultats démontrent qu'il est possible de procéder à une récolte de faible intensité uniquement sur des tiges de qualité à rendement soutenu. La fenêtre de possibilité ne semble pas si étroite, car on a pu appliquer l'approche à des peuplements ayant des caractéristiques dendrométriques très différentes et de plus, pour chacun des peuplements, on a pu trouver des scénarios de martelage assez différents les uns des autres et qui permettent une récolte à rendement soutenu. L'étude tend aussi à démontrer qu'avec des innovations, la sylviculture de faible intensité pourra aussi être à faible impact, et que cette sylviculture pourra être économiquement rentable. Nous avons d'ailleurs identifié de nombreuses améliorations à apporter à la méthode de débardage à faible impact (tyrolienne) pour que cette méthode soit utilisée de façon rentable. Axer la récolte sur les tiges de qualité (dans une optique de rendement soutenu) et « démécaniser » la récolte constituent, en quelque sorte, des idées à contre-courant. Nous croyons toutefois avoir démontré que les idées proposées dans cette étude méritent qu'on les développe davantage. Il sera important d'identifier dans quels types de sites et de peuplements on peut les utiliser et d'évaluer, à l'échelle de l'aménagement, comment ces idées peuvent contribuer à la conciliation des enjeux écologiques, économiques et sociaux.

Introduction

Dans les peuplements dominés par l'érable à sucre au Québec, on utilise depuis les années 1990 la coupe de jardinage et ses variantes comme principal traitement sylvicole. Ce traitement est préconisé, car il permet, entre autres, de maintenir un couvert permanent, de produire de grosses tiges de qualité et de profiter de la régénération préétablie. Auparavant et pendant plusieurs décennies, il n'y avait pas vraiment de sylviculture dans les forêts feuillues du Québec : on récoltait par coupe d'écémage ou par coupe à diamètre limite sans souci de rendement soutenu. Cette période de coupes que l'on qualifie aujourd'hui d'abusives a mené à une dégradation, principalement en qualité, de la grande majorité des peuplements traités. Dans ce contexte, les peuplements que l'on désire aujourd'hui traiter par coupe de jardinage présentent souvent de faibles proportions de tiges de qualité, et il devient alors nécessaire d'ajouter un objectif d'assainissement à la coupe de jardinage traditionnelle. On parle alors de coupe de jardinage avec assainissement.

Au point de vue des rendements, les coupes de jardinage menées de façon industrielle offrent des rendements mitigés. Parfois, les rendements se rapprochent de ceux prédits par Majcen *et al.* comme le démontrent les travaux de (Forget *et al.* 2007) et de (Nolet *et al.* 2010). Parfois, les résultats sont bien en deçà des rendements espérés (Bédard S. & Brassard 2002; Bédard *et al.* 2004; Labrecque *et al.* 2006; Nolet *et al.* 2007; Nolet *et al.* 2007). Il est possible que les rendements décevants parfois recensés soient dus à une mauvaise sélection des tiges, mais ça ne semble pas être la seule cause (Nolet *et al.* 2007). Du point de vue économique, la coupe de jardinage avec assainissement présente des défis énormes, car elle implique une récolte d'une grande proportion de tiges de faible qualité et donc de faible valeur. Il n'est pas rare qu'il n'y ait même pas de preneur pour ces tiges de faible valeur, ce qui rend le traitement quasiment impossible à réaliser. Du point de vue écologique, la coupe de jardinage a longtemps été vue comme étant une panacée; plusieurs études apportent des bémols importants. En effet, on assiste après la coupe de jardinage (avec ou sans assainissement) à l'altération i) d'habitats fauniques (Doyon *et al.* 2005), ii) de la structure des peuplements (Angers *et al.* 2005) et iii) du régime hydrique qui mènent à des changements dans la composition floristique des peuplements ((Buckley *et al.* 2003)).

On pourrait donc dire de la coupe de jardinage avec assainissement qu'elle n'est pratiquement jamais rentable, qu'elle offre des rendements incertains et qu'elle a des impacts écologiques

non-négligeables. De toute évidence, de nouvelles approches sylvicoles adaptées à nos peuplements feuillus doivent être développées. Dans le cadre de ce rapport, nous présentons les premiers résultats de l'application d'une nouvelle approche qui vise une récolte de faible intensité, des tiges de qualité exclusivement, et ce à rendement soutenu. Cette approche vise aussi à diminuer les impacts écologiques observés suite à la coupe de jardinage. C'est donc une sylviculture à faible intensité, à faible impact et axée sur la qualité (SAFIQ).

But

Le but général de ce projet est de développer une approche sylvicole de faible intensité basée exclusivement sur la récolte en tiges de qualité, à rendement soutenu, plus rentable que l'approche traditionnelle (coupe de jardinage avec assainissement) et qui en diminue les impacts négatifs potentiels. Les objectifs spécifiques sont :

1. Décrire les principes qui sous-tendent la nouvelle approche proposée;
2. Quantifier la quantité de tiges de qualité qui peuvent être récoltées à rendement soutenu;
3. Développer des modes de récoltes moins dommageables pour l'écosystème que ceux normalement utilisés;
4. Évaluer le potentiel de rentabilité de ces nouveaux modes de récolte;
5. Quantifier dans quelle mesure ces nouveaux modes de récoltes diminuent les impacts sur l'écosystème.

Dans le cadre du présent rapport, nous nous concentrons sur les 4 premiers objectifs; le cinquième objectif sera évalué dans le cadre d'un suivi à plus long terme.

Une nouvelle approche

Lors d'une coupe de jardinage ou d'une coupe de jardinage avec assainissement, on récolte généralement en proportion variable des bois de trituration et du bois d'œuvre (sciage et déroulage). Généralement, le bois d'œuvre a une valeur beaucoup plus grande que le bois de trituration, bien que cette différence de valeur varie en fonction des marchés et des produits spécifiques. On considère généralement qu'il est possible de faire du jardinage en forêt feuillue en raison de la valeur du bois d'œuvre. Le bois de trituration à lui seul ne permet pas d'assumer les coûts relatifs au traitement, mais il permet d'éponger les coûts d'infrastructures (chemins et ponceaux) et de planification (inventaires et martelage) nécessaires aussi au transport du bois d'œuvre. On peut donc dire que les deux «secteurs» ont besoin l'un de l'autre et qu'ils se complètent. Il demeure que la coupe de jardinage, particulièrement avec assainissement, de laquelle provient une grande proportion de bois de trituration n'est rendue possible que par le biais de crédits sylvicoles qui visent à améliorer la vigueur des forêts résiduelles. Ainsi, l'industrie du bois d'œuvre feuillu, vu l'aménagement de la forêt feuillue par coupe de jardinage avec assainissement, est dépendante de la présence d'une industrie des bois de trituration et de l'apport de crédits sylvicoles de la part de l'État.

Or, dans plusieurs régions du Québec, il n'y a pas de preneur pour les bois de trituration. De plus, il n'est pas évident que l'État, dans un contexte budgétaire difficile, pourra intervenir continuellement pour améliorer la qualité des forêts. Au niveau économique, l'approche que nous proposons s'inscrit dans une telle perspective : absence de preneur pour les bois de trituration et/ou manque de ressource de l'État pour investir dans l'amélioration des (de tous les) peuplements feuillus. **Ainsi, dans un contexte où il est économiquement extrêmement difficile d'améliorer la qualité des peuplements, est-il possible de développer une approche qui permette la récolte de bois d'œuvre à rendement soutenu, en visant le maintien de la qualité des peuplements au lieu de leur amélioration ?** Autrement dit, au lieu de laisser aux générations futures des peuplements améliorés, on lègue des peuplements tels que nous en avons hérité, avec les mêmes opportunités économiques.

Par ailleurs, la coupe de jardinage a longtemps été perçue comme une panacée au niveau écologique, et ce, probablement parce qu'on la comparait alors à des coupes abusives. Toutefois, les études qui comparent les peuplements traités par coupe de jardinage à des peuplements non-traités ou des forêts anciennes démontrent qu'il y a des différences

marquantes entre des forêts jardinées et des forêts non-aménagées ((Buckley et al. 2003), (Doyon et al. 2005), (Angers et al. 2005)). Les plus notables sont probablement : l'abondance de chicots et de gros débris ligneux, le développement d'une abondante strate arbustive après coupe de jardinage et les effets des sentiers de débusquage sur le régime hydrique des peuplements. Les effets de ces impacts écologiques sur le fonctionnement des peuplements feuillus restent toutefois à préciser. Dépassons-nous des seuils écologiques importants ? L'étude des seuils écologiques est une science extrêmement complexe (Huggett 2005) et l'histoire nous apprend que nous ne sommes jamais à l'abri de surprises quant aux effets de nos interventions sur les écosystèmes ((Doak et al. 2008)). Dans un tel contexte, il semble judicieux d'opter pour une approche qui minimise les impacts sur l'écosystème. **Est-il possible de développer une approche sylvicole qui, en axant la récolte sur les tiges de bois d'œuvre et en augmentant les marges de profits sur les tiges récoltées, permet l'utilisation de procédés de récolte plus légers (moins performant économiquement) qui minimisent les impacts écologiques de la récolte ?** En d'autres mots, au lieu de perdre de l'argent à récolter des tiges de faible valeur, on pourrait peut-être envisager d'utiliser cet argent pour réduire les impacts des interventions sylvicoles.

Les modalités d'une sylviculture à faible impact, de faible intensité et axée sur la qualité

1. On vise un faible prélèvement de la surface terrière (ex. : 5 à 10% contrairement à 30% pour la coupe de jardinage) de façon à reproduire plus fidèlement le régime des perturbations naturelles de la forêt feuillue. *Nous croyons qu'avec une plus faible intensité, les impacts sur la structure de la forêt, en particulier, seront grandement diminués.*
2. On vise un prélèvement concentré sur des tiges de haute valeur et dont préférablement la valeur est en stagnation ou en baisse. *En évitant la récolte de tiges non-rentables, cela permet des économies pouvant profiter ailleurs (protection de l'écosystème, mise en place de la régénération, éducation des tiges, etc.).*
3. On vise un rendement soutenu par lequel la récolte en tiges de qualité dans un peuplement ne dépasse pas la capacité de ce peuplement à produire des tiges de qualité (l'accroissement en qualité). On s'assure de cela en procédant à un inventaire spécifique des tiges de qualité et de leur potentiel de croissance. Aussi, des traitements d'éducation sont prévus pour assurer un recrutement en qualité.

4. On vise un assainissement graduel des peuplements en laissant mourir naturellement les arbres de faible valeur économique, ce qui leur laisse produire leurs services écologiques en tant que futurs chicots, débris ligneux et puits de carbone. Pour les tiges de faible valeur qui gênent trop la croissance de tiges de haute valeur, on peut envisager un annelage.
5. On vise un effet minimal sur l'écosystème, en évitant particulièrement les effets indésirables des chemins de débusquage sur les propriétés du sol et le ruissellement.

Cadre d'application de l'approche

D'entrée de jeu, nous savons que l'approche que nous proposons ne peut être utilisée sur la majeure partie du territoire, car elle ne permet pas d'absorber la construction de chemins et de ponceaux, entre autres. C'est une approche qui serait davantage applicable pour des peuplements accessibles par des chemins déjà construits et en relativement bon état. Nous croyons que l'approche a un potentiel particulièrement intéressant pour les milieux plus sensibles au niveau écologique ou pour préserver les caractéristiques de peuplements à haute valeur écologique (mais qui n'auraient pas de statut particulier) ou encore dans des milieux plus sensibles socialement (par exemple dans les zones de villégiature, ou en forêt privée).

Méthodologie

Inventaire

Dans le cadre du présent projet, nous avons complémenté un dispositif mis en place par l'IQAFF visant à mesurer les effets écologiques de différentes modalités de récolte de biomasse forestière (Nolet et al. 2012). Dans le cadre de ce projet, quatre peuplements forestiers dominés par l'érable à sucre et co-dominés par le bouleau jaune seront choisis dans la Réserve faunique de Papineau-Labelle. Dans chacun de ces quatre peuplements, 4 modalités de récolte de la biomasse forestière ont été testées. Nous en avons ajouté une cinquième, la SAFIQ. En couplant ce projet à celui sur la biomasse forestière, cela nous permettra de comparer à long terme les impacts écologiques (Nolet et al. 2012) de la SAFIQ à des peuplements témoins et des traitements jardinés. Ainsi, 4 blocs de 1 ha ont été traités avec l'approche SAFIQ dans le cadre du présent projet.

Dans les parcelles traitées par la SAFIQ, toutes les tiges (> 5m su DHP) avec un potentiel de qualité de tige bois d'œuvre ont été inventoriées. Afin de caractériser la croissance de l'érable à sucre et du bouleau jaune dans chacun des blocs traités, des carottes ont au DHP ont été récoltées sur 2 tiges/essence/bloc/classe de DHP; les classes de DHP étaient les suivantes : 5-15 cm; 15-25 cm; 25-35 cm et > 35 cm. Ainsi, un total 64 tiges ont été échantillonnées. Les carottes ainsi récoltées ont par la suite été sablées puis lues au binoculaire afin d'établir la croissance diamétrale des tiges au cours des 10 dernières années.

Choix des tiges à marteler pour un rendement soutenu

Afin de nous assurer d'obtenir un ou des scénarios de martelage qui permette un rendement soutenu en qualité, il faut s'assurer que la valeur de la récolte faite aujourd'hui permette la même valeur de récolte lors des prochains passages. Par exemple, si nous récoltons $1,5 \text{ m}^2/\text{ha}$ dans un peuplement aujourd'hui en tiges avec un DHP moyen de 35 cm, il faut s'assurer que l'on puisse procéder à une récolte semblable lors des prochains passages. Ainsi, une tige récoltée aujourd'hui affectera ce qui pourra être récolté lors des prochains passages. Déterminer le nombre de tiges à récolter et les sélectionner devient donc un problème complexe.

Afin de résoudre ce problème, nous avons utilisé une approche par optimisation (algorithme génétique). Nous avons ainsi bâti un outil d'optimisation (algorithme génétique, langage Python) qui vérifie, pour chaque bloc échantillonné, quelles tiges peuvent être récoltées à chaque passage, et ce, en tenant compte de l'accroissement des tiges. Plus spécifiquement, nous avons bâti l'outil de façon à ce que :

- 1) La surface terrière en qualité récoltée à chaque passage (temps 0, 10, 20 et 30 ans) soit semblable;
- 2) Le DHP moyen récolté à chaque passage soit semblable et
- 3) Que la surface terrière en qualité au bout de 40 ans soit semblable à la surface terrière initiale en qualité.

De cette façon, nous nous assurons d'avoir des récoltes semblables à chaque passage en plus de nous assurer qu'au bout de 40 ans, le peuplement aura toujours le même potentiel en tiges de qualité qu'il a présentement.

L'outil d'optimisation est ainsi basé sur un module d'accroissement des tiges très simple qui ne fait croître que les tiges de qualité; les autres tiges n'étant pas du tout considérées dans le module d'accroissement. Ce module établit la croissance d'une tige donnée en fonction de la valeur moyenne de croissance par essence/bloc/classe de DHP, tel qu'établie à la section précédente. Cette croissance est considérée stable tout au long de la période (40 ans) et on ne considère aucun effet traitement, ni de fermeture du couvert sur la croissance moyenne des tiges. Aussi, nous n'avons considéré aucune mortalité dans les tiges de qualité dans les 40 prochaines années; cela s'explique par le fait que les tiges de qualité non-vigoureuses devraient être récoltées dans les premiers passages. Comme la simulation ne se fait que sur 40 ans et qu'il

n'est possible de récolter que des tiges de 24 cm et plus, il n'était pas essentiel d'inclure un recrutement en petites tiges de qualité (< 5 cm de DHP).

L'algorithme d'optimisation que nous avons choisi, l'algorithme génétique, en est un de quasi-optimisation; c'est-à dire qu'il ne fonctionne pas par résolution mathématique, mais par un procédé d'essai-erreur. Il en résulte que le résultat de l'optimisation n'est pas nécessairement le résultat le plus optimal, mais qu'il est parmi les plus optimaux. Dans notre cas, le résultat de l'optimisation est la séquence de martelage des arbres de la base de données : des arbres seront martelés à l'année 0, d'autres à l'année 10, d'autres à l'année 20, d'autres à l'année 30 et enfin, d'autres ne seront pas martelés au cours des 4 premiers passages. Il est possible de répéter la procédure d'optimisation qui, elle, donnera une nouvelle séquence optimisée d'arbre à marteler. Pour chaque bloc, nous avons procédé à au moins 20 optimisations, menant à 20 différentes séquences optimisées de martelage (voir l'exemple à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 1 : Exemple de séquence optimisée de martelage

Essence	Année de récolte	Classe de DHP								
		25	30	35	40	45	50	55	60	65
BOJ	1				1					
	2	1	3	2		1	1			
	3	1		1		1				
	4			2		1				
CET	1									
	2		1							
	3		2							
	4		3		1					
ERS	1	1	6	2	3	2				
	2		3	1	2					
	3		3	5	2	1				
	4	2	1	4						
THO	1	1								
	2									
	3									
	4							1		

Martelage et abattage des tiges

Parmi les 20 différentes séquences optimisées de martelage, nous devons en choisir une. Ce choix a été fait selon 2 principaux critères. D'abord, nous avons préféré les scénarios qui impliquaient la récolte de tiges en bas de 45 cm de DHP dans la première séquence de

martelage (année 0), car plus les billots sont lourds, plus ils sont difficiles à soulever sur la tyrolienne et à déplacer sur celle-ci. Comme nous sommes dans la phase de développement de cette méthodologie, nous ne voulions pas commencer par les billots les plus difficiles (lourds). Par la suite, sur le terrain, le bûcheron tentait d'identifier un scénario permettant de limiter les distances des billots à la ligne de tyrolienne.

Récolte

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé 2 méthodes de récolte, les deux méthodes ayant pour objectif de minimiser les impacts sur l'écosystème et l'utilisation d'énergie fossiles, et d'éviter le transport de machinerie lourde dans les peuplements. Ces deux méthodes sont : l'utilisation d'un treuil mécanique portable et l'utilisation d'une tyrolienne. Nous décrivons plus en détails les deux méthodes dans les sections qui suivent. D'entrée de jeu, mentionnons que la méthode avec le treuil est beaucoup plus simple d'application que la tyrolienne. Elle nécessite toutefois davantage d'énergie fossile et crée plus de perturbations au sol que la tyrolienne. Les deux procédés ont été utilisés en fonction des difficultés rencontrées sur le terrain. Le procédé avec la tyrolienne requiert encore beaucoup de développement. Aussi, bien que nous ayons utilisé ces deux méthodes et que nous les décrivions, cela n'exclue pas la possibilité d'autres méthodes pour rencontrer les objectifs visés.

Le treuil portable mécanique

Le treuil portable mécanique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, www.portablewinch.com) est un outil qui permet de tirer de lourdes charges sur de longues distances. Il suffit d'attacher solidement le treuil à une base (au pied d'un arbre par exemple), d'attacher un câble solidement à une charge (billot dans notre cas) et d'enrouler l'autre bout du câble au tambour du treuil. La distance de déplacement dépend de la longueur du câble dont on dispose. Quand il désire tirer un billot, un premier technicien doit demeurer au côté du treuil pour exercer une tension sur le câble enroulé au tambour. Une seconde personne doit suivre le billot pour faire en sorte que celui-ci évite des obstacles qui l'empêcheraient de se déplacer.

La tyrolienne

L'idée d'utiliser le principe de la tyrolienne pour extraire des arbres de la forêt n'est pas nouvelle. Elle est habituellement utilisée dans des endroits très montagneux où les arbres ont une très grande valeur. C'est une approche qui demande généralement une technologie

hautement sophistiquée et un appareillage considérable (voir, par exemple, le site de Skyline Solutions : <http://www.skylinesolutions.us/index.asp>). Dans le cadre de ce projet, nous avons mis l'accent sur le développement d'une approche par tyrolienne qui demande un appareillage très modeste n'impliquant que quelques milliers de dollars d'investissement.



Figure 1 : Treuil mécanique portable



Figure 2 : Illustration de l'utilisation de la tyrolienne pour extraire les billots du peuplement forestier.

Le principe de l'utilisation de la tyrolienne est illustré, tel que nous l'avons utilisé, à la Figure 2. L'idée derrière l'utilisation de la tyrolienne est qu'en soulevant au départ le billot sur la tyrolienne, on retire une grande partie du poids de celui-ci pour son transport subséquent. Ce faisant, on économise énormément d'énergie, en plus de limiter les impacts au sol. La ligne de la tyrolienne doit être orientée de façon à se rendre le plus près possible du chemin forestier par lequel le bois sera transporté à l'usine. Il faut aussi trouver deux arbres d'ancrage de fort diamètre et vigoureux à chaque extrémité de la tyrolienne afin d'y tendre le câble de la tyrolienne. Idéalement, ont été choisis. Ces arbres se situent aux extrémités de l'axe de sortie. C'est-à-dire, à chaque bout de la tyrolienne permettant ainsi, la fixation du câble. Il est également souhaitable que l'axe, qui sera utilisé pour l'installation de la tyrolienne, tienne compte d'une pente naturelle descendante favorisant le transport des billots sur le câble.

Quant à la tyrolienne elle-même, nous avons utilisé un câble synthétique Spectra de 9,5 mm de diamètre. C'est un câble qui, en plus d'être très léger, permet l'application d'une très grande tension (plus de 2000 kg). La mise en tension du câble est une étape complexe que nous ne décrirons pas en détail ici, car nous n'avons pas développé à ce jour une façon de faire qui s'adapte à toutes les situations.

Lors de la récolte des arbres martelés, le technicien fera de son mieux pour orienter les tiges de manière à faciliter leur approche vers la tyrolienne. Cette approche se fait à l'aide du treuil mécanique portable. L'étape suivante consiste à soulever le billot sur la tyrolienne. Dans cette manœuvre, l'utilisation d'outils de levage est nécessaire. Il est possible d'effectuer cette tâche avec des poulies autobloquantes, méthode plus rapide, plus exigeante physiquement et moins sécuritaire que des treuils manuels à engrenages. Dans le présent projet, nous avons effectué la première partie du travail avec les poulies pour finalement terminer avec les treuils.

Le principe du levage s'opère en utilisant des chaines aux extrémités des billes. Ces dernières sont reliées aux poulies par cordes ou aux treuils par chaîne. Dans les deux cas, des crochets avec clapets de sécurité sont utilisés. Par la suite, le billot est élevé

dans les airs jusqu'à une hauteur désirée, permettant ainsi son transport jusqu'à destination. Le déplacement de l'arbre sur le câble est réalisé avec des petits chariots à poulies. Si la pente permet à la bûche de se déplacer toute seule, le technicien suivra derrière avec une corde attachée à l'arbre pour ralentir la descente si nécessaire. Sinon, le technicien pourra être devant pour tirer sur le billot et ainsi le faire avancer jusqu'à l'arbre d'ancrage.

Dans certains cas, le terrain ne permet pas d'effectuer le transport du bois en un seul jet. Il faut donc utiliser ce que nous avons appelé un pont. Le pont consiste à attacher la tyrolienne à un endroit précis pour surélever la corde. La manière de faire, est de prendre une poulie et la fixer à un arbre près de l'axe, en s'assurant qu'elle est assez haute dans l'arbre pour éviter que le bois transporté ne touche le sol. Cependant, lorsque la bille arrive près du pont, il faut pouvoir faire traverser les chariots de l'autre côté de ce dernier pour permettre à la tige de continuer sa route. Pour ce faire, il faut redescendre le billot sur le sol, détacher les chariots, les remettre de l'autre côté du pont et remonter le tout à une hauteur satisfaisante. L'avantage du pont est de pouvoir transporter le bois sur une plus grande distance.

Voici trois liens vidéo qui expliquent rapidement le fonctionnement de la tyrolienne.

http://www.youtube.com/watch?v=s_avlwbXx6E

<http://www.youtube.com/watch?v=3gFX6ebqGTM>

<http://www.youtube.com/watch?v=bpi7k0w3eSw>

Les améliorations nécessaires à la tyrolienne

La méthode de la tyrolienne requiert plusieurs améliorations pour être optimale tant en termes de productivité que de sécurité. Voici les principales.

1. Développer une méthode rapide et sécuritaire pour tendre le câble de la tyrolienne. Plus le câble est tendu, le moins d'efforts sont nécessaires pour tirer les billes, et plus les billes transportées peuvent être lourdes. En même temps, il est primordial que la mise en tension du câble ne dépasse pas la capacité de tension de celui-ci et des autres composantes du système. Il faut donc développer une façon sûre et rapide de mesurer la tension mise sur le câble, au repos et au travail.
2. Développer une méthode rapide et sécuritaire pour monter et descendre les billots sur le câble de la tyrolienne. Les deux méthodes utilisées dans le cadre du présent projet avaient leurs avantages et inconvénients. Les poulies auto-bloquantes incorporées dans un palan permettent de monter les billots relativement rapidement sur le câble de la tyrolienne; toutefois, ce système est éreintant physiquement, car il demande l'utilisation d'une grande force physique. L'autre méthode utilisée, le palan à chaîne, ne nécessitait que très peu de force physique, mais était très lente. Cette dernière méthode était aussi plus sécuritaire que la précédente, car elle faisait en sorte que la descente des billots se faisait en douceur. Nous envisageons, comme amélioration, l'utilisation d'un palan à chaîne électrique (le problème est l'alimentation) ou encore d'utiliser le treuil mécanique portable, qui sert déjà à déplacer les billots de leur point de départ jusqu'en dessous de la tyrolienne (le problème est alors de redescendre la bille une fois arrivée à destination).
3. Développer une instrumentation qui fait en sorte qu'il est possible d'utiliser la tyrolienne sur de longues distances sans que les billots accrochent le sol et deviennent très difficiles à tirer. Il faut comprendre qu'aussitôt qu'une tension est appliquée sur la tyrolienne, peu importe la tension, la tyrolienne prend la forme d'un « V ». Moins la tension est forte, plus le poids est élevé, et plus on est près du centre de la tyrolienne, plus la pointe du « V » s'approche du sol. Pour éviter que les billots ne touchent le sol, nous avons utilisé, ce que nous appelons, des ponts. Ces ponts maintiennent la tyrolienne à une certaine hauteur. Toutefois, dans le cadre du projet, l'utilisation de ces ponts nécessitait, pour les traverser, que l'on descende et remonte les billots, ce qui était long et fastidieux. En fin de projet, nous avons développé un prototype de pont, inspiré de Skyline Solutions (<http://www.skylinesolutions.us/index.asp>),

qui évitait d'avoir à monter et descendre les billots. Le développement de ce pont, accompagné du développement d'un système de roulement approprié (par poulie), constitueront une avancée majeure en termes d'efficacité du système.

4. Développer une méthode rapide et efficace pour déplacer les billes et le système de roulement de l'amont vers l'aval de la tyrolienne. En principe, une bille installée en amont sur la tyrolienne devrait rouler vers l'aval et le tour serait joué! Or dans le concret, c'est souvent plus complexe. Il peut arriver que la pente de la tyrolienne vers l'aval soit si accentuée que le billot prenne une si grande vitesse (si on le laisse aller) qu'il devient impossible de le freiner. Les risques de bris de matériel à l'arrivée sont alors très élevés. Au contraire, il se peut aussi que la pente de la tyrolienne ne soit pas assez accentuée et que l'on doive tirer le billot. Ainsi, le système doit être élaboré pour permettre de freiner ou tirer les billots selon les situations. De plus, ce système devrait être élaboré de façon à minimiser les temps d'attentes des opérateurs. Par exemple, le temps d'attente de l'opérateur en amont devrait être minimal avant de pouvoir remonter le système de roulement afin de pouvoir y raccrocher une nouvelle bille. Inversement, le temps d'attente pour l'opérateur en aval entre la réception de deux billes devrait être minimisé. C'est donc tout un processus, couplé à de l'instrumentation adéquate, qui doit être optimisé. De plus, ce processus doit être souple afin de s'adapter à une grande variété de situations sur le terrain.

Résultats et discussion

Démonstration du rendement soutenu

Les résultats des inventaires nous montrent que les structures des peuplements en termes de tiges de qualité sont très différentes entre les peuplements échantillonnés (Figure 4). Les peuplements 2 et 4 présentent une grande quantité de petites tiges en qualité alors que les peuplements 1 et 3 semblent souffrir d'un déficit dans ces classes de tiges. Ces mêmes sites présentent également une moins grande surface terrière en tiges de qualité, particulièrement le site 1 avec une surface terrière au bas de 7 m²/ha en tiges de qualité.

Malgré ces diversités de structures, il a été possible pour chacun des peuplements d'établir des scénarios de martelage à rendement soutenu. Dans le cadre de la présente étude, nous considérons qu'un scénario est à rendement soutenu si, après 4 récoltes semblables (en termes de quantité récoltée et de diamètre moyen récolté) espacées de 10 ans chacune, le peuplement est reconstitué en termes de surface terrière et diamètre moyen en qualité. Un exemple de l'évolution des surface terrière et diamètre moyen est fourni pour chacun des sites au Tableau 2. Dans cet exemple, on remarque que, pour un même peuplement, la surface terrière récoltée et le diamètre moyen de récolte varient très peu. Par exemple, la surface terrière récoltée varie d'au plus 0,1 m²/ha. Dans chacun des cas, la surface terrière après 40 ans (et 4 récoltes) est quasiment la même que celle observée initialement. Le diamètre moyen de récolte quant à lui augmente généralement; cela s'explique probablement par le fait que nous n'ayons pas inclus de recrutement de petites tiges dans notre modèle de croissance. L'approche d'optimisation que nous avons utilisée permet d'adapter les scénarios de martelage aux caractéristiques des peuplements. Par exemple, les caractéristiques du site 2 permettent la récolte du double de la surface terrière par rapport à celle que permettent les caractéristiques du site 1. Le diamètre moyen de récolte dans le site 2 est également 4 cm plus élevé que celui du site 1. **Nous constatons donc que l'approche permet une grande souplesse et que cette dernière permet d'adapter les caractéristiques des scénarios de martelage à une grande variété de caractéristiques de peuplements.**

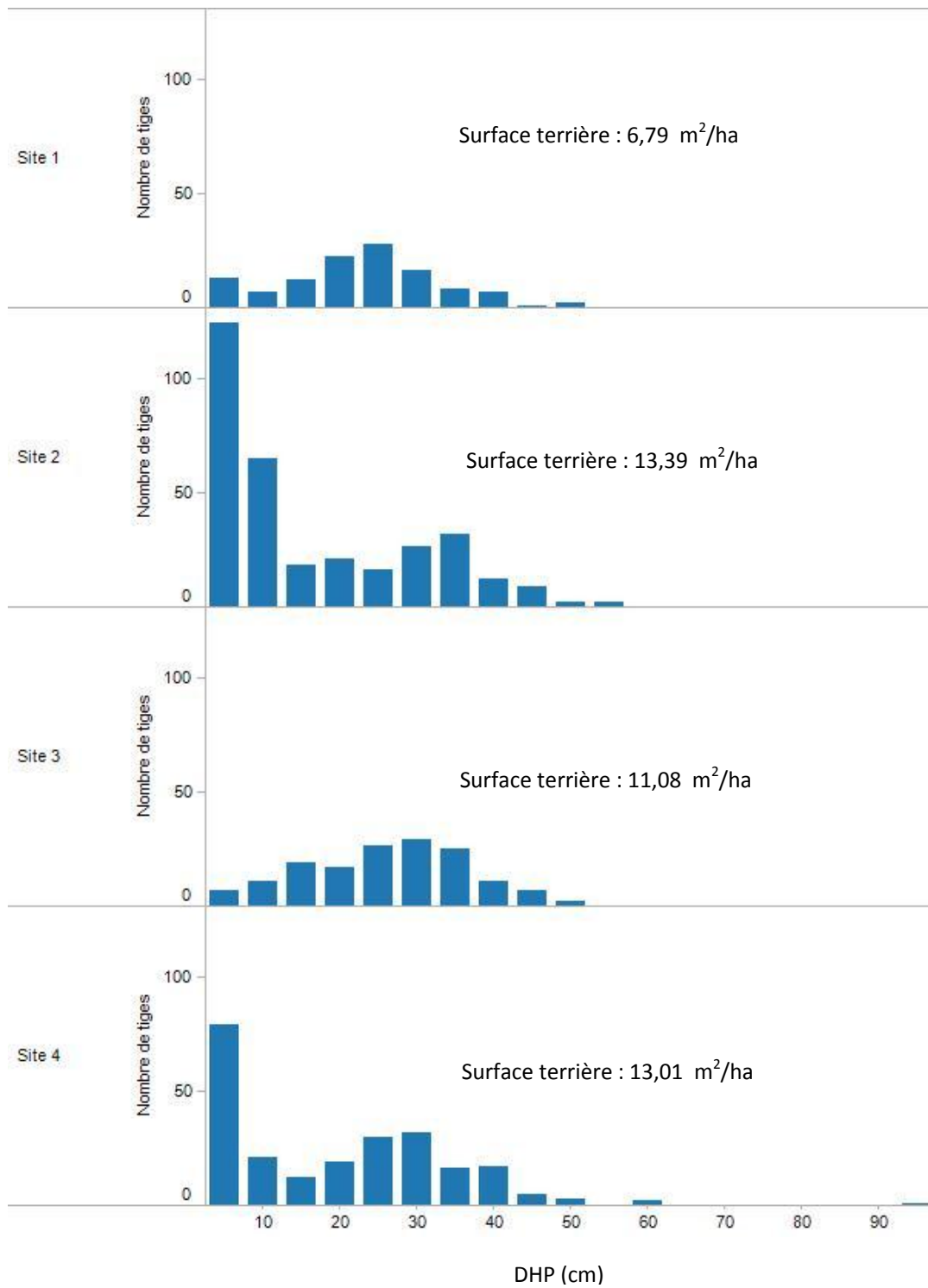


Figure 3 : Structure en diamètre et surface terrière des peuplements échantillonnés.

Tableau 2 : Évolution de la surface terrière et du diamètre moyen pré-traitement et récoltés selon des scénarios de récolte à rendement soutenu adaptés à chacun des peuplements.

	Année	Surface terrière avant récolte (m ² /ha)	Surface terrière récoltée (m ² /ha)	DHP moyen avant récolte (cm)	DHP moyen récolté (cm)
Site 1	0	6.80	0.87	25.26	32.40
	10	6.81	0.84	26.43	32.37
	20	6.81	0.84	27.65	32.40
	30	6.85	0.93	29.07	32.32
	40	6.83		30.73	
Site 2	0	13.39	2.02	18.61	36.18
	10	13.32	1.92	19.56	36.18
	20	13.34	1.96	20.60	36.22
	30	13.29	1.93	21.69	36.17
	40	13.36		22.99	
Site 3	0	11.08	1.68	28.44	34.12
	10	11.31	1.70	30.76	33.97
	20	11.39	1.79	33.28	34.07
	30	11.25	1.75	36.13	34.07
	40	11.09		39.75	
Site 4	0	13.01	1.53	21.97	33.27
	10	13.04	1.50	23.01	33.26
	20	13.03	1.47	24.08	33.29
	30	13.02	1.52	25.27	33.26
	40	13.01		26.58	

Les cas que nous présentons au Tableau 2 ne sont pas uniques, car chaque fois que nous lançons une optimisation, nous obtenons des résultats différents. Nous présentons à la Figure 4, pour le peuplement no 2, quatre exemples de solutions obtenues. Alors que les surface terrières et les DHP moyens récoltés sont très semblables d'une simulation à l'autre (respectivement autour de 2 m²/ha et 37 cm), la répartition des tiges récoltées en fonction de l'essence et de la classe de DHP varie davantage. Voici quelques exemples :

Récolte moyenne et évolution des peuplements					Scénarios de martelage												
Année	Surface terrière avant récolte (m2/ha)	Surface terrière récoltée (m2/ha)	DHP moyen avant récolte (cm)	DHP moyen récolté (cm)	Essence / DHP lors de la coupe												
					BOJ					ERS							
					25	30	35	40	45	25	30	35	40	45	50	55	
0	13.39	2.02	18.61	36.18 \$						4	3	6	2	2			
10	13.32	1.92	19.56	36.18 \$						2	7	3	2	3			
20	13.34	1.96	20.60	36.22 \$													
30	13.29	1.93	21.69	36.17 \$	1	1	1	1		1	1	4	4				
40	13.36		22.99		1					2	3	2	6	2			

Année	Surface terrière avant récolte (m2/ha)	Surface terrière récoltée (m2/ha)	DHP moyen avant récolte (cm)	DHP moyen récolté (cm)	Essence / DHP lors de la coupe												
					BOJ					ERS							
					25	30	35	40	45	25	30	35	40	45	50	55	
0	13.39	1.99	18.61	36.66 \$						5	3	4	2	2		1	
10	13.35	1.95	19.59	36.64 \$	1						5	8	2			1	
20	13.31	2.00	20.59	36.66 \$						3	6	2	1	3		1	
30	13.22	1.86	21.65	36.64 \$						2	2	4	4	2			
40	13.38		22.98														

Année	Surface terrière avant récolte (m2/ha)	Surface terrière récoltée (m2/ha)	DHP moyen avant récolte (cm)	DHP moyen récolté (cm)	Essence / DHP lors de la coupe												
					BOJ					ERS							
					25	30	35	40	45	25	30	35	40	45	50	55	
0	13.39	1.90	18.61	37.25 \$						1	4	4	4	1			
10	13.46	2.03	19.62	37.23 \$						1	3	4	5	1		1	
20	13.36	2.01	20.60	37.23 \$													
30	13.31	1.92	21.65	37.24 \$						3	6	6					
40	13.42		22.95		1	2				3	2	5				2	

Année	Surface terrière avant récolte (m2/ha)	Surface terrière récoltée (m2/ha)	DHP moyen avant récolte (cm)	DHP moyen récolté (cm)	Essence / DHP lors de la coupe												
					BOJ					ERS							
					25	30	35	40	45	25	30	35	40	45	50	55	
0	13.39	1.93	18.61	37.40						2	5	4	3	1		1	
10	13.43	1.93	19.61	37.42						1	4	4	3	1			
20	13.45	2.05	20.65	37.39													
30	13.34	2.00	21.68	37.38						2	4	4	4	1		1	
40	13.38		22.98		1	2	1			1	2	1	5	1			

Figure 4 : Différents scénarios de récolte pour le peuplement no 2. À gauche : L'évolution des récolte et des caractéristiques des peuplements; à droite : les scénarios de martelage correspondants.

- Dans la deuxième simulation, il y a beaucoup moins de bouleaux jaunes récoltés que dans les simulations suivantes. Si l'on désire conserver davantage d'individus de cette essence pour favoriser sa régénération, un tel scénario peut être utile;
- Dans la première simulation, il n'y a aucun arbre martelé au-dessus de 40 cm de DHP, contrairement aux autres simulations présentées. Si l'on désire favoriser l'atteinte d'attributs de forêts anciennes, un tel scénario peut être favorisé;
- Dans le scénario no 3, il y a très peu de tiges martelées en bas de 30 cm de DHP. Si l'on désire minimiser les sacrifices d'exploitabilité (c'est-à-dire que l'on évite de récolter des tiges qui sont à leur maximum d'augmentation de valeur), un tel scénario peut être utilisé.

Il est important de rappeler que tous ces scénarios, malgré leurs différences, sont à rendement soutenu en termes de qualité de tige. L'exercice permet de démontrer qu'il n'y a pas qu'un seul scénario qui permet l'atteinte de cet objectif, mais bien une panoplie. S'il n'y avait qu'une solution, cela aurait été quelque peu inquiétant, car cela aurait impliqué que le sylviculteur aurait eu une marge de manœuvre très étroite pour la réussite de son traitement. Comme le sylviculteur a plusieurs scénarios possibles, cela démontre qu'il pourrait déroger, dans une certaine mesure, au scénario proposé dans compromettre le rendement soutenu en qualité de son traitement.

Analyse économique

L'analyse économique que nous présentons dans le cadre de rapport n'est pas définitive, car elle est effectuée dans le cadre du développement de l'approche. En traitant les 4 hectares selon l'approche SAFIQ, on a récolté un total de 5837 pmp, pour une valeur totale de 2913 \$, une fois les bois livrés à l'usine (Tableau 3). Les coûts de transport se sont élevés à 500 \$ de telle sorte qu'il reste 2413 \$ (sur l'ensemble du projet) pour payer les ouvriers sylvicoles. Les droits de coupe ne sont pas compatibles dans l'équation, car ils ont été payés directement par le bénéficiaire de CAAF à l'état.

Pour récolter cette valeur, nous évaluons que cela a nécessité le travail de l'équivalent 24 jours-hommes (Tableau 4). En considérant un coût journalier de 200\$/jour-homme, nous en déduisons que le travail des opérateurs a coûté 4800 \$, emmenant un déficit pour l'ensemble des opérations du projet de 1659 \$. Cela équivaut à un déficit de 415\$/ha. Nous ne considérons

avoirs été en mesure d'optimiser, en termes de performance, la récolte à faible impact dans le cadre du projet et de nombreuses améliorations peuvent être apportées (voir méthodologie). D'après nos calculs, en atteignant une productivité moyenne de 3,9 jours-hommes/ha (Tableau 5), le seuil de rentabilité serait atteint, ce qui est rarement le cas dans le cadre de coupe de jardinage avec assainissement. Nous croyons qu'une telle amélioration de la productivité est tout à fait envisageable si des efforts significatifs sont dédiés à l'amélioration de la performance de la récolte avec tyrolienne. Rappelons que nous considérons que la SAFIQ devrait être utilisée surtout pour des peuplements accessibles; nous ne croyons pas, avec les volumes récoltés, qu'elle permette d'absorber les coûts de construction/entretien de chemins.

Il demeure possible, même après optimisation des méthodes de récolte, que des travaux à l'aide de la SAFIQ nécessitent des crédits (subventions) à l'aménagement comme c'est le cas pour la coupe de jardinage avec assainissement. Certains éléments militent en faveur de tels crédits, d'autres non. En défaveur de l'octroi de crédits, il est bon de rappeler qu'il est prévu d'intervenir avec la SAFIQ de façon beaucoup plus fréquente qu'en coupe de jardinage (ex. : 10 ans dans le cadre du présent projet) et qu'il n'est pas souhaitable pour l'état d'avoir à investir, sur les mêmes superficies, les mêmes sommes que pour la coupe de jardinage mais de façon plus fréquentes. Toujours en défaveur de l'octroi de crédit, certains pourraient argumenter que, contrairement à la coupe de jardinage avec assainissement, la SAFIQ ne vise pas l'amélioration de la qualité des tiges du peuplement forestier. En considérant que l'on perturbe beaucoup moins l'écosystème forestier avec la SAFIQ qu'avec la coupe de jardinage, et que l'on peut attribuer une valeur à un écosystème moins perturbé, il est toutefois possible d'envisager un crédit pour le maintien des services écologiques de l'écosystème (Costanza *et al.* 1997). Nous revenons sur ce sujet à la section suivante. Enfin, en faveur du crédit, il est important de mentionner que la très grande majorité des coûts associés à la SAFIQ sont des coûts de main-d'œuvre, contrairement à la récolte traditionnelle où une proportion des coûts sert à l'amortissement de la machinerie forestière. Un crédit sylvicole à la SAFIQ servirait donc directement à la main-d'œuvre et non l'amortissement de machinerie, ce qui à première vue semble plus rentable pour l'État.

Tableau 3 : Volumes et valeur des bois récoltés

Volume de bois récolté en pmp (4 ha)	5837
Valeur des bois récoltés à l'usine (\$)	3641
Transport du bois (\$)	500
Droits de coupe	n.a.
Montant disponible pour les opérations (\$)	3 141

Tableau 4 : Rentabilité du projet

Montant disponible pour les opérations (\$)	3 141
Nombre de jours travaillés	24
Salaire quotidien (\$)	200
Coût des travaux (\$)	4800
Rentabilité du projet (\$)	(1 659)
Rentabilité (\$)/ha	(415)

Tableau 5 : Productivité recherchée

Nombre de jours travaillés (projet)	24
Nombre de jours travaillés/ha	6
Nombre de jours/ha à travailler pour atteindre le seuil de rentabilité	3,9

Analyse écologique

L'analyse comparative des impacts écologiques de la SAFIQ avec ceux de la coupe de jardinage conventionnelle sera conduite au cours des prochaines années. Déjà, moins d'un an après récolte, on peut voir des différences notables sur les perturbations au sol (Figure 5) et sur la destruction des débris ligneux au sol. Nos observations préliminaires montrent que les populations de reptiles et amphibiens, particulièrement les salamandres, sont beaucoup moins affectées après utilisation de la SAFIQ que de la coupe de jardinage conventionnelle. Ces premières observations seront vérifiées dans les mois qui viennent. Bien évidemment, nous avons remarqué que la quantité de lumière atteignant la strate arbustive est beaucoup moins abondante après SAFIQ qu'après coupe de jardinage; il est toutefois trop tôt pour établir comment cette différence de lumière affectera le développement de la strate arbustive.

Services écologiques

De plus en plus dans la littérature scientifique, on observe des études où les analyses écologiques et économiques se rejoignent. Elles se rejoignent, entre autres, si l'on reconnaît une valeur économique aux services rendus par les écosystèmes forestiers. (Costanza et al. 1997), dans la réputée revue scientifique *Nature*, ont identifié 17 services et fonctions des écosystèmes auxquels il est possible d'attribuer une valeur. On y retrouve par exemple la régulation des climats, la régulation de catastrophes écologiques, la régulation des plans d'eau, la récréation, les refuges pour des populations et bien d'autres. Les auteurs évaluent la valeur monétaires des services rendus par les écosystèmes entre 16 et 54 trillions de \$ (américains) **annuellement** sur la planète. Ce montant surpasse le PIB mondial. Pour les forêts du Nord-Est américain, la valeur des écosystèmes se situerait, d'après les mêmes auteurs, entre 200 et 500 \$/ha.

Bien évidemment, quand une forêt est traitée par coupe de jardinage, on ne peut pas considérer que tous les services environnementaux sont altérés. De toute évidence toutefois, certaines fonctions de l'écosystème forestier sont davantage altérées par la coupe de jardinage que par la SAFIQ. Nous en avons déjà nommés quelques-uns (érosion dans les chemins de débardage, changement du régime hydrique, changement dans les habitats via la destruction de bois mort au sol et par le développement d'une abondante strate arbustive). Il nous est présentement impossible d'attribuer une valeur économique à ces fonctions, mais il sera extrêmement intéressant de développer des méthodes pour développer l'évaluation monétaire de telles fonctions.

a)



b)



Figure 5 : Comparaison visuelle de l'impact au sol de la méthode conventionnelle (a) et de la méthode par tyrolienne (b).

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, nous avons démontré qu'il est possible de procéder à une récolte de faible intensité uniquement sur des tiges de qualité à rendement soutenu. La fenêtre de possibilités ne semble pas si étroite, car on a pu appliquer l'approche à des peuplements ayant des caractéristiques dendrométriques très différentes et de plus, pour chacun, des peuplements, on pouvait trouver des scénarios de martelage assez différents les uns des autres, qui permettent une récolte à rendement soutenu. À notre connaissance, c'est la première fois qu'une telle démonstration est faite.

L'étude tend à démontrer, qu'avec des innovations, cette sylviculture de faible intensité pourra aussi être à faible impact et que cette sylviculture pourra être rentable économique, et ce, d'autant plus si on tient compte des services écologiques fournis par les écosystèmes. Aussi, nous identifions de nombreuses améliorations à apporter à la méthode de débardage par tyrolienne pour que cette méthode soit utilisée de façon rentable.

Il est possible que certaines idées abordées dans le cadre de ce projet puissent paraître déconcertantes à certains. Axer la récolte sur les tiges de qualité (dans une optique de rendement soutenu) et « démécaniser » la récolte forestière ne sont pas des idées dans l'air du temps. Nous croyons avoir démontré que les idées proposées méritent qu'on les développe davantage. Il sera important que l'on identifie dans quels types de sites et de peuplements on peut les utiliser, et que l'on évalue à l'échelle de l'aménagement comment elles peuvent contribuer à la conciliation des enjeux écologiques, économiques et sociaux.

Références

- Angers, V.-A., Messier, C., Beaudet, M., and Leduc, A. 2005. Comparing composition and structure in old-growth and harvested (selection and diameter-limit cuts) northern hardwood stands in Quebec. *For. Ecol. Manage.* 217(2-3): 275-293.
- Bédard S. and Brassard, F. 2002. Les effets réels des coupes de jardinage dans les forêts publiques du Québec en 1995 et 1996. Ministère des Ressources naturelles du Québec, Direction de la recherche forestière et direction des programmes forestiers. 15 p.
- Bédard, S., Meunier, S., Blais, L., and Majcen, Z. 2004. Les effets réels des coupes de jardinage dans les forêts publiques du Québec de 1995 à 1998. 483 ed. Gouvernement du Québec, Ministère des ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 48 p.
- Buckley, D.S., Crow, T.R., Nauertz, E.A., and Schulz, K.E. 2003. Influence of skid trails and haul roads on understory plant richness and composition in managed forest landscapes in Upper Michigan, USA. *For. Ecol. Manage.* 175: 509-520.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R.S., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., and van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Doak, D.F., Estes, J.A., Halpern, B.S., Jacob, U., Lindberg, D.R., Lovvorn, J., Monson, D.H., Tinker, M.T., Williams, T.M., Wootton, J.T., Carroll, I., Emmerson, M., Micheli, F., and Novak, M. 2008. Understanding and predicting ecological dynamics: are major surprises inevitable? *Ecology* 89(4): 952-961. doi: [doi: 10.1890/07-0965.1](https://doi.org/10.1890/07-0965.1).
- Doyon, F., Gagnon, D., and Giroux, J.F. 2005. Effects of strip and single-tree selection cutting on birds and their habitat in a southwestern Quebec northern hardwood forest. *For. Ecol. Manage.* 209(1-2): 101-115.
- Forget, É., Nolet, P., Doyon, F., Delagrangé, S., and Jardon, Y. 2007. Ten-year response of northern hardwood stands to commercial selection cutting in southern Quebec, Canada. *For. Ecol. Manage.* 242(2-3): 764-775. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.010>.
- Huggett, A.J. 2005. The concept and utility of "ecological thresholds" in biodiversity conservation. *Biol. Conserv.* 124: 301-310.
- Labrecque, P., Nolet, P., and Lesage, G. 2006. Projet Sylviculture par objectifs 2005-2006 - Rapport technique. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Qc. 109 p.
- Nolet, P., Delagrangé, S., and McCullough, V. 2010. Effets de la surface terrière résiduelle sur le rendement et la composition des peuplements jardinés en Estrie. Rapport final. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. 31 p.

Nolet, P., Doyon, F., and Bouffard, D. 2012. Predicting stem windthrow probability in a northern hardwood forest using a wind intensity bio-indicator approach. *Scientific Research* 2(2): 77-87.

Nolet, P., Hartmann, H., Bouffard, D., and Doyon, F. 2007. Predicted and observed sugar maple mortality in relation to site quality indicators. *North. J. Appl. Forest.* 24(4): 258-264.