
ANALYSE DE COÛT COMPARATIVE DE SYSTÈMES DE RÉCOLTE ET DE TRANSPORT INTÉGRANT BOIS RONDS ET BIOMASSE FORESTIÈRE

J.-F. Gingras, ing.f.
J. Favreau, ing.f.

Rapport Spécial N° RS-111

Juillet 1996

MOTS CLÉS: Coûts du bois, Analyse de coût, Étude comparative, Bois ronds, Biomasse forestière, Systèmes de récolte, Systèmes intégrés, Récolte par arbres entiers, En bordure de route, Déchiquetage, Résineux, Peuplements mélangés, Bioénergie, Est du Canada.

This Special Report is available in English

Traduit par Thérèse Sicard, ing.f.

Résumé

Le présent rapport donne des estimations détaillées des coûts actuels, à destination, des bois ronds de qualité sciage et de qualité pâte, de même que des coûts de la biomasse forestière récoltée dans un système intégré à la récolte des bois ronds. Trois systèmes différents ont été étudiés : la récolte par arbres entiers jusqu'en bordure de route, la récolte par bois tronçonnés intégrée au déchiquetage d'arbres entiers, et la récolte par bois tronçonnés. Les études ont eu lieu dans deux types de sites représentatifs : un site résineux boréal et un site mélangé acadien. Les résultats sont présentés en \$/m³ et en \$/tmv (tonne métrique verte) pour les bois ronds ainsi que pour la biomasse forestière. Les effets, sur le coût total, de la distance de transport, de la teneur en humidité de la biomasse et du taux d'utilisation des machines produisant la biomasse sont analysés. D'autres facteurs qui affectent la viabilité de la biomasse forestière comme source économique d'énergie font l'objet d'une discussion.

Préface

En 1995, Ressources naturelles Canada, par l'intermédiaire de sa division CANMET, a demandé à FERIC de réaliser une analyse des coûts de récolte et de transport de la biomasse forestière en utilisant des systèmes courants de récolte dans lesquels était intégrée la récupération de la biomasse. L'objectif consistait à évaluer la viabilité économique de la biomasse forestière comme source possible d'énergie renouvelable.

Remerciements

Ce rapport a été rendu possible grâce à l'aide financière du Programme de développement de la bioénergie (PDB), CANMET AED, de Ressources naturelles Canada, 580 Booth St., Ottawa, Ont. K1A 0E4 (Contrat N° 23440-5-1007/01-SQ).

Les auteurs

Jean-François Gingras est le responsable du groupe Récolte des bois, Division de l'Est. Il est membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec depuis 1982.

Jean Favreau est un chercheur principal attaché au groupe Récolte des bois, Division de l'Est. Il a obtenu une Maîtrise en science économique en 1991 et il est membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec.

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	ii
PRÉFACE	ii
REMERCIEMENTS	ii
LES AUTEURS	ii
SOMMAIRE	iv
INTRODUCTION	1
MÉTHODE D'ÉTUDE	1
DESCRIPTIONS DES SYSTÈMES	1
Système 1. Arbres entiers avec ébranchage en bordure de route (troncs entiers et biomasse)	2
Système 2. Récolte de bois tronçonnés intégrée au déchiquetage d'arbres entiers (billes de sciage, copeaux et biomasse)	2
Système 3. Récolte en bois tronçonnés (billes de sciage, bois à pâte et biomasse)	5
DONNÉES DE L'ANALYSE DE COÛT	5
Calculs de productivité	5
Hypothèses utilisées pour l'analyse de coût	6
Descriptions des sites	6
RÉSULTATS	7
Analyse de sensibilité des coûts de la biomasse	10
<i>Effet de la distance de transport routier</i> ..	10
<i>Effet de la teneur en humidité de la biomasse</i>	11
<i>Effet du taux d'utilisation des machines de production de la biomasse</i>	11
DISCUSSION	11
Avantages et inconvénients de chaque système au point de vue de la production de biomasse	12
<i>Arbres entiers avec ébranchage en bordure de route (système 1)</i>	12
<i>Récolte en bois tronçonnés intégrée au déchiquetage d'arbres entiers (système 2)</i>	12
<i>Récolte en bois tronçonnés (système 3)</i>	13
Comparaison avec le nord de l'Europe	13
<i>Finlande</i>	13
<i>Suède</i>	14
Autres facteurs affectant la viabilité de la biomasse forestière comme source économique d'énergie	14
<i>Prix actuels de l'énergie</i>	14
<i>Disponibilité des résidus d'usine</i>	14
<i>Régénération des peuplements</i>	15
<i>Intégrité des écosystèmes</i>	15
<i>Procédés d'amélioration de la qualité des résidus (Simco/Ramic^{MD} ; Massahake^{MD})</i> ..	15
CONCLUSIONS	15
BIBLIOGRAPHIE	16
ANNEXE - TABLEAUX MONTRANT LES HYPOTHÈSES POSÉES DANS LE MODÈLE ..	17

Liste des figures

	Page
Figure 1. Répartition actuelle et répartition prévue des systèmes de récolte dans l'est du Canada (1985-2001). ..	2
Figure 2. Diagramme montrant les machines et le cheminement des matériaux dans le système 1.	3
Figure 3. Diagramme montrant les machines et le cheminement des matériaux dans le système 2.	4
Figure 4. Diagramme montrant les machines et le cheminement des matériaux dans le système 3.	5
Figure 5. Effet de la distance de transport sur les coûts de transport de la biomasse (conditions acadiennes). .	10
Figure 6. Effet de la teneur en humidité de la biomasse sur les coûts du transport dans le système de récolte en bois tronçonnés (système 3).	11
Figure 7. Effet du taux d'utilisation des machines sur les coûts totaux de récolte de la biomasse sur le site résineux boréal.	11

Liste des tableaux

Tableau S-1. Sommaire des coûts de récolte pour chaque système sur les deux sites ...	v
Tableau 1. Paramètres de site pour les sites boréal et acadien simulés	7
Tableau 2. Productivité de chaque machine sur les deux types de site	8
Tableau 3. Coûts de la récolte par arbres entiers (système 1)	8
Tableau 4. Coûts de la récolte par bois tronçonnés avec déchiquetage intégré (système 2) ..	9
Tableau 5. Coûts de la récolte en bois tronçonnés (système 3)	10
Tableau 6. Sommaire des coûts de récolte pour chaque système sur les deux sites ..	12
Tableau A-1. Coût horaire pour les machines de récolte	17
Tableau A-2. Coût horaire pour les machines de transport	18
Tableau A-3. Hypothèses relatives au transport routier	18

Sommaire

Les objectifs du présent rapport sont d'estimer les coûts actuels des bois ronds et des copeaux rendus aux usines de première transformation du bois, et de comparer ces coûts avec ceux de divers scénarios comprenant la récolte et le transport de biomasse, soit dans un système intégré ou lors d'un second passage.

On a utilisé pour l'analyse une méthode par études de cas, dans laquelle les coûts de récolte de trois systèmes de coupe sur deux types forestiers représentatifs dans l'est du Canada (du Manitoba à Terre-Neuve) ont été calculés et comparés. Les systèmes retenus pour l'analyse étaient la récolte par arbres entiers avec ébranchage en bordure de route, la récolte par bois tronçonnés intégrée au déchiquetage d'arbres entiers, et la récolte par bois tronçonnés.

La **récolte par arbres entiers avec ébranchage en bordure de route (système 1)** est le système le plus répandu dans l'est du Canada pour la récolte des bois ronds. Dans cette analyse, l'approche est modifiée légèrement pour permettre la récupération de biomasse. L'abatteuse-groupeuse abat et groupe les arbres destinés à la production de fibre, tout en triant les bois trop petits et les essences non marchandes en piles séparées. Des débardeurs à grappin acheminent les groupes d'arbres entiers en bordure de route, où travaille une ébrancheuse à flèche. Le débardeur à grappin apporte également les arbres non marchands jusqu'en bordure de route. Une déchiqueteuse d'arbres entiers réduit ces matériaux en copeaux, de même que les débris accumulés en bordure de route par suite de l'opération d'ébranchage.

La **récolte par bois tronçonnés intégrée au déchiquetage d'arbres entiers (système 2)** est le plus complexe des systèmes étudiés. Il incorpore l'abattage mécanisé avec le tri en deux produits (bois de qualité sciage et de qualité pâte) par l'abatteuse-groupeuse, et le façonnage des billes de sciage à la souche suivi de l'écorçage et du déchiquetage des bois à pâte en bordure de route. Les arbres de qualité sciage sont ébranchés et tronçonnés en billes de sciage par une façonneuse à tête multifonctionnelle, qui laisse des piles de débris de coupe le long des sentiers. Les billes sont apportées en bordure de route par un porteur et déchargées directement sur une remorque. Les houppiers et les matériaux trop petits pour produire des billes de sciage sont placés sur les empilements de bois à pâte par la façonneuse. Le débardeur à grappin transporte ensuite ces empilements en bordure de route, où ils sont repris par une ébrancheuse-écorceuse-déchiqueteuse à fléaux (ÉÉD). Les copeaux de qualité pâte sont soufflés directement dans une remorque à copeaux pour train B. La biomasse est produite durant le façonnage à la souche (débris d'ébranchage) et à l'ÉÉD (résidus des fléaux). Une broyeuse à cuve fragmente les résidus de l'ÉÉD dans un processus continu. La broyeuse est équipée d'une soufflerie pour charger les matériaux directement dans une remorque à copeaux pour train B. Le porteur

retourne chercher les débris d'ébranchage provenant de l'opération de façonnage sur le parterre de coupe et apporte ces matériaux additionnels à la broyeuse à cuve.

La **récolte par bois tronçonnés (système 3)** est le système le plus simple au point de vue de la logistique et du nombre de machines requis. Lors d'un premier passage, l'abatteuse-façonneuse produit des billes de sciage et des bois à pâte. Les débris de coupe sont laissés sur les sentiers ou à côté, et le porteur transporte les billes jusqu'en bordure de route. Après avoir débardé les bois ronds, le porteur transporte les débris le long de la route. Une déchiqueteuse d'arbres entiers fragmente les matériaux et les souffle dans une remorque à copeaux.

Les deux types de site choisis étaient un **site résineux boréal** et un **site mélangé acadien**. Les conditions boréales sont représentatives de plusieurs régions du nord de l'Ontario, du nord du Manitoba, du nord du Québec, et de Terre-Neuve. Ces sites sont caractérisés par des peuplements résineux purs à maturité ou surannés, sur des sols organiques humides. Les peuplements sont denses, mais les arbres sont de petite taille et on y rencontre un important sous-étage de régénération préétablie de sapin et d'épinette. Les matériaux non marchands se présentent sous forme de branches, de houppiers, d'arbres de diamètre inférieur au diamètre minimum et d'une partie des feuillus. Étant donné les coûts élevés de construction des routes, les distances de débardage sont longues. Les distances de transport jusqu'à l'usine sont aussi importantes.

Le site mélangé acadien est plus diversifié et représente des peuplements croissant dans le nord de l'Ontario, l'est du Québec, le sud-est du Nouveau-Brunswick et certaines parties de la Nouvelle-Écosse continentale. Ces peuplements sont caractérisés par une forêt mélangée sur un sol bien drainé, souvent de texture et de relief irréguliers. Les tiges sont plus grosses que dans la zone boréale à cause de meilleures conditions de croissance. Les matériaux non marchands se présentent sous forme de branches, de houppiers, d'essences non marchandes et de bois pourri ou mort. Étant donné de meilleures routes d'accès, les distances de débardage et de transport sont plus courtes.

Le coût de chaque combinaison système-site a été simulé depuis la souche jusqu'à la porte de l'usine :

Dans le **système 1**, les coûts pour produire à la fois bois ronds (20,22 \$/m³) et biomasse (25,80 \$/tmv) sont moins élevés dans les conditions acadiennes que dans les conditions boréales (25,91 \$/m³ et 41,15 \$/tmv, respectivement), à cause des volumes plus élevés par hectare, des distances de débardage plus courtes et des distances de transport plus courtes.

Dans le **système 2**, les coûts de la biomasse sur le site boréal (36,17 \$/tmv) sont plus faibles qu'avec l'ensemble traditionnel abatteuse-groupeuse, débardeur et ébrancheuse dans le système 1, parce que la broyeuse à cuve coûte moins cher à utiliser qu'une déchiqueteuse

mobile, et que les débris de coupe sont plus concentrés que dans les piles formées par l'ébrancheuse. Sur le site acadien, le coût élevé du transport des débris de coupe par porteur jusqu'à la broyeuse n'est pas entièrement compensé par le coût de fonctionnement plus faible de la broyeuse comparativement à la déchiqueteuse d'arbres entiers, ce qui rend le coût de la biomasse dans ce système (28,31 \$/tmv) moins intéressant que dans le système traditionnel avec ébrancheuse.

Le **système 3** est le plus simple au point de vue logistique, mais il ne donne pas nécessairement le coût le plus bas, le coût de la biomasse étant de 40,90 \$/tmv et de 30,42 \$/tmv, dans les conditions boréales et acadiennes respectivement. Les coûts des bois ronds aussi sont les plus élevés des trois systèmes.

Les facteurs qui affectent le plus les coûts de la biomasse forestière sont le type de système de récolte, les distances de transport, le degré d'humidité dans les résidus (i.e. la charge utile nette) et les taux d'utilisation des machines de fragmentation de la biomasse. Le tableau S-1 compare les coûts totaux en \$/m³ et en \$/tonne métrique verte (tmv) pour les trois systèmes, sur les deux types de sites.

Les coûts de transport des bois à pâte et des billes de sciage sont caractéristiques de ceux qu'on rencontre dans les opérations courantes de l'est du Canada; on peut donc penser que les simulations étaient réalistes.

Les productivités pour la production de biomasse ont été basées sur des études moins nombreuses et moins fiables, mais elles semblent réalistes pour la plupart. Les coûts de production et de transport de la biomasse sont élevés dans tous les cas, même si la récupération de biomasse a été intégrée à la récolte des bois ronds. On rencontre le coût le plus bas pour la production de biomasse avec la récupération en bordure de route des débris d'ébranchage sur le site acadien (25,80 \$/tmv), et le coût le plus élevé avec le même système sur le site boréal (41,15 \$/tmv). Ce système est très sensible à la productivité atteinte par la déchiqueteuse mobile.

D'autres facteurs influencent l'intérêt que présente la biomasse forestière comme source d'énergie : ce sont notamment les prix actuels de l'énergie, la disponibilité de résidus d'usine, les préoccupations relatives à la régénération des peuplements et à l'intégrité des écosystèmes, et de nouvelles technologies permettant d'améliorer la qualité des résidus.

Des hypothèses spécifiques concernant les conditions de site et les distances de transport ont été retenues pour les deux scénarios. Il peut exister des situations où la combinaison d'une pénurie de résidus d'usine, d'une forte demande de résidus combustibles, d'une courte distance jusqu'au parterre de coupe et de la disponibilité de machines de récolte adéquates, rendrait la récolte et le transport de biomasse à des fins énergétiques une option économiquement réalisable.

Tableau S-1. Sommaire des coûts de récolte pour chaque système sur les deux sites

Système	Produit	Site résineux boréal		Site mélangé acadien	
		\$/m ³	\$/tmv ^a	\$/m ³	\$/tmv ^a
1	Bois ronds	25,91	34,55	20,22	25,28
	Biomasse	30,86	41,15	20,64	25,80
2	Copeaux à pâte	27,91	37,20	22,35	27,94
	Billes de sciage	31,82	42,43	28,48	35,60
	Biomasse	27,13	36,17	22,65	28,31
3	Bois à pâte	32,10	42,80	28,65	35,81
	Billes de sciage	32,10	42,80	28,65	35,81
	Biomasse	30,67	40,90	24,33	30,42
Coût moyen	Bois à pâte	28,64	38,18	23,74	29,67
	Billes de sciage	29,94	39,92	25,78	32,23
	Biomasse	29,56	39,41	22,54	28,18

^a Tonne métrique verte @ 750 kg/m³ (résineux) et 800 kg/m³ (bois mélangés).

Introduction

La bioénergie utilisée dans le secteur forestier pour fournir chaleur et énergie de transformation est habituellement produite à partir de résidus provenant d'usines de pâte et de sciage. Toutefois, des changements dans les méthodes de récolte forestière et les pratiques d'utilisation à l'usine dans les secteurs de la pâte et du sciage influencent actuellement la production de matériaux de rebut. Cette tendance est le résultat des augmentations substantielles de prix que les bois sciés ainsi que la pâte et le papier ont connues au cours des dernières années. Afin de maximiser leurs profits, les usines améliorent leur efficacité d'utilisation du bois de manière à obtenir le rendement le plus élevé possible en produits industriels. Comme la quantité et la qualité des déchets d'usine vont toutes deux en diminuant, il est nécessaire d'examiner la disponibilité économique d'autres matériaux, tels que les résidus forestiers et les arbres non marchands, comme complément à l'approvisionnement en bioénergie.

Pour déterminer s'il est économiquement rentable d'utiliser ces sources de biomasse forestière, il faut d'abord examiner leurs coûts de récolte et de transport, ainsi que la dépendance de ces coûts vis-à-vis de variables comme la distance et les conditions forestières. L'étude d'une approche intégrée combinant les méthodes industrielles de récolte du bois les plus récentes avec la récupération des résidus à des fins énergétiques peut fournir des estimations de coût réalistes. Ces estimations seraient utiles pour analyser l'approvisionnement économique potentiel de combustible issu de la biomasse, en vue d'une utilisation accrue de bioénergie.

Cet exercice a été effectué dans le passé, notamment par Stuart et al. (1981), Hassler et al. (1983), Miller et al. (1987), De Franceschi (1991) et plus récemment par Lussier et Boutin (1995). Dans ce dernier cas, toutefois, l'analyse du coût de récolte pour les produits traditionnels était plutôt limitée et insensible au type de site ou de peuplement. Dans les études américaines, les systèmes étudiés ne correspondent pas à la majorité des systèmes couramment en usage dans l'est du Canada.

Compte tenu de ce contexte, l'objectif du présent rapport est de fournir des estimations détaillées des coûts actuels des bois ronds et des copeaux rendus aux usines de première transformation du bois, et de comparer ces coûts avec les coûts estimés pour divers scénarios comprenant la récolte et le transport de biomasse, soit dans un système intégré ou lors d'un second passage.

Méthode d'étude

Une méthode par études de cas a été retenue pour l'analyse, dans laquelle on a calculé et comparé les coûts d'une série de systèmes de récolte dans deux types forestiers représentatifs de l'est du Canada (du Manitoba à Terre-Neuve).

Une revue de la documentation a permis de colliger les données les plus récentes publiées sur le coût et les productivités des systèmes de récolte et de transport de la biomasse. La plupart des rapports consultés ont été préparés sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) entre 1985 et 1995. Cette revue a aidé à la sélection des scénarios de récupération de biomasse les plus réalisables pour les considérer dans l'analyse et a fourni les données relatives au coût des machines.

Les bases de données internes de FERIC ont été interrogées pour obtenir une répartition à jour des systèmes de récolte couramment en usage dans l'est du Canada. L'information générée par la base de données a également servi à établir les variables de site retenues pour définir les deux types forestiers dans les études de cas.

Chaque scénario a été testé selon deux niveaux de sensibilité en utilisant les deux variables qui contribuaient le plus aux variations du coût total, c'est-à-dire la teneur en humidité de la biomasse et le taux d'utilisation de la machine de production de la biomasse. Les variations du coût de transport en fonction de la distance de transport et de la charge utile ont aussi été analysées séparément.

Enfin, une visite sur des sites d'opérations intégrées de récolte en Suède et en Finlande a été effectuée en novembre 1995 afin d'obtenir une base pour comparer les coûts calculés dans les conditions de l'est du Canada. Des renseignements de coût additionnels ont été recueillis durant des réunions avec les instituts équivalents à FERIC en Suède (SkogForsk) et en Finlande (Metsäntutkimuslaitos), ainsi qu'auprès de plusieurs personnes de l'industrie rencontrées lors des visites sur le terrain.

Description des systèmes

La figure 1 illustre, d'après la base de données de FERIC sur l'équipement forestier, la répartition actuelle et la répartition future prévue des systèmes de récolte dans l'est du Canada (Gingras et Ryans, 1992).

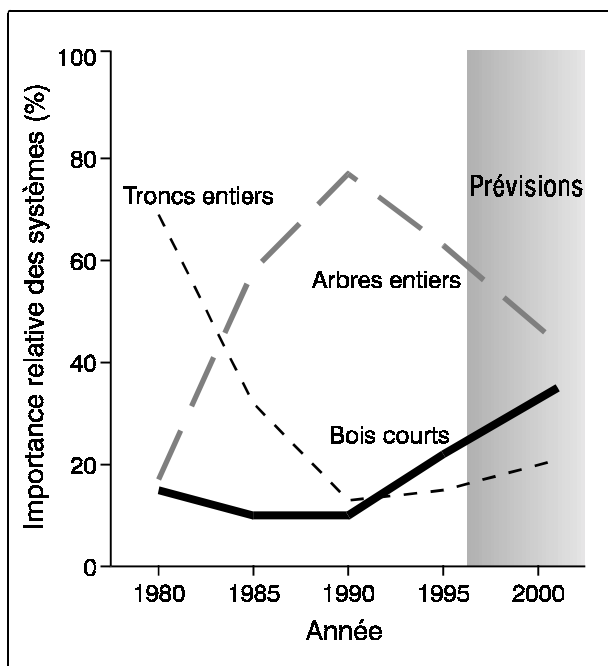


Figure 1. Répartition actuelle et répartition prévue des systèmes de récolte dans l'est du Canada (1980-2001).

On peut voir d'après ce graphique que, même si les systèmes de récolte par arbres entiers avec ébranchage en bordure de route ont baissé en popularité depuis la fin des années 1980, ils représenteront encore près de 50 % du bois récolté dans l'est du Canada au tournant du siècle. Par conséquent, les systèmes comportant une abatteuse-groupeuse restent dominants à court et à moyen terme. Du point de vue de la production de biomasse, la plus grande partie des résidus forestiers se retrouvent concentrés en bordure de route, soit comme débris d'ébranchage ou comme résidus produits par une ébrancheuse-écorceuse-déchiqueteuse à fléaux.

Le système par bois courts (appelé aussi «par bois tronçonnés») remplace graduellement le système par arbres entiers. Dans cette méthode, les arbres sont abattus et façonnés à la souche. C'est la méthode de récolte qui domine dans les pays nordiques et elle implique habituellement l'emploi d'abatteuses-façonneuses à tête multifonctionnelle et de porteurs. Environ 30 % de la récolte dans l'est du Canada devrait se faire selon cette méthode en l'an 2000. Avec ces machines, les débris de coupe demeurent sur le parterre, ordinairement concentrés en andains au milieu des sentiers de débarbage.

Une partie du bois (moins de 15 %) est récolté selon le système par troncs entiers, dans lequel les arbres sont abattus et ébranchés à la souche mais acheminés en pleine longueur en bordure de route. Comme cette méthode est habituellement réalisée par abattage manuel avec débarbage au moyen d'un débardeur à câble, on la rencontre souvent en forêt privée, dans des opérations

à petite échelle et dans la coupe sélective d'essences tolérantes. Il est peu probable que la récupération de biomasse puisse être intégrée à ces systèmes; c'est pourquoi ils ne sont pas considérés dans le cadre de cette étude.

Puttock (1989) donne une liste de la plupart des systèmes possibles de récolte intégrée. À la lumière du contexte ci-dessus, les systèmes retenus pour fins d'analyse dans cette étude des options de récolte intégrée sont les suivants :

Système 1. Arbres entiers avec ébranchage en bordure de route (troncs entiers et biomasse)

Le système 1 est le plus répandu dans l'est du Canada. Dans cette analyse, l'approche est modifiée légèrement pour permettre la récupération de biomasse. L'abat-teuse-groupeuse abat et groupe les arbres destinés à la production de fibre, tout en triant les bois trop petits et les essences non marchandes en piles séparées. Des débardeurs à grappin acheminent les groupes d'arbres entiers en bordure de route, où travaille une ébrancheuse à flèche. Une chargeuse dépose les troncs entiers sur des remorques pour le transport à l'usine. Tous les bois ronds sont dirigés à une scierie où on produit des bois sciés et des copeaux à pâte.

Le débardeur à grappin apporte également les arbres non marchands jusqu'à la route. Une déchiqueteuse d'arbres entiers réduit ces matériaux en copeaux, de même que les débris accumulés en bordure de route par suite de l'opération d'ébranchage. La déchiqueteuse mobile est équipée d'une benne qui est déchargée par basculement dans une remorque à copeaux de 14 m (48 pi), stationnée à proximité. La figure 2 montre les machines et le cheminement des matériaux dans ce système.

Système 2. Récolte de bois tronçonnés intégrée au déchiquetage d'arbres entiers (billes de sciage, copeaux et biomasse)

Le système 2 est le plus complexe des systèmes étudiés dans l'analyse. Il incorpore l'abattage mécanisé avec le tri en arbres de qualité sciage et de qualité pâte, et le façonnage des billes de sciage à la souche suivi de l'écorçage et du déchiquetage des bois à pâte en bordure de route. D'après Sturos et al. (1983), un système de déchiquetage en bordure de route dans lequel tous les matériaux étaient débarbés en un seul passage jusqu'à la route, puis triés avant la conversion et le transport était le plus rentable. Cependant, Favreau et

Franklin (1993) ont étudié un système en Nouvelle-Écosse dans lequel les billes de sciage étaient façonnées sur le parterre de coupe avant que le reste des matériaux ne soit apporté en bordure de route pour le déchetage. Le rendement en billes de sciage se trouvait ainsi maximisé. Le système retenu pour l'analyse est donc similaire à ce dernier.

L'abatteuse-groupeuse procède d'abord à un tri en deux produits, arbres de qualité sciage et arbres destinés à la pâte. Les arbres dans la pile de qualité sciage sont ébranchés et tronçonnés en billes de sciage par une façonneuse à tête multifonctionnelle, qui laisse des

pires de débris le long des sentiers. Les billes sont apportées en bordure de route par un porteur et déchargées directement sur une remorque. Les houppiers et les matériaux trop petits pour produire des billes de sciage sont placés sur les empilements de bois à pâte par la façonneuse. Le débardeur à grappin transporte ensuite ces empilements en bordure de route, où ils sont repris par une ébrancheuse-écorceuse-déchetuse à fléaux (ÉÉD). Les copeaux de qualité pâte sont soufflés directement dans une remorque à copeaux pour train B.

La biomasse est produite durant le façonnage à la souche (débris d'ébranchage) et à l'ÉÉD (résidus des

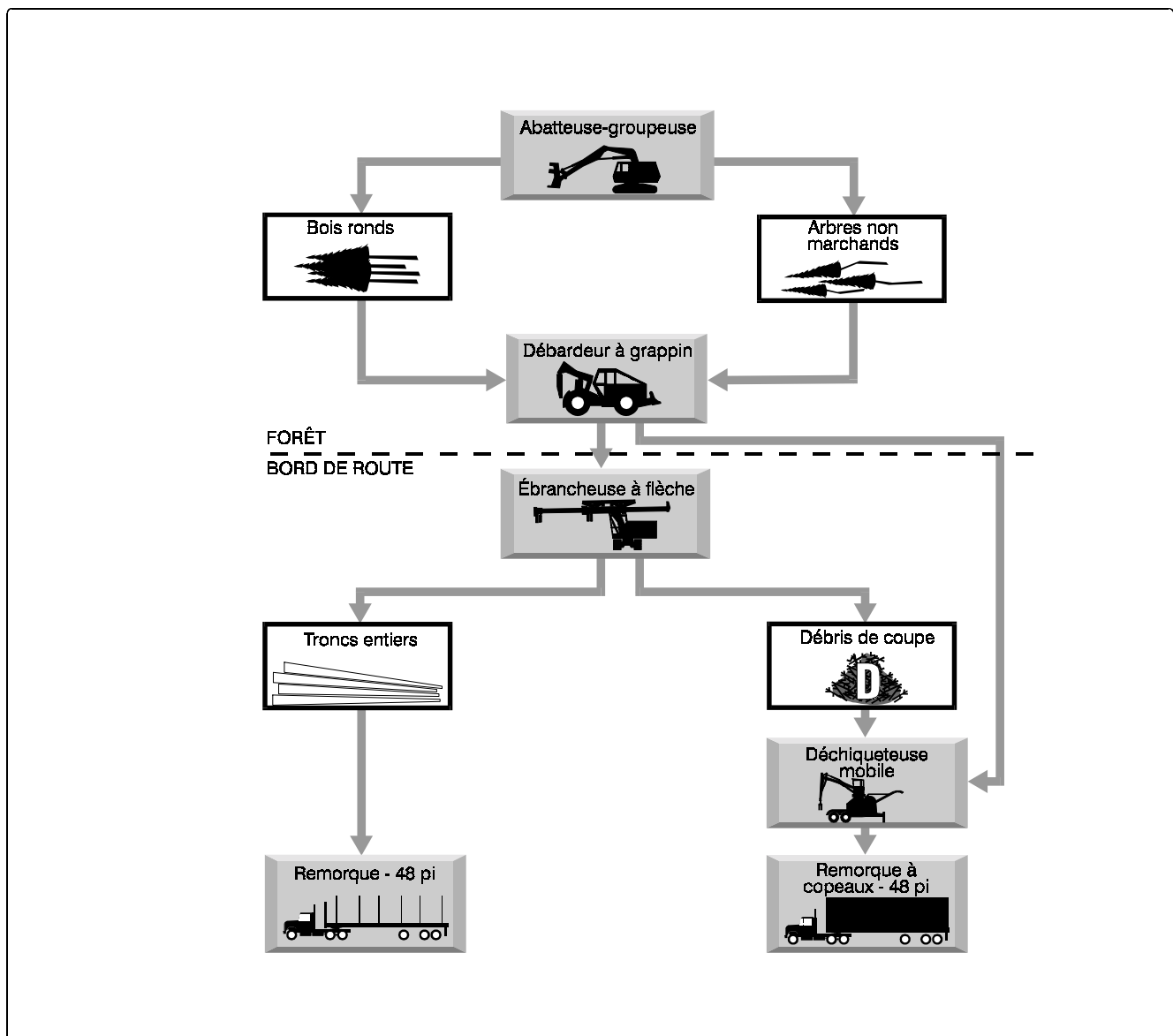


Figure 2. Diagramme montrant les machines et le cheminement des matériaux dans le système 1.

fléaux). Une broyeuse à cuve fragmente les résidus de l'ÉÉD dans un processus continu. La broyeuse est équipée d'une soufflerie pour charger les matériaux directement dans une remorque de train B réservée aux copeaux d'énergie. Le porteur retourne chercher les débris d'ébranchage provenant de l'opération de façon-

nage sur le parterre de coupe et apporte ces matériaux additionnels à la broyeuse à cuve. La figure 3 montre le diagramme des machines et du cheminement des matériaux dans ce système.

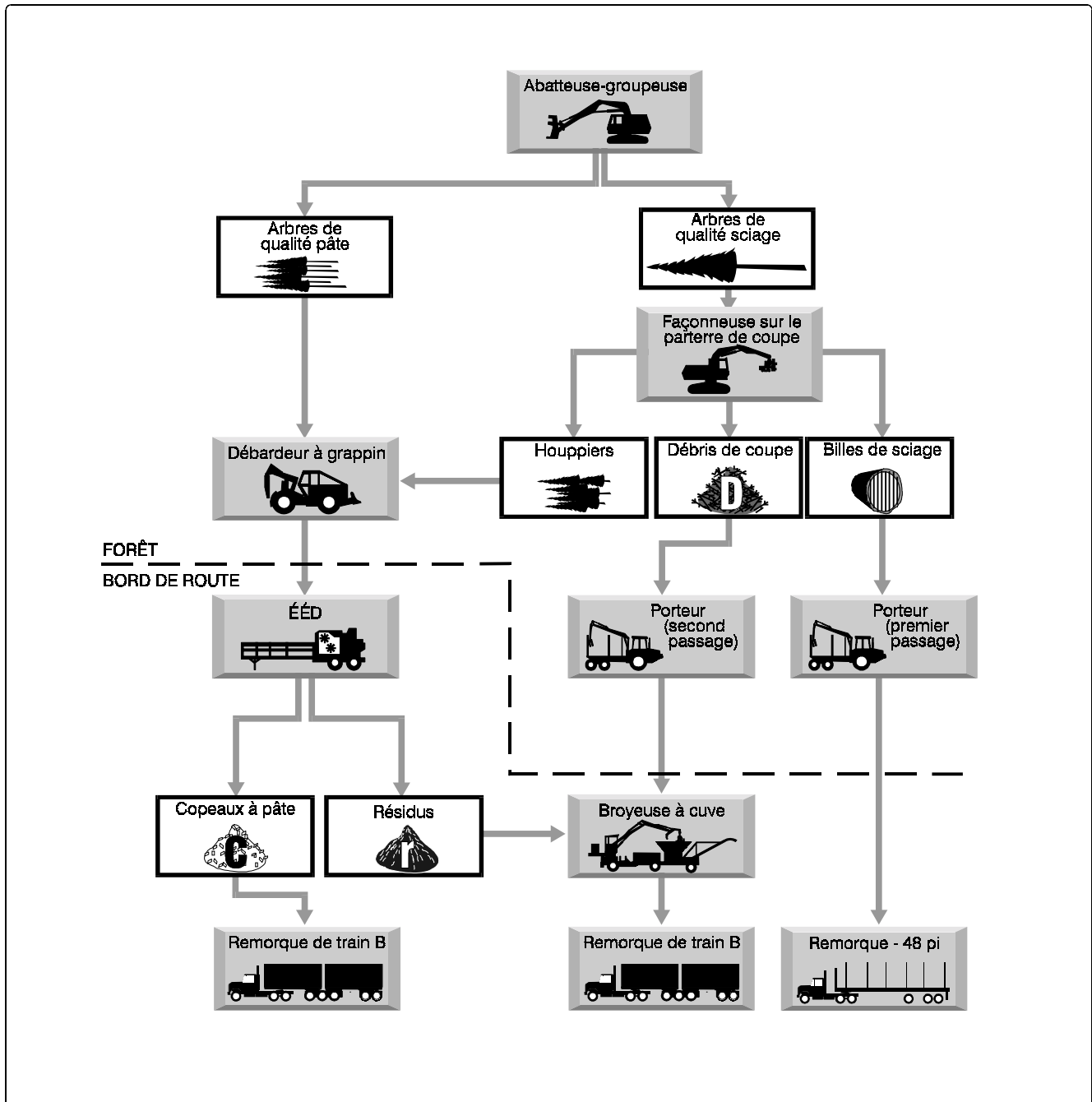


Figure 3. Diagramme montrant les machines et le cheminement des matériaux dans le système 2.

Système 3. Récolte en bois tronçonnés (billes de sciage, bois à pâte et biomasse)

La récolte en bois tronçonnés est le système le plus simple tant au point de vue de la logistique que du nombre de machines requis. C'est cependant un système qui comporte deux passages. Lors du premier passage, l'abatteuse-façonneuse abat les arbres et produit des billes de sciage et des bois à pâte. Les débris de coupe sont laissés sur les sentiers ou à côté, et un porteur extrait les billes en bordure de route. Les billes sont déchargées directement dans une remorque vide. Une fois que les bois de valeur commerciale ont été débardés, le porteur transporte les débris de coupe en bordure de route. Une déchiqueteuse d'arbres entiers est alors amenée sur place pour fragmenter ces matériaux et les souffler dans une remorque à copeaux de 14 m (figure 4).

Données de l'analyse de coût

Calculs de productivité

Les fonctions de productivité et les facteurs de correction pour la récolte et le transport des bois ronds proviennent des bases de données de FERIC sur la productivité, qui contiennent toutes les informations recueillies par FERIC depuis 1975 dans le cadre de ses études.

Les trois machines utilisées pour produire la biomasse sont une déchiqueteuse mobile (p. ex. Bruks 1001) dans le premier système par arbres entiers, une broyeuse à cuve dans le second système (extraction des billes de sciage et déchiquetage en bordure de route) et une déchiqueteuse en bordure de route (p. ex. Morbark 23XL) dans le troisième système (bois tronçonnés).

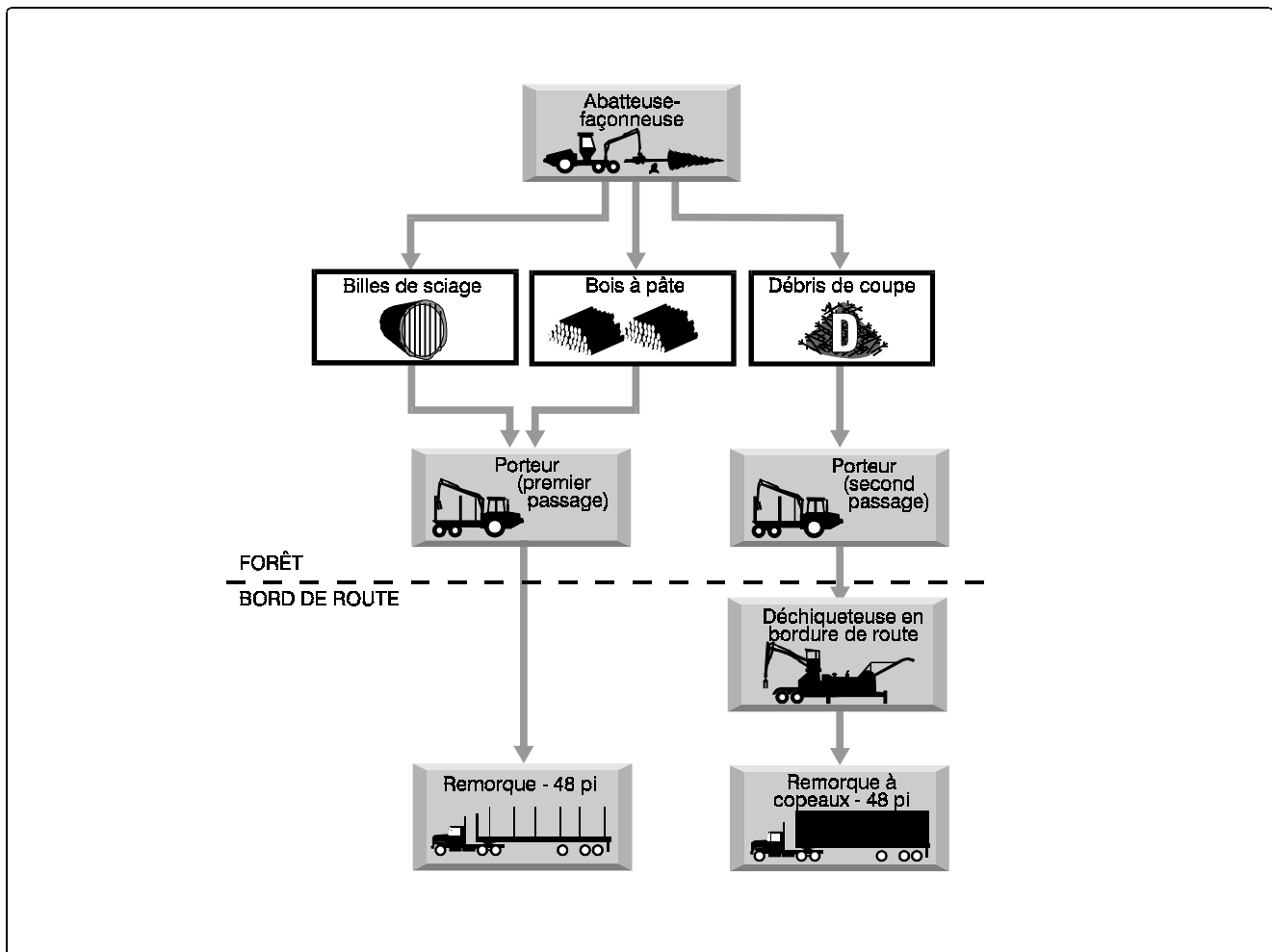


Figure 4. Diagramme montrant les machines et le cheminement des matériaux dans le système 3.

Les données de productivité et de coût pour ces machines et les autres activités de production de biomasse sont dérivées d'articles publiés. Les données sur les caractéristiques des résidus forestiers comme la densité apparente, la teneur en humidité, etc. sont tirées de Larsson (1981), Nilsson (1983) et Stokes (1992). L'information relative aux systèmes et aux coûts de transport provient de Larsson (1981), Hankin et Mitchell (1994), Bjorheden (1990) et Belli et Watson (1994). Les données de productivité et de coût liées au déchiquetage ou au broyage des résidus forestiers en bordure de route sont tirées de Desrochers et al. (1992), Desrochers (1993), Watson et Twaddle (1990) et Belli et Watson (1994). Les renseignements relatifs à la productivité et à la faisabilité de récupérer les débris de coupe dans des systèmes de récolte en bois courts viennent de Brunberg (1994), Wigren (1994) et Persson (1994).

Hypothèses utilisées pour l'analyse de coût

Le tableau A-1 en annexe présente les hypothèses relatives aux coûts directs de fonctionnement des machines dans les trois systèmes de récolte différents; le tableau A-2 donne les hypothèses de coût utilisées pour les machines de transport routier; et le tableau A-3 contient les hypothèses de productivité pour les cinq systèmes de transport routier utilisés dans l'analyse.

Plusieurs approches peuvent servir à calculer les coûts de récupération de la biomasse. Certaines stratégies d'analyse des coûts pour la récolte intégrée de bois commercial et de biomasse sont présentées dans Hudson et al. (1991). Aux fins de la présente analyse, différentes techniques de répartition des coûts entre les produits de bois ronds et la biomasse ont été utilisées pour distribuer les coûts des différents produits dans les systèmes intégrés de récolte. Les hypothèses suivantes ont été posées :

- Pour les activités d'abattage et de façonnage sur le parterre de coupe, le coût de la biomasse est considéré seulement quand le triage de la biomasse demande du temps additionnel. Dans ce cas, le temps marginal pris pour séparer la biomasse des bois ronds est imputé au produit biomasse.
- Pour les activités de débardage, le coût du débardage est réparti selon la proportion du volume de biomasse débardé séparément en bordure de route.
- Dans les activités de portage, la biomasse est un produit séparé. Le coût pour transporter la biomasse en bordure de route est imputé à cette portion de la biomasse qui est transportée indépendamment.

- Dans les activités d'ébranchage, la biomasse est un sous-produit et, comme il ne peut être identifié, aucun coût n'est imputé à la biomasse.
- Dans les autres activités de production de biomasse en bordure de route et dans les activités de transport routier, le coût est entièrement imputé à la biomasse puisque c'est le seul produit.

Description des sites

L'est du Canada, entre le Manitoba et Terre-Neuve, est couvert par un large éventail de types de sites (caractéristiques du terrain, drainage, pente) et de types forestiers (résineux, mélangés, feuillus). Évidemment, la productivité et le coût de récolte de ces forêts sont fortement affectés par les caractéristiques de peuplement et de terrain. En fait, un des principaux objectifs de FERIC est de fournir à l'industrie des données sur la productivité des machines et des systèmes en fonction des conditions de site et de peuplement.

Le calcul des coûts de récolte des bois ronds et de la biomasse pour chaque système, dans toutes les conditions de peuplement ou de site rencontrées dans l'est du Canada, serait pratiquement impossible. Il a donc été décidé de choisir deux types caractéristiques de peuplement et de site qui couvrent des conditions différentes mais très représentatives, rencontrées par de nombreuses entreprises forestières. Les deux types représentatifs qui ont été sélectionnés étaient un site résineux boréal et un site mélangé acadien. Le tableau 1 présente les variables de site et de peuplement pour ces deux types.

Les conditions boréales sont représentatives de plusieurs régions du nord-est et du nord-ouest de l'Ontario, du nord du Manitoba, de la plus grande partie du nord du Québec, et de Terre-Neuve. Elles sont caractérisées par des peuplements résineux purs à maturité ou surannés, croissant sur des sols organiques humides. Les peuplements sont plutôt denses, mais les arbres sont de petite taille et on y rencontre un important sous-étage de régénération préétablie de sapin et d'épinette. Les matériaux non marchands se présentent sous forme de branches, de houppiers, d'arbres de diamètre inférieur au diamètre minimum et d'une partie des feuillus. Étant donné les coûts élevés de construction des routes, les distances de débardage sont longues de même que les distances de transport jusqu'à l'usine.

Les conditions mélangées acadiennes sont beaucoup plus diversifiées et peuvent être considérées comme représentatives de peuplements croissant dans le nord de l'Ontario, l'est du Québec, l'est et le sud du Nouveau-Brunswick et plusieurs parties de la Nouvelle-Écosse continentale. Elles sont caractérisées ici par une forêt mélangée sur un sol bien drainé, souvent de texture et

Tableau 1. Paramètres de site pour les sites boréal et acadien simulés

	Conditions boréales	Conditions acadiennes
Méthode de récolte	Coupe rase avec protection de la régénération préétablie	Coupe rase
Classe de terrain (ACPP)	3.1.1	1.2.2
- Rugosité	faible	modérée, quelques boulders et terrain accidenté
- Drainage	humide, horizon organique assez profond	bon, sol mince bien drainé
- Pente moyenne (%)	moins de 5 %	variable, jusqu'à 20 % sur de courtes pentes
Composition en essences	90 % épinette noire, 10 % sapin baumier	40 % épinette blanche, 20 % pin gris, 20 % peuplier faux-tremble, 10 % bouleau et autres feuillus, 10 % sapin baumier
Densité marchande du peuplement (tiges/ha)	1100	1250
Volume marchand (m ³ /ha)	120	180
Volume marchand moyen (m ³ /arbre)	0,11	0,14
Volume de biomasse récupérée (m ³ réels/ha)	18	45
Densité moyenne à l'état vert des copeaux d'énergie (kg/m ³)	750	800
Branchéité	faible	modérée
Sous-étage	modéré, principalement régénération préétablie	dense
Distance maximale de débardage (m)	500	300
Distance moyenne de débardage (m)	350	200
Largeur de la jetée ou de la route	étroite	large
Distance moyenne de transport, aller seulement, km (produit pâte, billes de sciage, copeaux d'énergie)	140	100

de relief irréguliers. Les tiges sont plus grosses que dans la zone boréale à cause de meilleures conditions de croissance. Les matériaux non marchands se présentent sous forme de branches, de houppiers, d'essences non marchandes et de bois pourri ou mort. Étant donné de meilleures routes d'accès, les distances de débardage et de transport sont plus courtes. Cependant, la forêt mélangée donne lieu à la récolte de produits multiples, dont chacun est destiné à des usines dispersées.

Résultats

Les productivités estimées pour chaque machine sur les deux types de site sont présentées au tableau 2. On trouvera aux tableaux A-2 et A-3 les détails des hypothèses de transport.

En utilisant les données de coût et de productivité tirées des tableaux A-1 et A-2 ainsi que du tableau 2, on a simulé le coût de chaque combinaison système-site depuis la souche jusqu'à la porte de l'usine, et ces

résultats apparaissent dans les tableaux 3 à 5. Les facteurs de correction dans ces tableaux représentent les pourcentages appliqués aux données de productivité de base, et non aux coûts de base dans les tableaux.

Les coûts de production à la fois de bois ronds (pas de séparation des tiges de qualité sciage et des arbres de qualité pâte) et de biomasse avec le système par arbres entiers (tableau 3) sont plus bas dans les conditions acadiennes que dans les conditions boréales à cause des volumes plus élevés par hectare, des distances de débardage plus courtes et des distances de transport plus courtes dans les peuplements acadiens (tableau 1). La composante de coût la plus importante pour les troncs entiers est le transport, comparativement au déchiage en bordure de route pour la biomasse. Même si la charge utile de bois ronds est légèrement supérieure à celle des copeaux d'énergie dans ce scénario, les coûts de transport de la biomasse sont plus bas que ceux des

bois ronds quand on tient compte des temps moins longs pour le chargement et le déchargement des matériaux en vrac destinés à la biomasse dans des remorques de réserve laissées en bordure de route. La séparation des bois ronds et des matériaux destinés à la biomasse entraîne des pertes minimales de productivité pour l'abatteuse-groupeuse et le débardeur à grappin.

Comme pour le premier système, les coûts de récolte (tableau 4) de trois produits (billes de sciage, copeaux à pâte et biomasse) dans le système intégré sont plus faibles sur le site acadien, pour les raisons déjà mentionnées.

Tableau 2. Productivité de chaque machine sur les deux types de site

	Productivité (m ³ réels/HMP)	
	Conditions boréales	Conditions acadiennes
Abatteuse-groupeuse	25,9	27,9
Abatteuse-façonneuse	9,7	11,4
Façonneuse à la souche	14,0	15,7
Porteur (biomasse)	7,9	10,2
Porteur (bois ronds)	14,9	17,0
Débardeur à grappin	10,7	15,6
Ébrancheuse à flèche	25,0	27,8
Ébrancheuse-écorceuse-déchiqeteuse	26,2	27,1
Déchiqeteuse mobile	10,0	15,0
Broyeuse à cuve	20,0	20,0
Déchiqeteuse en bordure de route	30,0	30,0
Camionnage		
Bois ronds (remorque de 48 pi)	7,0	10,6
Biomasse (remorque à copeaux de 48 pi - système 1)	6,4	10,4
Biomasse (remorque à copeaux de 48 pi - système 3)	5,5	8,1
Copeaux à pâte (remorque de train B)	7,8	11,3
Biomasse (remorque de train B - système 2)	6,4	8,7

Tableau 3. Coûts de la récolte par arbres entiers (système 1)

	Coût (\$/m ³)	
	Conditions boréales	Conditions acadiennes
Abatteuse-groupeuse		
Coût de base	4,27	3,97
% de correction (tri en deux produits) ^a	(1)	(2)
Bois ronds	4,27	3,97
Biomasse	0,28	0,33
Débardeur à grappin		
Coût de base	5,94	4,06
% de correction (classe de pente 2)	(0)	(5)
Bois ronds	5,94	4,26
Biomasse ^b	0,89	1,06
Ébrancheuse		
Coût de base	3,60	3,23
% de correction		
- classe de branchéité 3	(0)	(5)
- espace limité à la jetée, classe 4	(5)	(0)
Bois ronds	3,79	3,40
Biomasse	0,00	0,00
Déchiqeteuse mobile		
Biomasse	18,43	12,28
Transport routier		
Troncs entiers (remorques de 48 pi à chargement bidirectionnel)	11,91	8,59
Biomasse (remorques à copeaux de 48 pi)	11,26	6,97
Coût total		
Bois ronds	25,91	20,22
Biomasse	30,86	20,64

^a Cette correction s'applique uniquement à la biomasse, dans les proportions indiquées à la note b.

^b La biomasse débardeuse indépendamment représente 15 % et 25 % de la biomasse totale débardeuse sur les sites boréal et acadien, respectivement.

Les coûts de la biomasse sur le site boréal sont moins élevés avec ce système qu'avec le système traditionnel comprenant une abatteuse-groupeuse, un débardeur et une ébrancheuse (tableau 3), parce que la broyeuse à cuve coûte moins cher à utiliser qu'une déchiqueteuse mobile, et que les débris à broyer sont plus concentrés que dans les piles formées par l'ébrancheuse. Il est à noter que le système 2 récupère l'écorce comme biomasse dans la forêt, alors que l'écorce est apportée à l'usine dans les deux autres systèmes et est imputée au coût des bois ronds.

Sur le site acadien, le coût élevé de transport des résidus par le porteur jusqu'à la broyeuse n'est pas complètement compensé par le coût de fonctionnement plus bas de la broyeuse à cuve par rapport à la déchiqueteuse d'arbres entiers, ce qui rend ce système moins intéressant que le système traditionnel avec

ébrancheuse (tableau 3). Les coûts de transport de la biomasse sont plus élevés que les coûts pour les copeaux à pâte dans ce scénario, parce que la productivité au chargement est meilleure avec l'ÉÉD qu'avec la broyeuse à cuve pour une charge utile équivalente. Les coûts de transport des billes de sciage sont plus élevés que ceux de la biomasse à cause des chargeuses nécessaires pour charger et décharger ces billes.

Même si le système 3 est le plus simple au point de vue logistique, il ne donne pas nécessairement le coût le plus bas, les coûts de la biomasse étant d'environ 31 \$/m³ dans les conditions boréales et de 24 \$/m³ dans les conditions acadiennes (tableau 5). Les coûts de récolte des bois ronds sont aussi les plus élevés des trois systèmes simulés. Le transport des résidus par porteur est une composante importante des coûts totaux sur les deux sites.

Tableau 4. Coûts de la récolte par bois tronçonnés avec déchiquetage intégré (système 2)

	Coût (\$/m ³)			Coût (\$/m ³)	
	Conditions boréales	Conditions acadiennes		Conditions boréales	Conditions acadiennes
Abatteuse-groupeuse			Débardeur à grappin		
Coût de base	4,27	3,97	Coût de base	5,94	4,06
% de correction (tri en deux produits)	(5)	(5)	% de correction (classe de rugosité 2)	(0)	(5)
Bois à pâte	4,50	4,18	Bois à pâte	5,94	4,26
Billes de sciage	4,50	4,18	Biomasse	0,00	0,00
Biomasse	0,00	0,00			
Façonneuse à la souche			Ébrancheuse-écorceuse-déchiqueteuse		
Coût de base	9,76	8,67	Coût de base	7,82	7,55
% de correction			% de correction (réseau routier)	(5)	(0)
- positionnement des résidus ^a	(1)	(2)	Copeaux à pâte	8,21	7,55
- classe de rugosité 2	(0)	(5)	Biomasse	0,00	0,00
- classe de pente 2	(0)	(5)			
- classe de branchéité 3	(0)	(5)	Broyeuse à cuve		
Billes de sciage	9,76	10,20	Coût de base	6,73	6,73
Biomasse	0,66	0,71	% de correction (réseau routier)	(5)	(0)
			Biomasse	7,07	6,73
Porteur (premier passage)			Transport routier		
Coût de base	5,65	4,96	Copeaux à pâte (remorque à copeaux pour train B)	9,26	6,36
% de correction (classe de pente 2)	(0)	(10)	Billes de sciage (remorque de 48 pi)	11,91	8,59
Billes de sciage	5,65	5,51	Biomasse (remorque à copeaux pour train B)	11,20	8,25
Porteur (second passage)					
Coût de base	10,72	8,29	Coût total		
% de correction			Copeaux à pâte	27,91	22,35
- classe de pente 2	(0)	(10)	Billes de sciage	31,82	28,48
- conversion du grappin	(2)	(2)	Biomasse	27,13	22,65
Biomasse ^b	8,20	6,96			

^a Ce facteur de correction s'applique uniquement aux coûts de la biomasse, dans une proportion de 15 % et de 25 % de la récolte totale dans les conditions boréales et acadiennes, respectivement.

^b Il est supposé que 75 % de la biomasse, sous forme de branches, est transportée par le porteur et que l'autre 25 %, sous forme d'écorce et de houppiers d'arbres destinés à la pâte, est débarquée sans coût supplémentaire.

Tableau 5. Coûts de la récolte en bois tronçonnés (système 3)

	Coût (\$/m ³)	
	Conditions boréales	Conditions acadiennes
Abatteuse-façonneuse		
Coût de base	14,53	12,37
% de correction		
- tri en deux produits	(0)	(0)
- classe de pente 2	(0)	(5)
- classe de rugosité 2	(0)	(5)
- classe de branchéité 3	(0)	(5)
- positionnement des résidus ^a	(2)	(3)
Bois à pâte	14,53	14,55
Billes de sciage	14,53	14,55
Biomasse	1,97	1,53
Porteur (premier passage, billes)		
Coût de base	5,65	4,96
% de correction		
(classe de pente 2)	(0)	(10)
Bois à pâte	5,65	5,51
Billes de sciage	5,65	5,51
Porteur (second passage, biomasse)		
Coût de base	10,72	8,29
% de correction		
- classe de pente 2	(0)	(10)
- conversion du grappin	(2)	(2)
Biomasse	10,94	9,28
Déchiqueteuse en bordure de route		
Coût de base	4,97	4,97
% de correction		
(réseau routier)	(5)	(0)
Biomasse	5,22	4,97
Transport routier		
Bois à pâte (remorque de 48 pi)	11,91	8,59
Billes de sciage (remorque de 48 pi)	11,91	8,59
Biomasse (remorque à copeaux de 48 pi)	12,54	8,55
Coût total		
Bois à pâte	32,10	28,65
Billes de sciage	32,10	28,65
Biomasse	30,67	24,33

^a Ce facteur de correction s'applique uniquement aux coûts de la biomasse, dans une proportion de 15 % et de 25 % de la récolte totale dans les conditions boréales et acadiennes, respectivement.

Analyse de sensibilité des coûts de la biomasse

Les facteurs qui influencent le plus fortement les coûts de production de la biomasse sont le type de système de récolte, les distances de transport, le degré d'humidité dans les résidus (i.e. la charge utile nette) et le taux d'utilisation des machines de fragmentation de la biomasse. Une analyse de sensibilité a été effectuée pour les coûts de la biomasse en rapport avec les trois derniers facteurs.

Effet de la distance de transport routier

L'effet de la distance de transport routier sur les coûts d'ensemble du transport de la biomasse dans les conditions acadiennes apparaissent à la figure 5.

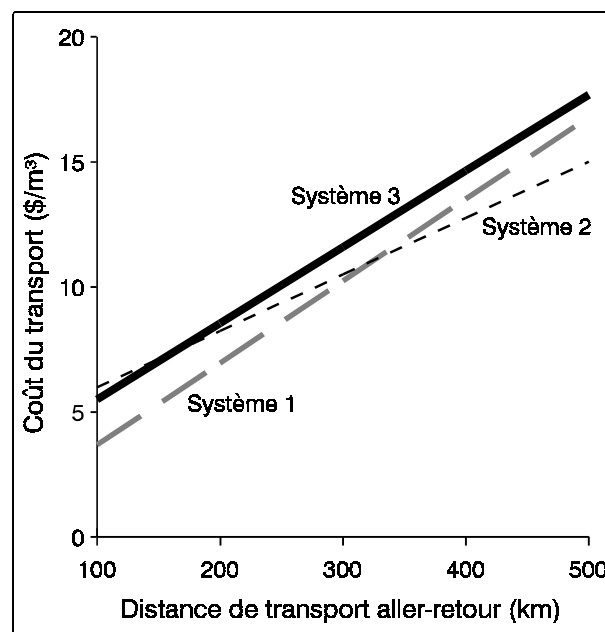


Figure 5. Effet de la distance de transport sur les coûts de transport de la biomasse (conditions acadiennes).

À mesure que les distances de transport augmentent au-delà de 130 km, la charge utile plus forte permise par les remorques de train B rendent cette configuration plus intéressante économiquement qu'avec le système 3. L'avantage de coût des trains B, comparativement aux remorques à copeaux du système 1, commence à se faire sentir quand la distance aller-retour atteint 325 km. Le transport de la biomasse dans le système 1 est le moins coûteux pour une distance aller-retour inférieure à 325 km, étant donné le court temps de chargement réalisé, qui comprend uniquement le temps d'accrochage pour le camion et la remorque en charge. Cela suppose qu'il est possible de laisser une remorque vide sur place pendant que d'autres remorques déjà chargées effectuent le transport jusqu'à

l'usine. Cependant, le système de remorques à copeaux de 48 pieds est le plus sensible à la distance de transport. Les coûts de transport dans le système 3 sont les plus élevés parce que la charge utile est plus faible qu'avec les remorques de train B et que le temps de chargement est le plus long des trois systèmes de transport.

Effet de la teneur en humidité de la biomasse

Le fait de transporter plus ou moins d'eau dans la biomasse forestière a une influence significative sur les coûts du transport, comme on peut le voir par les données obtenues pour le système 3 (récolte en bois tronçonnés) dans les conditions acadiennes, à la figure 6.

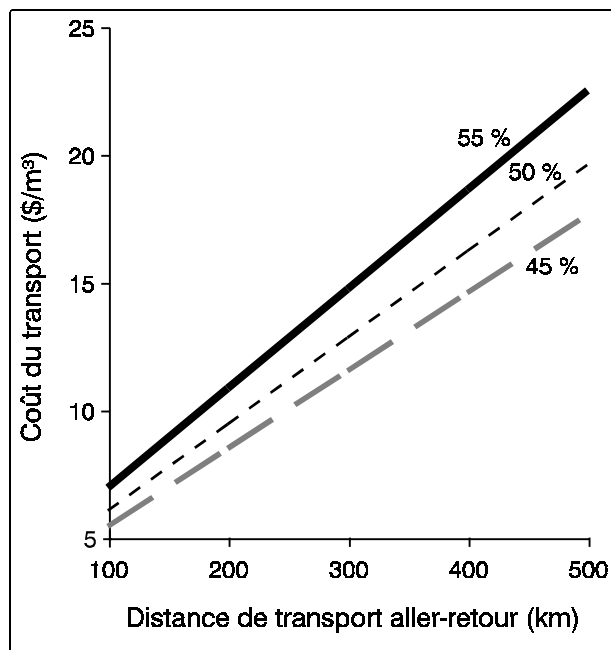


Figure 6. Effet de la teneur en humidité de la biomasse sur les coûts du transport dans le système de récolte en bois tronçonnés (système 3).

Tel que prévu, les coûts du transport augmentent avec la teneur en humidité de la biomasse. En outre, plus le degré d'humidité est élevé, plus le coût est sensible à la distance totale de transport. À une distance aller-retour de 300 km, une différence de 10 % dans la teneur en humidité peut représenter une variation de coût d'environ 3 \$/m³.

Effet du taux d'utilisation des machines de production de la biomasse

Le coût horaire des machines de fragmentation de la biomasse utilisées dans les trois systèmes est assez sensible à leur taux d'utilisation annuel. Ces machines

sont sujettes à des taux d'utilisation plus faibles que les machines servant à la récolte des bois ronds, à cause du temps additionnel de déplacement et des volumes incertains de biomasse récupérée annuellement. L'effet du taux d'utilisation sur le coût total de la biomasse dans les conditions boréales apparaît à la figure 7.

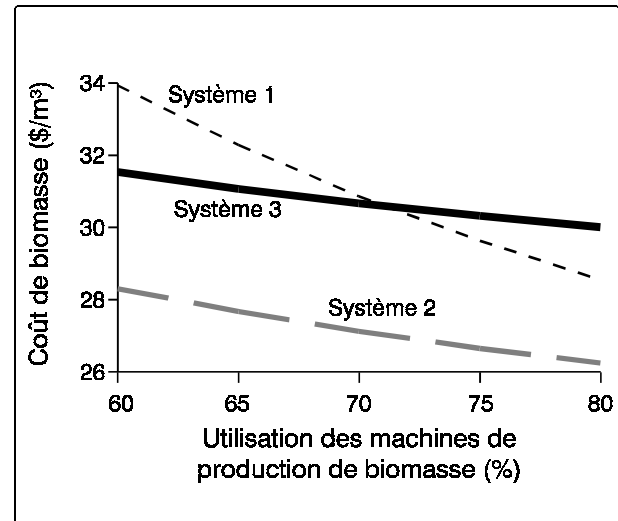


Figure 7. Effet du taux d'utilisation des machines sur les coûts totaux de récolte de la biomasse sur le site résineux boréal.

Le système de récolte par arbres entiers (système 1) est le plus sensible au taux d'utilisation de la machine de fragmentation en bordure de route (une déchiqueteuse mobile en ce cas), parce que cette phase représente plus de 50 % du coût total de production de la biomasse dans ce système. La déchiqueteuse mobile a le coût de fonctionnement le plus élevé et la productivité la plus faible des trois machines de fragmentation. Quand le taux d'utilisation augmente, le coût de déchiquetage diminue plus rapidement dans le système en arbres entiers que dans les deux autres. Comme la broyeuse à cuve et la déchiqueteuse d'arbres entiers ont des coûts unitaires comparables, elles montrent une sensibilité similaire au taux d'utilisation de la machine, la déchiqueteuse d'arbres entiers en bordure de route (système 3) étant la moins sensible.

Discussion

On trouvera au tableau 6 une comparaison des coûts totaux (en \$/m³ et en \$/tmv) pour les trois systèmes sur les deux types de site.

Les coûts de production et de transport de la biomasse sont élevés dans tous les cas, malgré l'intégration de la récupération de biomasse avec la récolte traditionnelle de bois ronds. On rencontre le coût le plus bas pour la production de biomasse avec la récupération en bordure de route des débris de l'ébrancheuse à flèche sur le site acadien, soit un coût de 25,80 \$/tmv, mais on

Tableau 6. Sommaire des coûts de récolte pour chaque système sur les deux sites

Système	Produit	Conditions boréales		Conditions acadiennes	
		\$/m ³	\$/tmv ^a	\$/m ³	\$/tmv
1	Bois ronds	25,91	34,55	20,22	25,28
	Biomasse	30,86	41,15	20,64	25,80
2	Copeaux à pâte	27,91	37,20	22,35	27,94
	Billes de sciage	31,82	42,43	28,48	35,60
	Biomasse	27,13	36,17	22,65	28,31
3	Bois à pâte	32,10	42,80	28,65	35,81
	Billes de sciage	32,10	42,80	28,65	35,81
	Biomasse	30,67	40,90	24,33	30,42
Coût moyen	Bois à pâte	28,64	38,18	23,74	29,67
	Billes de sciage	29,94	39,92	25,78	32,23
	Biomasse	29,56	39,41	22,54	28,18

^a Tonne métrique verte @ 750 kg/m³ (résineux) et 800 kg/m³ (bois mélangés).

trouve le plus élevé avec le même système sur le site boréal, soit un coût de 41,15 \$/tmv. Ce système est très sensible à la productivité réalisée par la déchiqueteuse mobile. Cette machine est aussi très sensible à la concentration de biomasse dans l'aire d'ébranchage. Les coûts livrés des bois à pâte et des billes de sciage sont caractéristiques de ceux qu'on rencontre dans les opérations courantes de l'est du Canada, ce qui indique que les simulations sont réalistes. Évidemment, les productivités relatives à la production de biomasse sont basées sur des études moins nombreuses et moins fiables, mais elles semblent pour la plupart réalistes.

Avantages et inconvénients de chaque système au point de vue de la production de biomasse

Arbres entiers avec ébranchage en bordure de route (système 1)

Le système utilisant une ébrancheuse produit la source de biomasse la moins chère (site acadien) et la plus facilement accessible, les débris d'ébranchage en bordure de route. Cependant, il produit également la biomasse la plus contaminée des trois systèmes puisque les débris d'ébranchage sont souvent humides et contiennent de la terre provenant du débardage. En périodes pluvieuses, la teneur en humidité de la biomasse en bordure de route peut augmenter de façon significative. C'est dans les conditions boréales, caractérisées par de faibles volumes par hectare et de longues distances de transport, que les coûts de production de la biomasse sont les plus élevés.

La composante récolte des bois ronds est une méthode bien éprouvée, mais l'usage de déchiqueteuses mobiles pour récupérer la biomasse n'a pas été pratiqué sur une grande échelle dans l'est du Canada. Quelques essais ont été effectués au Québec et au Nouveau-Brunswick, et certaines opérations à grande échelle ont eu lieu en Nouvelle-Écosse vers la fin des années 1980. Cependant, peu de déchiqueteuses mobiles sont actuellement utilisées pour récupérer la biomasse, et aucune à partir de piles formées en bordure de route par des ébrancheuses (McCallum, 1995).

On constate une tendance à délaissier l'ébranchage en bordure de route pour diverses raisons (Gingras et Ryans, 1992), ce qui réduira à moyen terme la disponibilité des débris d'ébranchage comme source de biomasse.

Récolte en bois tronçonnés intégrée au déchiquetage d'arbres entiers (système 2)

Le système utilisant une ébrancheuse-écorceuse-déchiqueteuse et une broyeuse à cuve produit des copeaux à pâte et un biocombustible de bonne qualité et assez propre. Cependant, les coûts de production de la biomasse sont plutôt élevés sur les deux types de sites. L'usage de remorques à copeaux pour train B entraîne des coûts de transport plus bas que dans les autres systèmes, particulièrement quand les distances de transport augmentent. Les trains B ne peuvent cependant pas être employés dans toutes les régions à cause de restrictions légales ou de conditions difficiles de terrain et de route.

Les broyeuses à cuve sont moins sensibles aux contaminants que les déchiqueteuses à disque ou à tambour. Ce type de récolte intégrée a été utilisé dans le sud des États-Unis, mais il ne l'est pas dans l'est du Canada actuellement. Quelques essais avec une broyeuse à cuve ont été réalisés au Québec et en Ontario au cours des dernières années.

Récolte en bois tronçonnés (système 3)

Le système de récolte en bois tronçonnés est celui qui produit en bordure de route les résidus les moins contaminés, mais à un coût élevé. Le fait de laisser les débris de coupe sur le parterre pendant quelques mois permet au feuillage de tomber sur le sol, réduisant ainsi l'exportation des éléments nutritifs hors du site. Comme on le fait en Suède, les débris peuvent être couverts de bâches en bordure de route pour réduire le plus possible l'absorption d'humidité avant le déchiquetage, produisant ainsi un combustible de plus grande valeur. Cela pourrait aussi se faire avec les résidus de l'ÉÉD dans le système 2.

L'extraction des débris de coupe à l'aide de porteurs ne se fait pas actuellement dans l'est du Canada; il existe donc certains doutes quant à la faisabilité réelle et à la productivité de cette activité. Cependant, cela se pratique couramment en Suède et en Finlande.

Les systèmes de récolte en bois tronçonnés gagnent en popularité (Gingras et Ryans, 1992). En même temps, ces systèmes sont souvent utilisés pour la coupe de peuplements laissés de côté plus près des usines, ce qui pourrait offrir l'occasion de récupérer des débris à des distances de transport assez rapprochées.

Comparaison avec le nord de l'Europe

Finlande⁽¹⁾

En Finlande, l'énergie dérivée du bois représente actuellement 14 % de la consommation d'énergie primaire dans le pays. Environ 25 millions de mètres cubes de bois et d'écorce sont utilisés à des fins énergétiques. Il est important de comprendre que seulement 5 millions de mètres cubes sont sous forme de bois de chauffage ou de copeaux d'arbres entiers. Les 20 millions qui restent représentent des résidus de bois et d'écorce produits par les procédés mécaniques et chimiques de l'industrie forestière. Très peu de résidus de bois et d'écorce restent non utilisés.

Les petites centrales de chauffage (1 à 15 MW-h) constituent les principaux utilisateurs de copeaux comme substitut pour les combustibles fossiles. Mais le coût des copeaux tend à être élevé et la tourbe représente une solution plus économique quand elle est disponible localement. À l'heure actuelle, l'utilisation de bois non marchands est limitée par la technologie et le prix des combustibles fossiles. Un système de récolte intégrée, dans lequel les petits arbres sont utilisés pour la pâte ainsi que comme combustible, est l'avenue la plus prometteuse. Les systèmes suivants de production de biomasse sont en voie de développement en Finlande :

- une abatteuse-groupeuse équipée d'une tête collectrice et une abatteuse-porteuse pour les petits arbres;
- une abatteuse-façonneuse à tête multifonctionnelle pour le façonnage simultané de plusieurs petits arbres;
- des techniques d'écorçage combinant fléaux et tambour pour de petits arbres entiers;
- une déchiqueteuse d'arbres entiers mobile comme la déchiqueteuse Chipset^{MD}; et
- une installation d'amélioration de qualité pour les copeaux contenant de l'écorce (la méthode Massahake^{MD}).

Les débris forestiers provenant de coupes finales constituent actuellement la source la plus économique de biomasse forestière. Les débris de coupe composés de houppiers et de branches sont estimés à 50 m³ dans des peuplements de pin de 200 m³/ha. Dans des peuplements d'épinette, ils peuvent représenter le double de ce volume. La technologie actuelle de récolte ne permet pas d'en récupérer plus de 75 %. Les débris de coupe sont empilés en-dehors du sentier durant le façonnage du bois commercial par l'abatteuse-façonneuse. Un porteur modifié avec un berceau agrandi et un grappin à fourches transporte de 6 à 8 m³ réels de débris en bordure de route après avoir débardé les bois ronds.

La déchiqueteuse mobile est utilisée principalement dans des opérations d'éclaircie après l'abattage manuel. Le coût réel du bois rendu à la centrale de chauffage varie de 55 MF/MW-h (17,60 \$ CAN) pour les copeaux d'énergie provenant de débris de coupe, à 75 MF/MW-h (24,00 \$ CAN) pour des copeaux d'arbres entiers. L'objectif du Programme de recherche sur la bioénergie en Finlande est de réduire le coût à destination à 45 MF/MW-h (14,40 \$ CAN), ce qui permettrait l'usage du biocombustible sur une grande échelle. Ce coût est actuellement atteint quand la distance de transport est inférieure à 60 km entre la forêt et la centrale de chauffage.

⁽¹⁾ Ces commentaires sont basés sur des discussions avec M. Pentti Hakkila, directeur de l'Institut finlandais de recherches forestières, sur des documents connexes (Hakkila, 1995) et sur des visites sur le terrain. Le taux de change utilisé est de 0,32 MF/\$ CAN, et il y a environ 1,3 MW-h par m³.

Suède⁽²⁾

La bioénergie représente 15 % de l'énergie totale requise en Suède. Environ 50 % de ce pourcentage provient de combustibles forestiers, ce qui représente 18 millions de m³ réels, utilisés principalement dans l'industrie forestière, le secteur résidentiel et les réseaux de chauffage urbain. Une politique fiscale incitative encourage fortement l'usage de bois de chauffage comme substitut pour les combustibles fossiles. Le secteur énergétique semble être un marché en croissance pour l'accroissement annuel non utilisé de 30 millions de m³.

Il y a actuellement deux sources principales pour la récolte de bois de chauffage : l'enlèvement des débris de coupe après la récolte finale (c'est la source la plus importante), et l'enlèvement de petits arbres et de sections d'arbres intégré aux opérations d'éclaircie. Le système par sections d'arbres, dans lequel des bois à pâte non ébranchés sont récoltés en longueurs de 5 m, est généralement la méthode la plus coûteuse d'obtenir du bois de chauffage.

La politique fiscale sur les combustibles fossiles, favorable à l'industrie forestière, et les prix élevés des bois à pâte entraînent l'intégration de la récolte du bois de chauffage et des bois à pâte. Quand les prix de ces derniers baissent, le marché des petits arbres comme bois de chauffage devient plus intéressant, d'où habituellement une augmentation du diamètre des houppiers des bois à pâte.

L'enlèvement des débris de coupe après la récolte finale est assez courant en Suède, particulièrement sur les meilleurs sites. Les débris sont ramassés en piles à côté du sentier et, pour éviter de les contaminer de boue, les machines ne circulent pas sur les piles. Celles-ci sont laissées à sécher et perdent leurs aiguilles sur le parterre de coupe. Au début de l'été, les débris sont transportés en bordure de route par le porteur et les piles de 3 à 4 m de hauteur sont couvertes de carton de manière à conserver une faible teneur en humidité avant la fragmentation à la jetée. La productivité de l'abatteuse- façonneuse diminue ainsi de 2 à 6 %, selon la méthode utilisée et les dimensions des arbres. Cependant, la concentration des débris accroît la productivité d'environ 30 % lors de leur débardage.

Le coût moyen d'extraction des débris de coupe lors de la récolte finale varie de 66 à 70 KRS/m³ apparent (13,86 à 14,70 \$ CAN) après le déchiquetage à la jetée et de 94 à 98 KRS/m³ apparent (19,74 à 20,58 \$ CAN) rendu à la centrale de chauffage. Pour réduire le coût du déchiquetage, quelques entrepreneurs transportent les débris non fragmentés à l'utilisateur de bois de chauffage, qui se sert d'une déchiqueteuse industrielle.

La Suède applique des restrictions écologiques à l'enlèvement de combustibles forestiers, sur les sols secs et à faible teneur en éléments nutritifs ou sur d'autres sites

fragiles. Au cours des deux prochaines années, certaines compagnies ont projeté de compenser le sol pour la biomasse enlevée en retournant des cendres de bois sur le parterre de coupe. Dans la partie sud de la Suède, il existe un surplus de terres agricoles. Plusieurs fermiers ont planté du saule qu'ils récoltent après 5 ans pour produire des copeaux d'énergie. Cette source de combustible représente plus de 10 % de l'approvisionnement total de certaines centrales de chauffage.

Autres facteurs affectant la viabilité de la biomasse forestière comme source économique d'énergie

Prix actuels de l'énergie

Les bas prix actuels de divers combustibles, comme le mazout, l'électricité dans certaines régions, et particulièrement le gaz naturel, rendent les biocombustibles non compétitifs économiquement. Aucun changement à court terme n'est anticipé dans la structure de prix des sources traditionnelles d'énergie. Les coûts à destination calculés dans cette simulation dépassent de beaucoup le coût requis pour faire concurrence à ces combustibles.

Disponibilité des résidus d'usine

Les résidus d'usine (écorce, sciure, planures, dosses, etc.) sont aussi une source renouvelable de combustible et font concurrence à la biomasse forestière, mais leur disponibilité varie d'une région à l'autre. À mesure que le facteur de rendement en sciage augmente avec la modernisation des scieries et les exigences du marché, la disponibilité de sciure et d'autres résidus d'usine «propres» diminue. En outre, plusieurs usines de pâte recherchent des sources de fibre additionnelles et paient des prix élevés tant pour les copeaux que pour la sciure. Plusieurs nouvelles usines de panneaux de fibre à densité moyenne (MDF) sont apparues au cours des dernières années et elles absorbent la plus grande partie des planures et de la sciure non utilisée dans leur région. Ces facteurs se combinent pour rendre les résidus d'usine «propres» de moins en moins disponibles comme source d'énergie. L'écorce pourrait maintenant être considérée comme le principal résidu d'usine disponible à des fins énergétiques mais, ici encore, les scénarios de demande sont variables suivant l'aire géographique. Certaines régions produisent des volumes considérables d'écorce, mais elles sont souvent situées dans des endroits éloignés avec de faibles besoins énergétiques et des coûts élevés de transport jusqu'aux marchés potentiels.

⁽²⁾ Le taux de change utilisé est de 0,21 KRS/\$ CAN et il y a 2,5 m³ apparents par m³ réel.

On voit dans certaines régions l'établissement de parcs de marchandisage et de déchetage, où les matériaux non façonnés sont transportés pour y être séparés en produits (billes de sciage, bois à pâte, copeaux à pâte, bois de chauffage) qui sont ensuite redirigés vers divers utilisateurs. Ces usines satellites produisent des quantités considérables d'écorce, alors que leurs besoins énergétiques sont surtout électriques ou basés sur l'utilisation de diesel. Elles peuvent être situées à proximité ou à l'intérieur des villes, ou à des endroits éloignés en forêt.

Régénération des peuplements

Avec l'intégration des opérations de récolte et de renouvellement des forêts, toutes les activités qui ont lieu à la souche doivent être évaluées en rapport avec les prescriptions sylvicoles retenues pour le site récolté. Par exemple, les peuplements d'épinette sur des terres basses en forêt boréale sont souvent récoltés selon des méthodes qui visent à protéger la régénération préétablie et à réduire au minimum les dommages qu'elle subit. Cela se fait généralement en amenant le moins de machines possible sur le parterre de coupe. Cette approche se prêterait sans doute difficilement à la circulation accrue due aux machines de récupération de la biomasse, ou à la récupération des débris de coupe lors d'un second passage, étant donné les dommages additionnels qui seraient infligés à la régénération préétablie.

Des modifications aux systèmes proposés de récolte par arbres entiers et de récolte intégrée des bois courts avec copeaux à pâte pourraient répondre à ces préoccupations en éliminant la récupération des débris sur le parterre, mais cela aurait un effet négatif sur les coûts en réduisant le volume de biomasse disponible par hectare. Le fait d'enlever les débris sur les parterres peut faciliter les activités de préparation de terrain et de plantation là où celles-ci sont nécessaires.

Intégrité des écosystèmes

Les compagnies subissent des pressions en vue de réduire au minimum l'impact des opérations de récolte sur l'intégrité des écosystèmes, ce qui veut dire se tourner vers des systèmes plus discrets, des coupes de moins grande envergure et des machines moins dommageables à l'environnement. L'exportation des débris de coupe hors des sites de récolte va à l'encontre de cette tendance et rencontrerait probablement l'opposition du public. Par exemple, un des atouts du système de récolte en bois tronçonnés (système 3), c'est que les débris demeurent sur le site après la récolte et que les machines circulent sur le tapis formé par ces débris pour réduire les niveaux de perturbation du sol.

Au point de vue biodiversité, l'enlèvement des essences non marchandes (par ailleurs de moins en moins nombreuses) n'est pas une approche suggérée parce que cette pratique risque d'appauvrir la diversité biologique et génétique du peuplement résiduel. Certaines préoccupations relatives à l'exportation des éléments nutritifs ont aussi été exprimées par la communauté scientifique.

La circulation additionnelle des machines sur le parterre de coupe par suite de la récupération de la biomasse peut entraîner une perturbation additionnelle du sol à moins que ces opérations soient réalisées uniquement durant l'hiver, ce qui en augmente le coût.

Procédés d'amélioration de la qualité des résidus (Simco/Ramic^{MD}; Massahake^{MD})

De nouvelles technologies de nettoyage des résidus, comme le procédé Simco/Ramic^{MD} et le procédé Massahake^{MD} (Gingras, 1995) en Finlande, offrent de nouveaux moyens de recycler les matériaux de rebut en copeaux de qualité acceptable pour la pâte. L'introduction d'installations capables d'améliorer la qualité des copeaux à l'échelle commerciale permettrait d'obtenir de fortes quantités de sous-produits combustibles, qui seraient disponibles comme source d'énergie beaucoup moins chère que la biomasse en forêt. Par contre, ces systèmes peuvent fournir un autre usage pour les résidus de qualité inférieure et réduire ainsi leur disponibilité générale comme biocombustible.

Conclusions

Les trois scénarios de récolte ont donné des coûts de biomasse, à destination, qui sont élevés en regard de la valeur actuelle du marché pour les biocombustibles, même si la biomasse était récupérée en même temps que d'autres produits de bois ronds, selon une approche intégrée. Avec les trois systèmes de récolte et les deux types de sites considérés dans l'étude, les coûts de la biomasse à destination variaient entre 26 \$ et 41 \$ par tmv environ. Les prix des billes de sciage et des copeaux à pâte à destination semblaient réalistes, ce qui indique que l'approche et les hypothèses posées dans l'analyse étaient correctes.

Dans l'étude, des hypothèses spécifiques concernant les conditions du site et les distances de transport ont été retenues pour les deux scénarios de site. Il peut exister d'autres situations où la combinaison d'une pénurie de résidus d'usine, d'une forte demande de résidus combustibles, d'une courte distance jusqu'au parterre de coupe et de la disponibilité de machines de récolte adéquates rendrait la récolte et le transport de biomasse à des fins énergétiques une option économiquement réalisable.

Bibliographie

- Belli, M.L.;** Watson, W.F. 1994. Comminution of residues from flail operations in the United States. p. 9-16. Dans : J.B. Hudson, J.F. Gingras et A. Twaddle, Éd. [Proceedings] IEA/BA Task IX [Symposium], 16-25 mai 1993, Fredericton, N.-B. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1994:1. 91 p.
- Bjorheden, R.** 1990. Truck hauling in integrated harvesting systems. p. 53-61. Dans : J.B. Hudson, Éd. IEA/BA Task VI, Activity 2 Workshop, Copenhagen, Danemark. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1990:2.
- Brunberg, B.** 1994. Operating forest fuel harvesting systems in Sweden. Skogforsk, Uppsala, Suède. Results no. 4. 4 p.
- De Franceschi, J.P.** 1991. Economics of utilizing wood waste for energy. p. 124-140. Dans : H. Knutell, Éd. Economics of wood energy supply systems. IEA/BA Task VI, Activity 7 [Symposium], 20-24 mai 1991, Bergen, Norvège. Swedish Univ. Agric. Sci., Dep. Oper. Efficiency, Garpenberg, Suède. Res. Note 219/1991. 255 p.
- Desrochers, L.** 1993. Utilisation d'une broyeuse à cuve pour la récupération des résidus d'ébranchage et d'ébranchage-écorçage. Inst. can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe-Claire, Qué. Fiche tech. FT-209. 8 p.
- Desrochers, L.;** Puttock, D.; Ryans, M. 1992. The economics of chipping logging residues at roadside. p. 12-26. Dans : J.B. Hudson, Éd. IEA/BA Task IX, Activity 2, Integrated harvesting systems workshop, 18-22 mai 1992, Finlande de l'est. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1992:4. 54 p.
- Favreau, J.;** Franklin, G.S. 1993. La production de billes de sciage dans un système de déchetage en forêt. Inst. can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe-Claire, Qué. Fiche tech. FT-206. 8 p.
- Gingras, J.-F.** 1995. Nouveaux développements dans les technologies de nettoyage des copeaux et de récolte en bois tronçonnés en Finlande. Inst. can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe-Claire, Qué. Rap. interne RI-1995-06-01. 9 p.
- Gingras, J.-F.;** Ryans, M. 1992. Besoins futurs en équipements forestiers dans l'est du Canada : 1992-2001. Inst. can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe-Claire, Qué. Fiche tech. FT-193. 8 p.
- Hakkila, P.** 1995. Procurement of timber for the Finnish forest industries. Finnish For. Res. Inst., Helsinki, Finlande. Metsantutkimuslaitoksen Tiedonantoja 557. 73 p.
- Hankin, C.;** Mitchell, C.P. 1994. Woody biomass transportation systems. p. 65-75. Dans : J.B. Hudson, J.F. Gingras et A. Twaddle, Éd. [Proceedings] IEA/BA Task IX [Symposium], 16-25 mai 1993, Fredericton, N.-B. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1994:1. 91 p.
- Hassler, C.C.;** Sinclair, S.A.; Blinn, C.R. 1983. A low cost way to recover logging residues. For. Prod. J. 33(3):19-25.
- Hudson, J.B.;** Mitchell, C.P.; Storry, P.G.S. 1991. Costing integrated harvesting systems for wood supply. p. 111-123. Dans : H. Knutell, Éd. Economics of wood energy supply systems. IEA/BA Task VI, Activity 7 [Symposium], 20-24 mai 1991, Bergen, Norvège. Swedish Univ. Agric. Sci., Dep. Oper. Efficiency, Garpenberg, Suède. Res. Note 219/1991. 255 p.
- Larsson, M.** 1980. Development of transportation systems for logging residues, stumps and trees in Sweden. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, Stockholm, Suède. Rep. No. 3E. 8 p.
- Lussier, L.J.;** Boutin, R. 1995. Analyse de la production intégrée de biomasse forestière et de bois de commerce. Service canadien des forêts. Région du Québec. Rap. d'inf. LAU-X-000112. 79 p.
- McCallum, B.** 1995. A review of small tree and forest residue harvesting in Atlantic Canada. p. 50-62. Dans : J.-F. Gingras, Éd. IEA Task IX Activity 3 1994 Norway workshop proceedings : Harvesting small trees and forest residues. Inst. can. de rech. en génie for. (FERIC), Pointe-Claire, Qué. Rap. interne IR-1995-01-02.
- Miller, D.E.;** Straka, T.J.; Stokes, B.J.; Watson, W.F. 1987. Productivity and cost of conventional understory biomass harvesting systems. For. Prod. J. 37(5):39-43.
- Nilsson, P.O.** 1983. Energy from the forest. Swedish Board of Energy Production. Research Results NE 1983:9.
- Persson, J.** 1994. Removal of wood fuel during early thinnings. p. 56-64. Dans : J.B. Hudson, J.F. Gingras et A. Twaddle, Éd. [Proceedings] IEA/BA Task IX [Symposium], 16-25 mai 1993, Fredericton, N.-B. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1994:1. 91 p.
- Puttock, G.D.** 1989. An international review of integrated harvesting systems. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1989:4. 64 p.
- Stokes, B.J.** 1992. Harvesting small trees and forest residues. Final report to the IEA/BA Task VI Activity 3. USDA For. Serv., Southern For. Exp. Station, Auburn, AL.
- Stuart, W.B.;** Porter, C.D.; Walbridge, T.A.; Oderwald, R.G. 1981. Economics of modifying harvesting systems to recover energy wood. For. Prod. J. 31(8):37-42.
- Sturos, J.A.;** Barron, R.M.; Miyata, E.S.; Steinhilb, H.M. 1983. The economics of a mechanized multiproduct harvesting system for stand conversion of northern hardwoods. USDA For. Serv., St. Paul, Minn. Res. Paper NC-257. 12 p.
- Watson, W.F.;** Twaddle, A.A. 1990. An international review of chain flail delimiting-debarking. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1990:3. 28 p.
- Wigren, C.** 1994. Integrated harvesting systems: a review of fuelwood logging. p. 40-64. Dans : J.B. Hudson, J.F. Gingras et A. Twaddle, Éd. [Proceedings] IEA/BA Task IX [Symposium], 16-25 mai 1993, Fredericton, N.-B. Aberdeen University, Aberdeen, Écosse. For. Res. Paper 1994:1. 91 p.

Annexe

Tableaux montrant les hypothèses posées dans le modèle

Tableau A-1. Coût horaire pour les machines de récolte

	Abatteuse- groupeuse	Débardeur à grappin	Ébran- cheuse à flèche	Façonneuse	Abatteuse- façonneuse	Porteur	ÉÉD	□Déchi- queteuse mobile	Déchi- queteuse en bordure de route	Broyeuse à cuve
Données relatives au coût de fonctionnement										
Vie économique de la machine (années)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Heures-machines prévues (HMPv)/an	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600
Prix d'achat (\$)	420 000	180 000	300 000	475 000	500 000	300 000	525 000	620 000	400 000	346 500
Valeur résiduelle (\$)	42 000	18 000	30 000	47 500	50 000	30 000	52 500	62 000	40 000	34 650
Assurance et immatriculation (\$/an)	21 000	9 000	15 000	23 750	25 000	15 000	26 250	31 000	20 000	5 000
Taux d'intérêt (%)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Taux d'utilisation (%)	80	80	80	75	70	80	70	70	70	70
Coûts de réparation à vie (\$)	420 000	162 000	300 000	593 750	625 000	300 000	787 500	775 000	500 000	433 000
Consommation de carburant (L/HMP)	25	16	25	25	25	14	100	40	64	68
Prix du carburant (\$/L)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Huile et lubrification (\$/HMP)	4,38	2,80	4,38	4,38	4,38	2,45	17,50	7,00	11,20	11,90
Salaire de l'opérateur (\$/HMPv)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Coût total (\$/HMP)	110,67	63,24	89,94	136,10	141,17	84,16	205,53	184,25	149,06	134,65

Tableau A-2. Coût horaire pour les machines de transport

	Camion	Remorque (48 pi)	Remorque (train B)	Chargeuse (en forêt)	Chargeuse (parc d'usine)
Données relatives au coût de fonctionnement					
Vie économique de la machine (années)	8	9	9	5	5
Heures-machines prévues (HMPv)/an	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600
Prix d'achat (\$)	100 000	30 000	55 000	350 000	350 000
Valeur résiduelle (\$)	10 000	6 000	11 000	70 000	70 000
Immatriculation (\$/an)	2 500	0	0	8 750	8 750
Assurance (\$/an)	2 500	1 500	2 750	8 750	8 750
Taux d'intérêt (%)	10	10	10	10	10
Taux d'utilisation (%)	90	90	90	75	90
Coûts de réparation à vie (\$)	100 000	30 000	55 000	350 000	350 000
Consommation de carburant (L/HMP)	55	0	0	30	30
Prix du carburant (\$/L)	0,55	0,35	0,35	0,35	0,35
Huile et lubrification (\$/HMP)	3,03	0,00	0,00	5,25	5,25
Salaire de l'opérateur (\$/HMPv)	20,00	0,00	0,00	20,00	20,00
Total (\$/HMP)	66,41	2,96	5,43	104,77	89,94

Tableau A-3. Hypothèses relatives au transport routier

	Remorque (48 pi)			Remorque de train B	
	Bois ronds	Biomasse- système 1	Biomasse- système 3	Copeaux à pâte	Biomasse
Données de transport					
Charge brute (m ³)	42,00	35,00	35,00	50,00	50,00
Facteur de contamination (saletés) ^a	1,00	1,03	1,00	1,00	1,02
Charge nette (m ³)	42,00	33,95	35,00	50,00	49,00
Chargement (m ³ /HMP) - boréal	80	270 ^b	30	40	20
- acadien	80	270	30	40	20
Déchargement (m ³ /HMP)	120	500	500	500	500
Vitesse (km/h) - boréal	55	55	55	55	55
- acadien	65	65	65	65	65
Densité (kg/m ³) - boréal	750	750	750	750	750
- acadien	800	800	800	800	800
Distance aller-retour (km) - boréal	280	280	280	280	280
- acadien	200	200	200	200	200
Productivité (m ³ /HMP) - boréal	7,04	6,42	5,53	7,76	6,41
- acadien	10,63	10,38	8,11	11,29	8,71

^a Pour obtenir la charge nette, diviser la charge brute par ce facteur.

^b La productivité au chargement est basée uniquement sur le temps pris par le camion pour accrocher la remorque de 48 pi, qui est chargée pendant qu'elle est en attente par la déchiqueteuse mobile. Il faut par conséquent imputer deux remorques de 48 pi par camion à ce système de transport.