

EXÉCUTION DE
TRAVAUX SYLVICOLES
ET UTILISATION
À DES FINS ÉNERGÉTIQUES
DE LA BIOMASSE RÉCOLTÉE

par: J. Maranda
J. Bouchard
J. Dunnigan
et T. Rycabel

recherche

JACQUES MARANDA, ingénieur forestier, est bachelier ès sciences forestières de l'Université Laval depuis 1966 et détient une maîtrise en Génie industriel de l'Université de Toronto depuis 1969. Après avoir été professeur en opérations forestières à la Faculté de foresterie de l'Université Laval, il y est encore chargé de projets de recherches dans le même domaine. Il est présentement à l'emploi d'une firme d'ingénieurs forestiers-conseils.

JOSÉ BOUCHARD, ingénieur forestier, détient un B.Sc.f. de la Faculté de foresterie de l'Université Laval depuis 1983. Au moment où il participait à la recherche décrite dans le présent mémoire, il était étudiant à la maîtrise ès sciences forestières. Il est présentement à l'emploi des *Produits Forestiers Domtar* à Dolbeau.

JEAN DUNNIGAN, ingénieur forestier, détient un B.Sc.f. de la Faculté de foresterie de l'Université Laval depuis 1984 et un M.Sc.f. du même établissement depuis décembre 1987. Il est à l'emploi de l'Institut de recherches en génie forestier du Canada (*FERIC*) à Pointe-Claire.

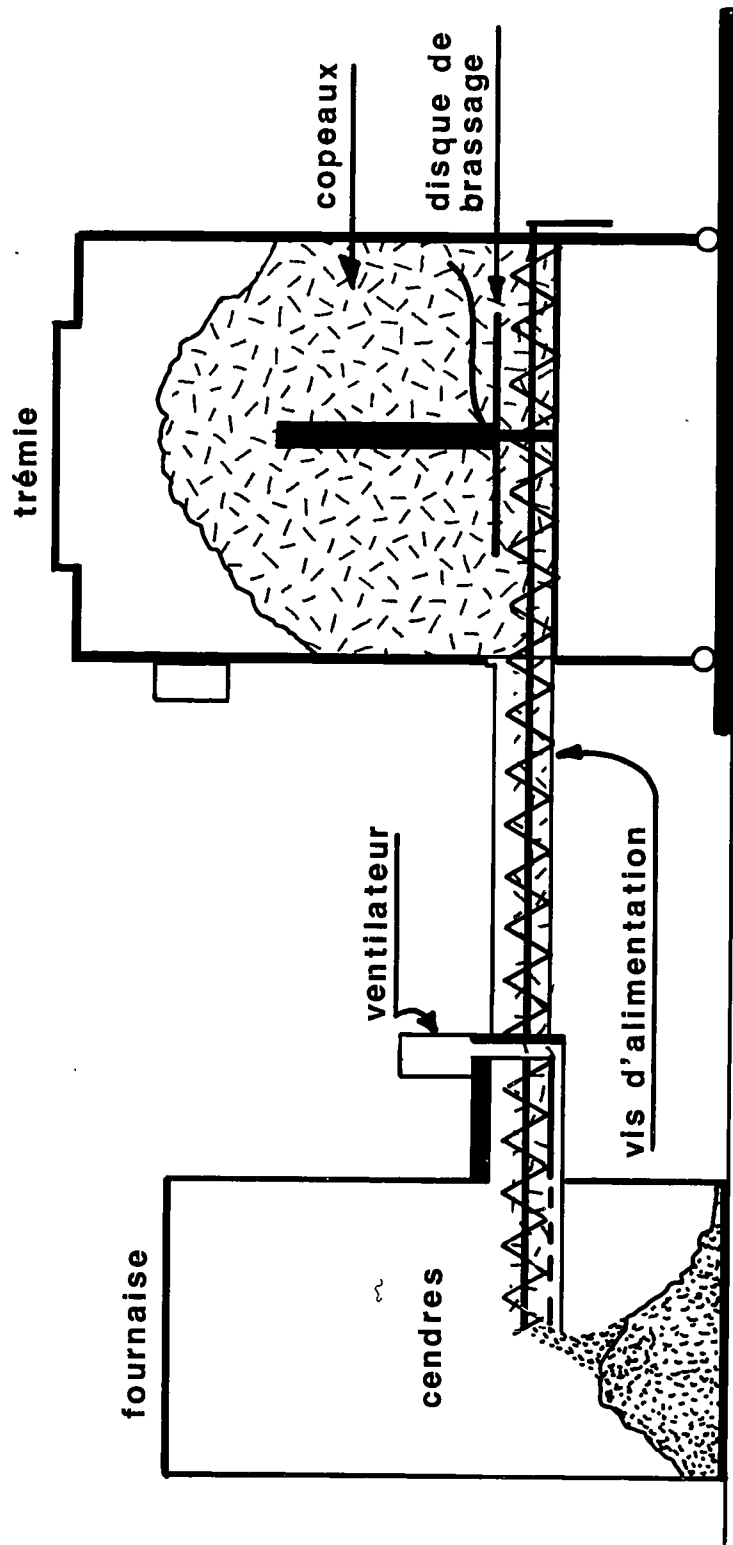
TADEUSZ RYCABEL, ingénieur forestier, est diplômé (1972) et maître ès Sciences en opérations forestières (1978) de l'Académie d'agriculture de Pologne à Cracovie. En novembre 1989, la Faculté de foresterie de l'Université Laval lui a décerné le diplôme de maître ès sciences forestières. Il est chargé de recherches en opérations forestières à la Forêt Montmorency de l'Université Laval.

Depuis de nombreuses années, chacun des Mémoires et des autres rapports publiés par la Recherche forestière est révisé par un comité *ad hoc* d'au moins trois membres recrutés aussi bien à l'intérieur du Ministère que dans le milieu universitaire, la fonction publique fédérale ou les autres milieux de la recherche. Les responsables de la Recherche remercient les scientifiques qui ont accepté bénévolement de revoir le texte présenté ici et de participer ainsi à la diffusion des résultats des recherches menées au ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts).

Les publications de la Recherche forestière sont produites et diffusées à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation de chaque projet ou expérience. En conséquence, ces documents sont, par définition, à *tirage limité* et à *diffusion restreinte*. Adresser toute demande au:

Service du transfert de technologie
Ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts)
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec)
Canada G1P 3W8

**Exécution de travaux sylvicoles
et utilisation à des fins énergétiques
de la biomasse récoltée**



**Exécution de travaux sylvicoles et utilisation
à des fins énergétiques de la biomasse récoltée**

**Étude réalisée dans le cadre du Programme de recherches
en sylviculture et en mécanisation forestière
dans le contexte des forêts privées**

par

Jacques Maranda, ing.f., M.Sc.A.
professeur en Opérations forestières

José Bouchard, ing.f.

Jean Dunnigan, ing.f.

et

Tadeusz Rycabel, ing.f.

étudiants gradués

Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval

Mémoire n^o 100

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts)
Direction de la recherche et du développement
Service de la recherche appliquée
1990

Ce texte de mars 1987, révisé en 1989, est un rapport partiel
du projet de recherche R82418 (anciennement TP-Ex 83-1)
subventionné par le ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts).

ISBN 2-550-20804-8
Dépôt légal – Deuxième trimestre 1990
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
© – Gouvernement du Québec 1990

Résumé

L'importance de la biomasse forestière n'est plus à démontrer, étant l'un des sujets de recherche importants auxquels se livrent actuellement plusieurs secteurs de l'industrie forestière. On reconnaît de cette façon davantage aujourd'hui non pas seulement la nécessité de mieux aménager nos forêts mais aussi d'en arriver à une meilleure utilisation de la matière ligneuse. L'industrie utilisatrice de la ressource forestière a déjà commencé à réagir à cela en s'efforçant de trouver des moyens satisfaisants à une meilleure utilisation de la ressource.

Cependant, en forêt, la matière ligneuse non marchande, y compris les résidus de coupe, est presque toujours laissée pour compte. C'est en réaction à cet état de fait et dans une optique de valorisation et d'un meilleur usage de la ressource que s'inscrivent les travaux décrits dans le présent rapport.

Ainsi, dans le cadre d'un récent programme de recherches en opérations forestières, des travaux sylvicoles ont été réalisés de façon à récupérer au maximum la biomasse non commerciale qu'ils génèrent. Cette étude, se déroulant à la Forêt Montmorency¹, dans de jeunes sapinières, poursuit un objectif général et deux objectifs spécifiques.

Objectif général:

Acquérir une expertise en vue d'améliorer les méthodes de récolte et d'encourager un meilleur usage de la biomasse non commerciale générée par des travaux sylvicoles dans de jeunes peuplements.

Objectifs spécifiques:

- 1) évaluer la productivité et les coûts de la récolte;
- 2) obtenir des données de base sur l'utilisation de cette biomasse à des fins énergétiques et industrielles.

La récolte s'est effectuée dans deux peuplements de sapin baumier de 40 ans comptant entre 10 et 20 p. 100 de mortalité. La quantité de biomasse qu'ils contiennent est d'environ 256 tonnes vertes par hectare mais n'est pas répartie de la même manière dans les deux peuplements puisque l'un d'eux supporte 21 900 tiges par hectare et l'autre, 9800 tiges par hectare. Ces peuplements sont localisés dans deux secteurs différents, lesquels ont été divisés en bandes de 20 mètres de largeur, dont certaines ont été coupées à blanc et d'autres, éclaircies.

Les travaux de coupe ont été effectués manuellement à l'aide d'une scie à chaîne. Les arbres abattus étaient mis en tas de façon à être ensuite repris et débordés par un *F-4 Dion*. La partie considérée comme marchande des tiges a été tronçonnée en billes de bois à pâte.

Le sommaire des observations de récolte par secteur est le suivant:

La partie non marchande de la biomasse, c'est-à-dire celle que nous voulons utiliser à des fins énergétiques et industrielles, a été pesée après son transport vers le lieu de transformation. La valeur obtenue par pesage s'est révélée être 25 p.100 inférieure à celle établie d'après les données d'inventaire.

Cette différence est attribuable aux tiges mortes, aux pertes lors de la manutention et à la précision de l'inventaire et de la pesée.

Le coût des travaux sylvicoles a varié entre 9 \$ et 25 \$ par tonne anhydre² pour la coupe et entre 14 \$ et 16 \$ par tonne anhydre pour le débordage. La variation dans le premier cas est attribuable au nombre de tiges/ha pour chaque secteur. Ces coûts peuvent

1 Forêt expérimentale de l'Université Laval.

2 Biomasse marchande et non marchande.

	Secteur Laflamme		Secteur Joncas	
	c. à blanc	éclaircie	c. à blanc	éclaircie
Superficie traitée (m ²)	1 143	757	1 783	894
Récolte (tiges)	2 274	1 639	2 123	819
Temps productif (heures)	13,8	9,0	16,7	5,2
Productivité:				
● superficie/heure (m ²)	83	84	107	172
● tiges/heure	165	182	127	157
● masse verte/heure (kg)	2 043	1 400	2 735	2 154
Masse verte/ha (kg/ha)	257 490	257 490	256 219	256 219
Biomasse récoltée (kg)	29 430	11 740	45 680	11 860
Moins bois marchand (kg)		5 190		6 710
Biomasse nette (verte, kg)		35 980		50 830

paraître élevés; toutefois, il ne faut pas oublier le caractère expérimental de ces travaux associé au fait que le volume des tiges exploitées est très faible.

Afin d'utiliser la biomasse non marchande à des fins énergétiques, nous l'avons réduite en copeaux à l'aide d'une déchiqueteuse transportable. Au total, 53 mètres cubes de copeaux ont été produits et entreposés, ce qui a nécessité 12 heures/homme et 3,5 heures/machine.

Pour la combustion des copeaux, une chaudière (« fournaise ») au bois conventionnelle a été convertie, à l'automne 1984, par l'addition d'un foyer mécanique, d'un système d'alimentation et d'une trémie. Cette trémie, d'un volume de 1,4 mètres cubes, permet d'alimenter continuellement la fournaise pendant 24 heures avec 188 kilogrammes de copeaux de sapin baumier à 30 p. 100 d'humidité. Durant l'hiver 1984-85, des tests de puissance et de rendement ont été conduits avec ce combustible. La fournaise a alors produit 23 kilowatts (1,38 mégajoules par minute ou 78 000 BTU par heure) nets pour un rendement thermique global de 73 ± 12 p. 100.

Nous avons observé que le rendement thermique global pouvait varier avec la teneur en humidité.

Ainsi, nous avons obtenu des rendements se situant entre 59 et 108 p. 100 avec des copeaux dont l'humidité variait entre 22 et 68 p. 100. Dans certains cas, le rendement a pu être surévalué lors de la combustion de copeaux gelés qui ont, dans ce cas, un pouvoir calorifique accru. C'est ce qui explique que l'on mesure parfois des rendements supérieurs à 100 p. 100.

Une comparaison de ce combustible avec le mazout à chauffage nous permet de constater que 1 litre d'huile équivaut à 2,9 kilogrammes de copeaux de bois à 22 p. 100 d'humidité. Cette quantité varie avec la teneur en humidité des copeaux en question.

La récupération de la biomasse non commerciale issue de travaux sylvicoles semble prometteuse du fait qu'elle peut avantageusement servir à des fins énergétiques. D'autres travaux devraient faire suite à la présente recherche afin de répondre à d'autres questions que suscite cette approche, soit:

- mieux connaître la productivité et les coûts des travaux sylvicoles en fonction des conditions variables des peuplements et des divers niveaux d'intervention;
- évaluer le potentiel énergétique d'autres essences forestières et à divers taux d'humidité.

Summary

The growing importance of forestry biomass is well accepted, and many research projects are carried out by industry groups on its utilization. In this respect, it is recognized that our forests should be managed so that maximum utilization of biomass become possible. Wood-using industry has already reacted by making a better use of the resources available and of wood waste.

However, very little use of logging residues and non-merchantable material is being made. In reaction to this situation, a research program has been undertaken to increase value and find some industrial utilization of this fiber.

The main purpose of this logging operation research program is to carry out silviculture treatments associated with maximum biomass recovery. This study has been undertaken at the Forêt Montmorency¹ in young balsam stands; it follows two objectives; one general and two specific.

General objective:

To develop means of improving logging methods in order to increase the use of non-commercial biomass generated by the treatment of young softwood stands.

Specific objectives:

- 1) evaluate productivity and costs of logging operations:*
- 2) gather information on the use of biomass at an industrial level and for the production of energy.*

Logging operations have been undertaken in two 40-year-old balsam-fir stands holding 10 to 20 p. 100 mortality. Both stands supported approximately 256

green tons of biomass per hectare with differences in stocking, one with 21 900 stems per hectare and the other with 9 800. These stands are located in two different sectors. Each sector has been divided into strips 20 meters wide which have been either clear cut or partially cut.

Cutting was done manually with a chain saw. Fallen trees with branches have been stacked and forwarded at roadside with a F-4 Dion tracked forwarder. Trees larger than 9 centimeters in diameter (D.B.H.) have been converted into pulpwood.

The informations gathered during these experiments are as follows:

Non-merchantable biomass, which may be used for industry or energy purpose, has been weighted after transportation. Total weight found has been 25 p. 100 inferior to the values obtained from inventory. This difference was attributed to dead stems, losses during handling and precision of inventory and scaling.

Costs of treatments varied between 9 and 25 dollars per bone-dry ton² for cutting and between 14 and 16 dollars for the forwarding. Variations in the cutting operations are attributed to the differences in stems per hectare between sectors. These costs may look high, but one must not forget that work was undertaken on an experimental basis and that volume per stem is very small.

In order to utilize unmerchantable biomass for energy, trees have been chipped with a portable chipper. A total of 53 cubic meters of chips have been produced and stored, which necessitated 12 man/hours and 3.5 machine/hours.

¹ Laval University forest station, located 80 kilometers north of Québec City.

² Merchantable and non-merchantable biomass.

	Laflamme Sector		Joncas Sector	
	Clear cut	Partial cut	Clear cut	Partial cut
Area treated (m ²)	1 143	757	1 783	894
Stems salvaged	2 274	1 639	2 123	819
Productive time (h)	13,8	9,0	16,7	5,2
<i>Productivity:</i>				
● area/h (m ²)	83	84	107	172
● stems/h	165	182	127	157
● green weight/h (kg)	2 043	1 400	2 735	2 154
Green biomass/ha (kg/ha)	257 490	257 490	256 219	256 219
Total biomass salvaged (kg)	29 430	11 740	45 680	11 860
Less merchantable wood (kg)		5 190		6 710
Net biomass (green kg)		35 980		50 830

For the combustion of chips, a conventional wood furnace was modified in the fall of 1984 by the addition of a mechanical burner, a feeding mechanism and a storage bin.

The bin, with a 1.4 cubic meter storage capacity, contains enough chips to feed the furnace for 24 hours with 188 kilograms of balsam fir at 30 p. 100 moisture content. During the winter of 1984-85, power and yield tests have been conducted with these chips. The energy generated by the furnace has been 23 net kilowatts (1.38 megajoules per minute or 78 000 BTU per hour) with a thermal yield of 73 ± 12 p. 100.

It has been observed that the thermal yield varies with moisture content; in fact, it ranged between 59 and 108 p. 100 with moisture contents between 22 and 68 p. 100. Yield over 100 p. 100 was found with frozen chips.

A comparison of this fuel with heating oil leads to the conclusion that 1 liter of oil is equivalent to 2.9 kilograms of softwood chips at 22 p. 100 moisture content.

Salvaging of unmerchantable biomass issued from silviculture work looks promising, due to the fact that it may be used advantageously for energy purpose. Other research experiments should be carried out in order to bring some answers to our questions, such as:

- *a better knowledge of productivity and costs of silvicultural treatments in relation to various stand conditions and levels of intervention;*
- *an evaluation of energy potential of other forest species with different moisture content levels.*

Table des matières

Résumé	v
<i>Summary</i>	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xiii
Introduction	1
Chapitre premier	
Description des secteurs servant à l'expérimentation	3
1.1 Localisation des sites et des bandes traitées	3
1.2 Relevés dendrométriques	3
1.2.1 Avant traitement	3
1.2.2 Après traitement	7
1.3 Évaluation du stock ligneux	7
Chapitre II	
Réalisation des travaux sylvicoles	9
2.1 Description des étapes de travail	9
2.2 Résultats portant sur les opérations de coupe	9
2.3 Résultats portant sur les opérations de débardage	15

2.4 Évaluation de la biomasse récoltée	16
2.5 Productivité et coût des travaux sylvicoles	16

Chapitre III

Utilisation de la biomasse à des fins énergétiques	19
3.1 Étapes du travail	19
3.2 Déchiquetage de la biomasse	19
3.3 Quelques caractéristiques des copeaux	22
3.3.1 Pouvoir calorifique des copeaux	22
3.3.2 Teneur en humidité des copeaux	23
3.4 Description des installations	23
3.5 Puissance calorifique de la fournaise	29
3.6 Rendement de la fournaise	33
3.7 Expérience de chauffage aux copeaux à la Forêt Montmorency	33
3.7.1 Masse de copeaux brûlés	33
3.7.2 Énergie produite	34
3.7.3 Comparaison avec la valeur énergétique du mazout à chauffage	35
Conclusion	37
Ouvrages cités	39

Liste des tableaux

Tableau 1	Répartition du nombre de tiges à l'hectare avant traitement, secteur Joncas	6
Tableau 2	Répartition du nombre de tiges à l'hectare avant traitement, secteur Laflamme	6
Tableau 3	Répartition des tiges résiduelles dans les bandes éclaircies (tiges/hectare)	7
Tableau 4	Masse verte à l'hectare (kg/ha) par secteur, par essence et groupe d'essences	8
Tableau 5	Masse verte résiduelle (kg/ha) par essence dans les bandes éclaircies	8
Tableau 6	Répartition des travaux sylvicoles selon les bandes	9
Tableau 7	Sommaire des observations par secteur et par traitement	13
Tableau 8	Équations de prédiction du nombre de tiges coupées et assemblées en fonction du temps productif	14
Tableau 9	Temps d'ébranchage, de tronçonnage et d'empilage de billes commerciales (1,22 mètre de longueur)	14
Tableau 10	Distance et temps de débardage de la biomasse par voyage et par secteur et répartition du temps par élément de travail	15
Tableau 11	Détermination de la biomasse récoltée	17

Tableau 12	Productivité et coûts estimés des travaux sylvicoles	18
Tableau 13	Résultats obtenus lors du déchiquetage	21
Tableau 14	Pouvoir calorifique des copeaux en fonction de leur teneur en humidité	24
Tableau 15	Vitesse de l'air en différents points de la section de l'embouchure #1 du système de ventilation	30
Tableau 16	Vitesse de l'air en différents points de la section de l'embouchure #2 du système de ventilation	30
Tableau 17	Relevé de la vitesse de l'air à la sortie du système	32
Tableau 18	Comparaison du pouvoir calorifique des copeaux avec la puissance calorifique déployée par la fournaise pour la détermination de son rendement thermique global	34
Tableau 19	Masse verte de copeaux nécessaire pour équivaloir à un litre de mazout à chauffage	35

Liste des figures

Figure 1	Forêt Montmorency	2
Figure 2	Secteur du lac Joncas	4
Figure 3	Secteur du lac Laflamme	5
Figure 4	Étapes de la récolte de la biomasse	10
Figure 5	Étapes de la récolte de la biomasse (suite)	11
Figure 6	Étapes de la récolte de la biomasse (fin)	12
Figure 7	Déchiqueteuse <i>Fontes P.N.S.</i> , Modèle <i>Castor 10</i>	20
Figure 8	Déchiqueteuse <i>Hakki KRR</i>	20
Figure 9	Alimentation de la déchiqueteuse	21
Figure 10	Distribution des diamètres à hauteur de poitrine des tiges qui ont été transformées en copeaux	22
Figure 11	Pouvoir calorifique des copeaux en fonction de leur teneur en humidité	25
Figure 12	Vis d'alimentation acheminant les copeaux du réservoir extérieur jusqu'à la trémie	26

Figure 13	Trémie et conduit d'acheminement des copeaux vers le foyer mécanique	27
Figure 14	Ventilateur réglable alimentant le foyer en oxygène	27
Figure 15	Intérieur de la « fournaise » montrant le brûleur et la section de la vis d'alimentation servant à l'évacuation des cendres	28
Figure 16	Foyer mécanique en action	28
Figure 17	Appareil <i>Datametrics</i> servant à mesurer la vitesse de l'air en un point bien précis	31
Figure 18	Embouchures du système de ventilation	31

Introduction

L'importance de la biomasse forestière n'est plus à démontrer, étant l'un des sujets de recherche importants auxquels se livrent actuellement plusieurs secteurs de l'industrie forestière. On reconnaît de cette façon davantage aujourd'hui, non pas seulement la nécessité de mieux aménager nos forêts mais aussi celle d'en arriver à une meilleure utilisation de la matière ligneuse. L'industrie utilisatrice de la ressource forestière a déjà commencé à réagir à cela en s'efforçant de trouver des moyens satisfaisant à une meilleure utilisation de la ressource.

Dans le cadre d'un nouveau programme de recherches en opérations forestières, on a entrepris des travaux sylvicoles dans des peuplements jeunes constitués principalement de sapin baumier à différents niveaux de densité.

La mise en valeur de cette biomasse ne saurait se réaliser sans la démonstration de méthodes pratiques et économiques de récupération et d'utilisation.

L'étude faisant l'objet de ce rapport est conçue comme une contribution aux efforts de mise en valeur de la matière ligneuse. Les travaux effectués consistent en la récolte de la matière ligneuse (marchande et non marchande) issue de divers traitements sylvicoles et en son utilisation à des fins énergétiques et pour la production de pâte.

* * *

Cette étude poursuit un objectif général et deux objectifs spécifiques.

Objectif général:

Acquérir une expertise en vue d'améliorer les méthodes de récolte et d'encourager un meilleur usage de la biomasse non commerciale générée par des travaux sylvicoles dans de jeunes peuplements.

Objectifs spécifiques:

- 1) évaluer la productivité et les coûts de la récolte;
- 2) obtenir des données de base sur l'utilisation à des fins énergétiques et industrielles de cette biomasse.

Sur ce dernier plan, la transformation des tiges non commerciales en copeaux utilisables comme combustible a été expérimentée. La forêt Montmorency a également prêté son concours au volet énergétique en convertissant une de ses unités de chauffage au bois pour en faire un appareil utilisant des copeaux de bois avec alimentation automatique.

De ces réalisations, nous pouvons déjà mieux comprendre la portée et les possibilités qu'offre la biomasse non commerciale dans l'acquisition de pratiques visant la valorisation et l'utilisation optimale de la ressource forestière québécoise.

Cette expérience, réalisée à la Forêt Montmorency (figure 1) de l'Université Laval à l'automne 1983, a été voulue comme point de départ du programme de recherches en sylviculture et en mécanisation des travaux sylvicoles qui peuvent être appliqués en forêt privée. Divers équipements et techniques de travail seront analysés et expérimentés dans le cadre de ce programme de recherche, lequel a pu être mis de l'avant grâce à l'assistance financière du ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.

Le présent document se divise en trois parties principales. La première fait une description des secteurs où les expériences ont été effectuées ainsi qu'une évaluation du potentiel ligneux. La deuxième décrit les travaux sylvicoles effectués et présente les résultats des observations de ces travaux et l'analyse des résultats obtenus. Enfin, la troisième partie traite de la conversion de la biomasse non commerciale en copeaux et évalue les premières expériences d'utilisation de cette biomasse à des fins énergétiques.

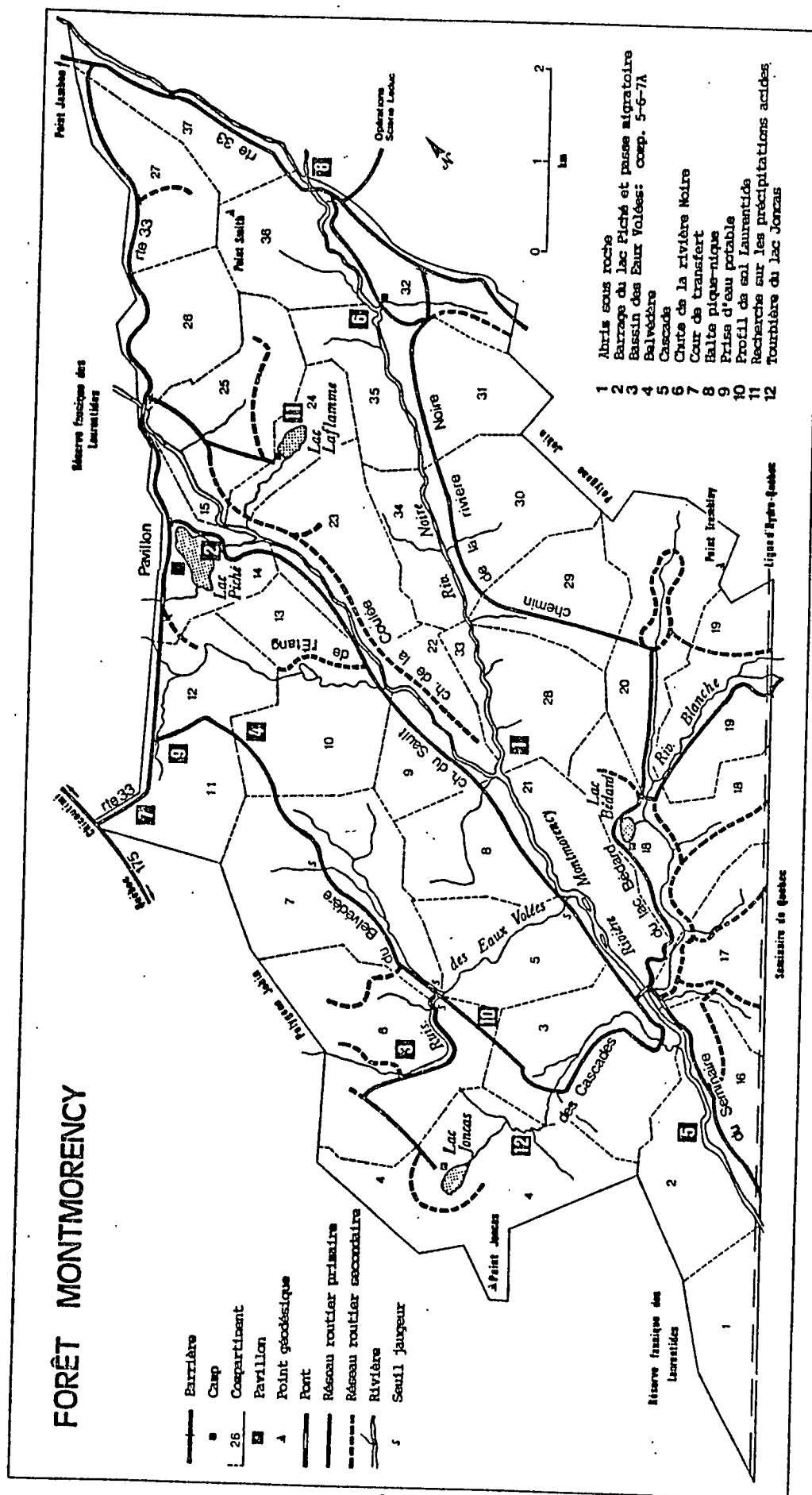


Figure 1. Forêt Montmorency

Chapitre premier

Description des secteurs servant à l'expérimentation

1.1 Localisation des sites et des bandes traitées

Les travaux sylvicoles ont été effectués à la forêt Montmorency (station expérimentale de l'université Laval) située à environ 60 km au nord de Québec, au cours des mois de septembre et octobre 1983 (voir figure 1). La récolte de la biomasse et le chronométrage des opérations se sont déroulés sur deux sites expérimentaux supportant des sapinières différemment constituées. Les deux sites choisis sont situés dans les secteurs du lac Joncas et du lac Laflamme.

Dans le secteur du lac Joncas, le peuplement choisi en est un de sapin baumier de densité moyenne âgé de 30 à 40 ans situé dans le compartiment 6 (figure 2) et classé SB4J¹. À l'intérieur de ce peuplement une superficie de 7 500 mètres carrés (100 m par 75 m) a été délimitée. Cette superficie a été par la suite subdivisée en cinq bandes d'une largeur de 15 mètres et de 100 mètres de long. Une bande non traitée a servi de témoin, une seconde a été éclaircie, deux autres coupées à blanc et une cinquième est demeurée intouchée.

Dans le secteur du Lac Laflamme, il s'agit également d'un peuplement de sapin baumier mais cette fois plus jeune et de forte densité établi à la suite d'une coupe totale. La figure 3 localise ce peuplement qui se trouve dans le compartiment 23 et est classé Rrct². Pour les fins de l'expérience, une superficie de 7 500 mètres carrés (100 m sur 75 m) a aussi été délimitée et subdivisée en cinq bandes, de la même façon que dans le secteur du lac Joncas.

Une bande a servi de témoin non traité, une deuxième a été éclaircie, une troisième, coupée à blanc alors que les deux autres sont demeurées intouchées.

1.2 Relevés dendrométriques

1.2.1 Avant traitement

Afin de bien connaître les caractéristiques dendrométriques de chacun des secteurs d'étude, des parcelles-échantillons carrées ont été établies dans chaque bande. Ces parcelles (deux par bande) ont une superficie de 100 m². Toutes les tiges de 1 cm et plus au DHP, contenues dans ces parcelles, ont été mesurées et dénombrées par classes de 2 cm de diamètre. Les parcelles ont été établies en général à 35 et 65 mètres du début de chaque bande. La hauteur totale de quelques tiges a aussi été mesurée afin de pouvoir établir une relation diamètre/hauteur. La localisation de ces parcelles échantillons est présentée aux figures 2 et 3.

Les essences présentes sont, par ordre d'importance, le sapin baumier (*Abies balsamea*, SAB), l'épinette blanche (*Picea glauca*, EPB), le bouleau à papier (*Betula papyrifera*, BOP), le sorbier (*Sorbus decora*, SOD) et le cerisier de Pennsylvanie (*Prunus pensylvanica*, PRP). Les tableaux 1 et 2 montrent la répartition du nombre de tiges/ha par essence et par classe de DHP pour les secteurs des lacs Joncas et Laflamme, dont les totaux sont de 9 810 et de 21 900 tiges respectivement.

1 Sapinière jeune de classe de densité B (60 à 85 p. 100) et de hauteur 4 (10 à 30 *pièdes*, env. 3 à 10 m).

2 Résineux régénéré issu de coupe totale.

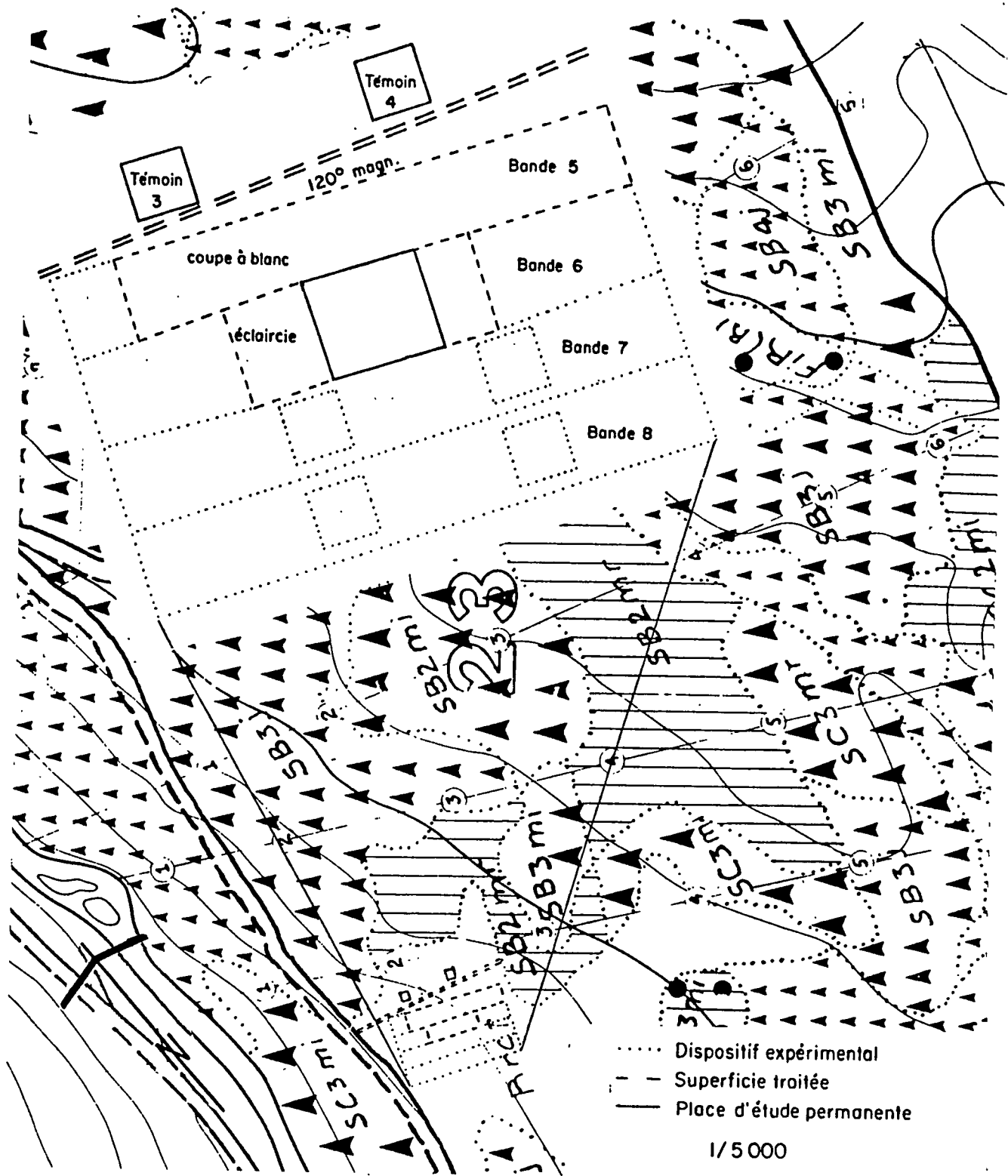


Figure 3. Secteur du lac Laflamme

Tableau 1: Répartition du nombre de tiges à l'hectare avant traitement, secteur Joncas

DHP (cm)	Essences						Total
	SAB	SAB(M)*	EPB	EPB(M)	BOP	SOD	
2	670	70	0	0	140	40	920
4	1410	700	10	0	380	40	2540
6	1470	600	10	0	290	40	2410
8	920	350	0	0	160	90	1520
10	920	190	0	0	10	40	1160
12	550	90	10	10	10	0	670
14	280	60	0	0	0	0	340
16	130	0	20	0	0	0	150
18	70	0	0	0	0	0	70
20	0	0	0	0	0	0	0
22	20	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	10	0	0	0	10
Total	6440	2060	60	10	990	250	9810

Tableau 2: Répartition du nombre de tiges à l'hectare avant traitement, secteur Laflamme

DHP (cm)	Essences								Total
	SAB	SAB(M)	EPB	EPB(M)	BOP	SOD	PRP	PRP(M)	
2	4440	310	90	10	210	80	0	0	5140
4	6330	830	190	20	470	70	40	30	7980
6	4010	160	80	0	410	140	220	60	5080
8	1990	20	40	10	130	140	100	20	2450
10	650	0	30	0	30	90	20	10	830
12	290	0	0	0	0	0	0	0	290
14	70	0	0	0	0	0	0	0	70
16	10	0	10	0	0	0	0	0	20
18	20	0	0	0	0	10	0	0	30
20	10	0	0	0	0	0	0	0	10
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	17820	1320	440	40	1250	530	380	120	21900

* M spécifie que ces arbres sont morts.

Tableau 3: Répartition des tiges résiduelles dans les bandes éclaircies (tiges/ha)

DHP (cm)	Secteur Joncas bande n° 2			Secteur Laflamme bande n° 6		
	SAB	EPB	TOTAL	SAB	EPB	Total
2	-	-	-	85	28	113
4	123	-	123	480	85	565
6	278	-	278	1441	141	1582
8	926	-	926	1186	198	1384
10	802	-	802	367	85	452
12	370	-	370	141	85	226
14	370	-	370	28	-	28
16	31	-	31	-	-	-
18	31	-	31	28	-	28
Total	2931	-	2931	3756	622	4376

1.2.2 Après traitement

Dans les secteurs traités par coupe d'éclaircie, soit les bandes 2 (secteur Joncas) et 6 (secteur Laflamme), deux parcelles permanentes ont été établies. La mesure de ces parcelles permet de connaître la distribution des tiges par essence et par classe de diamètre et d'évaluer le volume résiduel après traitement. La répartition des tiges résiduelles est présentée au tableau 3.

1.3 Évaluation du stock ligneux

L'objet de cette section est d'évaluer la quantité de biomasse considérée commerciale et non commerciale pour chacun des deux secteurs expérimentaux. L'échantillonnage a permis d'évaluer la masse totale de matière ligneuse, et cela, en utilisant les équations de prédiction de la biomasse de douze essences commerciales du Québec (Ouellet 1983). Ces équations sont conçues pour être appliquées aux données d'inventaire volumétrique où les paramètres généralement mesurés sont le diamètre à hauteur de poitrine et la hauteur totale. Les équations utilisées ainsi que les coefficients correspondants sont présentés à l'annexe 2.

Ces résultats constituent la première phase de l'estimation des quantités de matière ligneuse totale ou marchande, disponibles par hectare. La masse totale pour tous les arbres compris dans une parcelle représente la masse au-dessus du sol de tous les arbres, en kilogrammes, y compris la partie marchande de la tige s'il y a lieu, la cime, les branches, le feuillage et les fruits. Quant à la masse de la partie marchande de la tige (avec écorce), il s'agit de la partie de la tige jusqu'à un diamètre de 9,1 cm au fin bout.

Le tableau 4 montre, pour chaque secteur et par essence, la répartition de la masse totale verte. La masse anhydre estimée ainsi que la masse de la partie marchande de la tige évaluée à partir des parcelles échantillons sont aussi obtenues. Elles se résument comme suit, pour chacun des secteurs:

	Secteur Joncas	Secteur Laflamme
masse anhydre (kg/ha)	126 309	128 493
masse verte (kg/ha)	256 219	257 492
masse verte de la partie marchande des tiges (kg/ha)	94 461	35 519

Tableau 4: Masse verte à l'hectare (kg/ha)
par secteur, par essence et groupe
d'essences

	Secteur Joncas (kg/ha)	Secteur Laflamme (kg/ha)
Essences résineuses:		
sapin	186 509	199 954
sapin (M)	40 691	6 862
épinette blanche	6 545	5 722
épinette blanche (M)	677	378
Total résineux	234 422	212 916
Essences feuillues:		
bouleau à papier	15 197	17 299
sorbier	6 600	15 743
cerisier de Pennsylvanie	-	8 947
cerisier de Pennsylvanie (M)	-	2 587
Total feuillus	21 797	44 576
Total global	256 219	257 492

La masse résiduelle dans les bandes éclaircies est présentée au tableau 5. Cette dernière est établie à partir des places échantillons permanentes.

Tableau 5: Masse verte résiduelle (kg/ha)
par essence dans les bandes éclaircies

	Secteur Joncas	Secteur Laflamme
Sapin	123 524	85 218
Épinette blanche	-	17 208
Total	123 524	102 426

Chapitre II

Réalisation des travaux sylvicoles

2.1 Description des étapes de travail

Après la prise de données dendrométriques dans les deux secteurs décrits précédemment, des travaux sylvicoles ont été effectués au cours des mois de septembre et octobre 1983.

Les travaux sylvicoles ont consisté en des coupes à blanc et des coupes d'éclaircie réparties sur cinq bandes dans les secteurs Joncas et Laflamme. Ces coupes ont été entièrement réalisées par un employé expérimenté de la Forêt Montmorency, de la façon suivante:

Tableau 6: Répartition des travaux sylvicoles selon les bandes

Secteur	Bande n°	Coupe
Joncas	1	à blanc, partie de bande
Joncas	2	éclaircie, partie de bande
Joncas	3	à blanc, partie de bande
Laflamme	5	à blanc, partie de bande
Laflamme	6	éclaircie, partie de bande

– A l'abattage, les arbres étaient assemblés (mis en tas) de façon à être ensuite repris par un débardeur *F-4 Dion* et transportés au chemin de camionnage. La partie considérée marchande des tiges de 10 cm et plus de diamètre au DHP a été tronçonnée en billes de bois à pâte (voir figure 4).

– Toutes les étapes des travaux, y compris les opérations de débardage, ont été chronométrées selon la méthode des observations instantanées, à intervalles réguliers d'une minute et de façon continue pour le débardage. Toutes les tiges abattues au cours des opérations ont été dénombrées et leur diamètre mesuré à la découpe, tandis que les mesures de la masse récoltée ont été recueillies au moment du transport.

Afin d'accélérer les travaux de débardage des arbres avec leurs branches, un bras à talon a été ajouté à la flèche de chargement du *F-4 Dion*, facilitant ainsi le ramassage de cette biomasse, fonction pour laquelle cet équipement n'est pas spécifiquement conçu (voir figure 5).

Les photos qui suivent (Figures 4, 5 et 6) illustrent la séquence des opérations effectuées et les équipements utilisés.

2.2 Résultats portant sur les opérations de coupe de bois

Les travaux de coupe de bois se sont déroulés pendant 10 jours à partir du 26 septembre pour se terminer le 11 octobre 1983. Les observations ont été recueillies pour chaque période de travail d'une durée d'une heure.

Le sommaire des résultats de ces observations, pour chaque traitement et chaque secteur, est présenté au tableau 7. Ce tableau montre que la répartition du temps productif ou de travail entre les secteurs est relativement constante, soit 67 p. 100 pour la coupe à blanc pour les tiges non commerciales et 95 p. 100 pour la coupe d'éclaircie. Quant à la superficie traitée et au nombre de tiges abattues par heure productive, elles varient d'un secteur à l'autre et selon le traitement. Dans le secteur Laflamme, la superficie traitée est de 83 m²/heure avec un nombre de tiges/ha de 21 900, alors que dans le secteur Joncas, elle varie de 107 à 172 m²/ha avec 9 810 tiges/ha.

Des équations de prédiction du nombre de tiges abattues par heure travaillée ont été obtenues à partir du temps productif affecté à la coupe des tiges non commerciales. Les éléments de temps considérés sont les suivants:

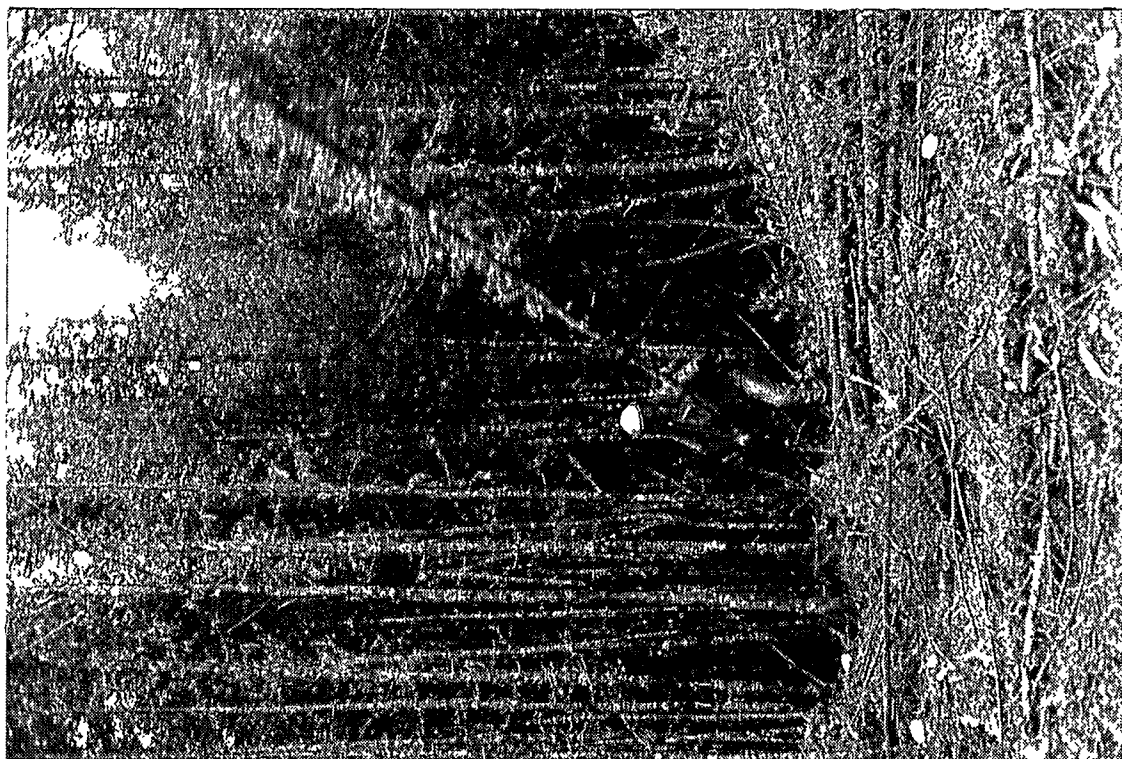
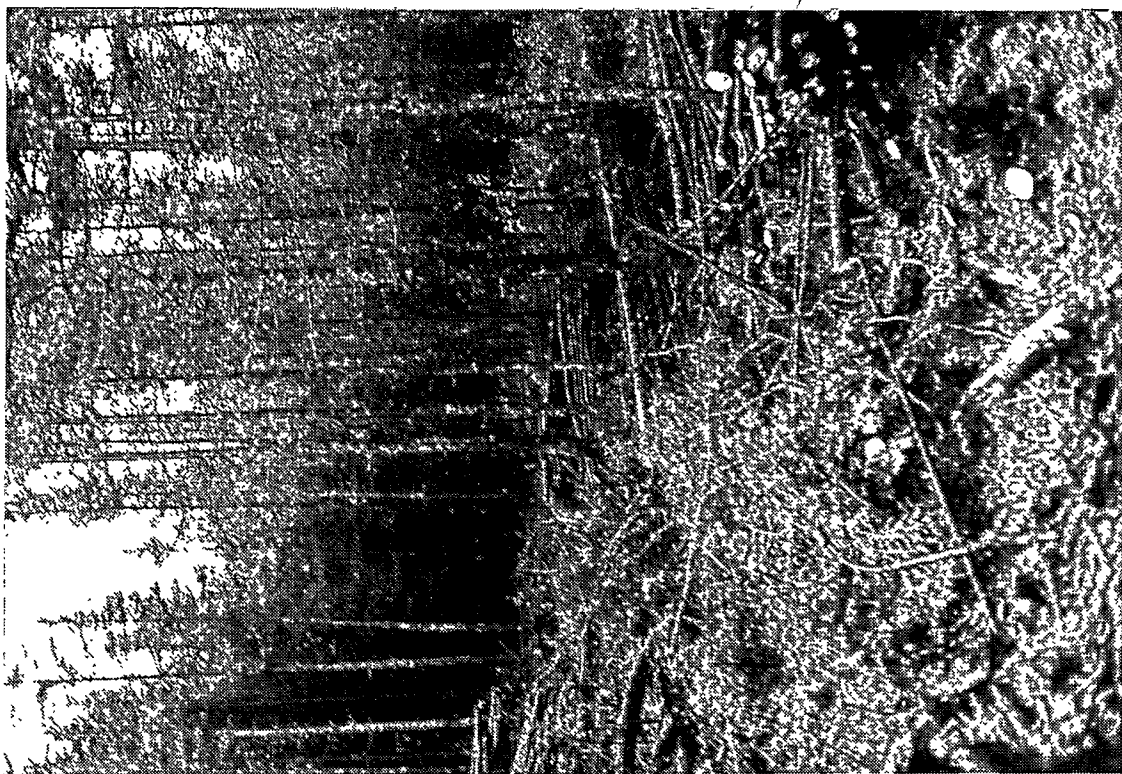


Figure 4. Les étapes de la récolte.

a) et b) Pour la coupe à blanc comme pour l'éclaircie, l'abatteur doit réaliser la coupe et regrouper les tiges en petits empilements.



Figure 5. Les étapes de la récolte (suite).

- c) Le classement des tiges se fait en forêt; on distingue les portions de tiges non marchandes et marchandes. Ces dernières étaient tronçonnées sur le parterre de coupe.
- d) Le débardage de la biomasse non marchande est réalisé à l'aide d'un *F-4 Dion* auquel a été ajouté un bras à talon à la flèche de chargement.



Figure 6. Les étapes de la récolte (fin).

- e) La biomasse non marchande est chargée sur une plate-forme amovible.
- f) Un camion tandem vient reprendre sa plate-forme pour transporter la biomasse du site vers le lieu de transformation.

Tableau 7: Sommaire des observations par secteur et par traitement

Secteur	Laflamme		Laflamme		Joncas		Joncas	
Traitement	Coupe à blanc		Coupe d'éclaircie		Coupe à blanc		Coupe d'éclaircie	
Temps observés	Minutes	%	Minutes	%	Minutes	%	Minutes	%
Tiges non commerciales								
déplacements	77,5	9,3	92,0	17,0	151,0	15,1	62,5	20,0
nettoyage	106,0	12,8	78,0	14,4	79,0	7,8	39,0	12,5
abattage	217,0	26,2	126,0	23,2	196,0	19,5	72,5	23,2
assemblage	160,0	19,4	217,5	40,1	245,5	24,5	122,0	39,0
total partiel	560,5	67,7	513,5	94,7	671,5	66,9	296,0	94,7
Tiges commerciales								
ébranchage	88,5	10,7	7,5	1,4	151,5	15,1	7,5	2,4
tronçonnage	52,0	6,3	6,0	1,1	61,0	6,1	2,0	0,6
empilage	126,0	15,3	15,0	2,8	119,5	11,9	7,0	2,3
total partiel	266,5	32,3	28,5	5,3	332,0	33,1	16,5	5,3
Total (temps productif)	827,0	100,0	542,0	100,0	1 003,5	100,09	312,5	100,0
Délais								
mécaniques	7,0		25,0		2,5			
d'opération	144,0		36,0		32,0		6,5	
personnels	22,5		28,0		32,5		17,0	
service	63,0		47,0		47,5		15,0	
Total	236,5	136,0		114,5		38,5		
Superficie								
traitée (m ²)	1 143		757		1 783		894	
Temps productif (h)	13,8		9,0		16,7		5,2	
Productivité								
(m ² /h productive)	83		84		107		172	
Récolte (tiges)	2 274		1 639		2 123		819	
Productivité (tiges								
p. h productive)	165		182		127		157	
Productivité (masse verte								
p. h productive)(kg)	2 043		1 400		2 735		2 154	
Productivité								
(masse verte/ha)(kg)	257 490		257 490		256 219		256 219	

(1) Comprennent le temps d'observation des sites ou des arbres.

Tableau 8: Équations de prédiction du nombre de tiges coupées et assemblées par heure de travail en fonction du temps productif ⁽¹⁾

$$\text{Modèle } Y = B_0 + B_1 + E$$

Composantes	Secteur	Traitement	Moyenne observation	Écart type	Équation de régression (B ₀) (B ₁ T)	Coefficient	Coefficient de variation	Moyenne par heure ⁽²⁾
Nombre de tiges	Laflamme	c. à blanc	126,3	43,3	-16,8 + 4,6T	0,767	17,05	259
Nombre de tiges	Laflamme	c. à blanc	136,6	45,2	-13,1 + 3,5T	0,846	13,61	197
Nombre de tiges	Joncas	c. à blanc	106,1	42,2	-27,3 + 4,0T	0,675	23,31	213
Nombre de tiges	Joncas	c. d'éclaircie	117,0	54,9	-13,1 + 3,1T	0,842	20,39	173
Nombre de tiges	Tous	c. à blanc	115,7	43,4	-13,6 + 4,0T	0,608	23,82	226
Nombre de tiges	Tous	c. d'éclaircie	129,4	48,4	-11,1 + 3,3T	0,814	16,63	187

(1) Excluant les opérations d'ébranchage, de tronçonnage et d'empilement des tiges commerciales.

(2) Chaque période d'observation étant d'une heure, la moyenne est ainsi calculée par heure productive.

Tableau 9: Temps d'ébranchage, de tronçonnage et d'empilage de billes commerciales (1,22 mètres de longueur)

Secteur	Traitement	Temps productif (minutes)	Volume récolté (m ³)	Mètres cubes par heure
Laflamme	coupe à blanc	266,5	6,83	1,84
Laflamme	coupe d'éclaircie	28,5	0,58	1,22
Joncas	coupe à blanc	332,0	9,15	1,65
Joncas	coupe d'éclaircie	16,5	0,31	1,13
Tous	coupe à blanc	598,5	15,98	1,60
Tous	coupe d'éclaircie	45,0	0,89	1,19

Tableau 10: Distance et temps de débardage de la biomasse par voyage et par secteur et répartition du temps par élément de travail

	Secteur Joncas				Secteur Laflamme			
	coupe à blanc		coupe d'éclaircie		coupe à blanc		coupe d'éclaircie	
	distance (mètres)	temps (min)	distance (mètres)	temps (min)	distance (mètres)	temps (min)	distance (mètres)	temps (min)
Transport à vide	150	3,5	155	3,5	103	3,8	106	3,8
Chargement	-	16,5	-	4,7	-	9,7	-	16,7
Déplacement lors du chargement	33	2,0	43	2,3	8	0,7	20	9,7
Transport en charge	137	3,4	129	2,8	82	4,1	82	3,3
Déchargement	-	4,0	-	2,2	-	7,4	-	6,1
Total		29,4		15,5		25,7		39,6
Voyages		21		3		14		5
Prises/voyage		14		4		8		8

- déplacements et observations du site et des arbres;
- nettoyage;
- abattage;
- assemblage.

Ces équations ont permis d'obtenir les meilleurs coefficients de détermination (R^2) et de variation. Le tableau 8 présente ces équations pour chaque secteur et pour les deux secteurs regroupés. Le temps productif affecté à la production de billes commerciales est présenté au tableau 9 avec la productivité mesurée cette fois en volume moyen par heure productive.

Ce tableau montre que la productivité moyenne varie de 1,19 à 1,69 m³/h entre la coupe d'éclaircie et la coupe à blanc; toutefois, compte tenu du très faible volume récolté dans la coupe d'éclaircie, aucune conclusion ne peut être tirée de ces différences.

2.3 Résultats portant sur les opérations de débardage

Les opérations de débardage se sont déroulées du 19 au 24 octobre 1983 à l'aide d'un débardeur *F-4 Dion* équipé d'une pince de chargement. Au total, 49 voyages ont été effectués, soit 22 dans le secteur Laflamme et 27 dans le secteur Joncas. Le temps moyen de débardage par voyage a été de 28 minutes pour des distances allant de 100 à 155 mètres. La répartition du temps de débardage par secteur et par élément de travail est indiquée au tableau 10.

Le temps total par voyage se situe entre 26 et 29 minutes pour la coupe à blanc et entre 15 et 40 minutes pour la coupe d'éclaircie.

Cette forte variation de temps dans la coupe d'éclaircie est sans doute attribuable au nombre inférieur de prises par voyage au secteur Joncas. De plus, le secteur Laflamme étant plus accidenté et plus dense, il devient plus difficile d'y effectuer le chargement.

Le temps de déchargement dans le secteur Laflamme est plus élevé que dans le secteur Joncas, sans doute du fait que les arbres étaient déchargés sur une plate-forme de camion plutôt qu'au sol. Le débardage des billes marchandes a pour sa part nécessité un total de sept voyages dont la durée moyenne a été de 21 minutes. Les délais ont totalisé 340 minutes, soit 20 p. 100 du temps total prévu.

2.4 Évaluation de la biomasse récoltée

La biomasse récoltée dans le secteur Laflamme a été placée sur une plate-forme amovible de camion à laquelle des piquets avaient été ajoutés afin de retenir la charge (voir figure 5), et transportée par camion à une jetée centrale. A cet endroit, chaque voyage de camion était pesé à l'aide de deux balances¹ conçues pour peser un essieu à la fois. Au total, sept voyages de camion ont été nécessaires pour transporter 26 950 kg de biomasse.

Une comparaison de cette valeur avec les données de l'inventaire est présentée au tableau 11. Ce tableau montre qu'il existe une différence de 9000 kg entre la masse transportée et la masse estimée récoltée au secteur Laflamme. Cette différence serait probablement attribuable aux raisons suivantes:

- tiges mortes et desséchées avant la récolte;
- perte lors de la manutention;
- estimation de l'inventaire;
- précision à la pesée, etc.

Cette biomasse (secteur Laflamme) fut mesurée et pesée de nouveau au moment de l'utiliser à des fins énergétiques, ce qui nous a permis en quelque sorte de contrôler l'estimation avec plus de certitude.

En effet, au cours de l'hiver 1984-85, 76 p. 100 des réserves accumulées a été brûlé. Le poids sec de cette biomasse équivalant à 7 670 kg, on estime donc à 10 090 kg la quantité totale des réserves provenant du secteur Laflamme, soit 20 180 kg à l'état vert.

La perte représente 6 770 kg à l'état vert, soit 25 p. 100 de la valeur pesée lors du transport. Une partie de cette perte serait attribuable à la décomposition des copeaux entreposés dans un état trop humide à l'automne.

Par ailleurs, il a pu se produire une décomposition en empiement des tiges entre septembre 1983 et octobre 1984, ce qui pourrait également entrer en considération.

Pour avoir une idée de l'ampleur de cette dernière cause, la biomasse du secteur Joncas, pesée en 1983, fut pesée à nouveau à l'automne 1985. Les résultats obtenus montrent une perte de 35 p. 100 de la biomasse pour une période de deux ans en empiement. La perte de biomasse par décomposition n'a pas été prise en considération initialement, mais ce que nous observons nous indique qu'il ne faut pas la négliger. En Suède, des observations faites par Thörnquist (1984) ont révélé des pertes de biomasse allant jusqu'à 0,7 p. 100 par mois dans des empiements de 600 m³ apparents.

En ce qui concerne les copeaux de bois, les taux de décomposition observés peuvent se chiffrer à près de 6 p. 100 de perte par mois pour les premiers mois, pour ensuite diminuer donnant une moyenne mensuelle d'environ 3 p. 100 pour une période de 6 à 8 mois. Le taux de décomposition dépend toutefois des conditions environnementales, dont l'humidité qui joue un rôle majeur.

2.5 Productivité et coût des travaux sylvicoles

Productivité et coûts sont ici exprimés par unité de volume ou de surface, pour les opérations de coupe et de débardage. Etant donné les faibles superficies et volumes traités, ces résultats doivent être utilisés avec prudence.

Le coût de la main-d'oeuvre de récolte est estimé à 10\$ par heure prévue ou 12,50 \$ par heure productive, en supposant que les délais et déplacements représentent 20 p. 100 des heures prévues. De plus, une allocation de 1,50 \$ l'heure productive est prévue pour la scie à chaîne. Si on pose comme hypothèse que les avantages sociaux représentent 25 p. 100 des salaires, le coût par heure productive devient égal à 17,12 \$.

Le débardage a été effectué avec un débardeur auto-chargeur *F-4 Dion* et son coût d'utilisation est estimé à 35 \$ par heure productive, main-d'oeuvre comprise.

¹ Balances portatives utilisées généralement par le ministère des Transports pour vérifier la charge des camions. Ces balances nous ont été prêtées par l'Institut canadien de recherches en génie forestier du Canada (FERIC) à Montréal.

Tableau 11: Détermination de la biomasse récoltée

	Secteur Joncas		Secteur Laflamme	
	masse verte (kg)	masse anhydre (kg)	masse verte (kg)	masse anhydre (kg)
Coupe à blanc				
Biomasse inventoriée/ha	256 200	126 300	257 500	128 500
Superficie coupée (ha)	0,1783	0,1783	0,1143	0,1143
Biomasse récoltée (kg)	45 680	22 520	29 430	14 690
Coupe d'éclaircie				
Biomasse inventoriée/ha	256 200	126 300	257 500	128 500
Biomasse résiduelle/ha	123 500	60 900	102 400	51 100
Biomasse récoltée/ha	132 700	65 400	155 100	77 400
Superficie coupée (ha)	0,0894	0,0894	0,0757	0,0757
Biomasse récoltée (kg)	11 860	5 850	11 740	5 860
Total de biomasse récoltée (kg)	57 540	28 370	41 170	20 550
Volume marchand récolté (m ³)	9,46	9,46	7,41	7,41
Masse estimée de la partie marchande (kg) ⁽¹⁾				
	6 710	3 310	5 190	2 590
Biomasse non marchande récoltée (kg)				
	50 830	25 060	35 980	17 960
Biomasse transportée (kg)	33 000 ⁽²⁾		26 950	N.D.

⁽¹⁾ Avec une densité moyenne de 0,31, la masse anhydre par m³ est de 310 kg auxquels on doit ajouter 13 p. 100 pour considérer l'écorce, ce qui donne un facteur de conversion de 350 kg avec écorce par m³ solide.

⁽²⁾ Masse pesée des empilements de bois à l'automne 1985.

Le tableau 12 résume la productivité et les coûts des travaux sylvicoles pour chacun des secteurs.

Les coûts par tonne sont établis en fonction des masses estimées au tableau 11, alors que la masse effectivement transportée est inférieure d'environ 25 p. 100 (à l'état vert). Comme nous l'avons mentionné

précédemment, cette différence serait en grande partie attribuable aux tiges desséchées et en état de défoliation avancée causée par l'attaque de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. A l'état anhydre, les différences de masse seraient éventuellement inférieures à 35 p. 100; toutefois, cela n'a pas été vérifié.

Tableau 12: Productivité et coûts estimés des travaux sylvicoles

	Secteur Joncas		Secteur Laflamme	
	coupe à blanc	coupe d'éclaircie	coupe à blanc	coupe d'éclaircie
Superficie traitée (ha)	0,1763	0,0894	0,1143	0,0757
Masse anhydre ⁽¹⁾ (t)	22,52	5,85	14,69	5,86
Récolte				
Temps productif (h)	11,20	4,90	9,30	8,50
Productivité (ha/h)	0,0159	0,0182	0,0123	0,088
Coût (\$)	192	84	159	147
Coût (\$/ha)	1077	940	1391	1942
Coût (\$/t anhydre)	8,53	14,36	10,82	25,08
Débardage				
Temps productif (h)	11,1		9,3	
Productivité (ha/h)	0,0241		0,0204	
Coût (\$)	389		326	
Coût (\$/ha)	1453		1716	
Coût (\$/t anhydre)	13,71		15,86	

⁽¹⁾ Basée sur les résultats de l'inventaire de biomasse

Chapitre III

Utilisation de la biomasse à des fins énergétiques

3.1 Étapes du travail

Afin d'expérimenter l'utilisation à des fins énergétiques de la biomasse considérée comme non commerciale, on a décidé, au moment de la réalisation de travaux sylvicoles, de modifier une « fournaise » (c'est-à-dire une chaudière) du garage de la Forêt Montmorency afin qu'elle puisse brûler la biomasse convertie en copeaux.

Dans ce but, les étapes suivantes ont été réalisées au cours de l'été 1984:

- achat d'une « annexe » pour la fournaise comprenant: a) une trémie fermée pouvant contenir 1,2 m³ de copeaux; b) une vis d'alimentation avec ventilateur et brûleur d'une capacité nominale de 50 kW (voir figures 9 à 12);
- installation et ajustement de cette annexe à la structure de la fournaise à bois;
- construction d'une réserve extérieure de copeaux reliée à la trémie par une vis d'alimentation.

Enfin, c'est à l'automne 1984 que nous avons procédé au déchiquetage et à l'entreposage de la biomasse pour ensuite réaliser les premières expériences de brûlage l'hiver suivant.

Le présent chapitre traite plus particulièrement des expériences de réduction de la biomasse en copeaux, du pouvoir calorifique et de la teneur en humidité de ces derniers, ainsi que des résultats obtenus au cours de l'opération de brûlage.

3.2 Déchiquetage de la biomasse

L'opération de déchiquetage nous a permis de réduire en copeaux les tiges ou arbres récoltés lors de la réalisation de travaux sylvicoles.

Cette opération s'est effectuée à l'aide d'une déchiqueteuse couplée à un tracteur de ferme d'une puissance de 40 kW. Deux déchiqueteuses ont été employées pour effectuer ce travail, soit le modèle *CASTOR 10*, construit au Québec par les *Fontes P.N.S. Ltée*, et le *Hakki KRR* d'origine finlandaise, distribué au Canada par *Hakmet Ltée*. Ces deux déchiqueteuses ont été acquises par l'Université Laval dans le cadre du programme de recherche en Opérations forestières (voir figures 7 et 8).

Au total, 71 m³ apparents de copeaux ont été produits dont 53 ont été entreposés à l'intérieur et 18, mis en tas à l'extérieur. Différentes mesures ont été prises lors des opérations de déchiquetage de la biomasse destinée à l'entrepôt intérieur.

Cette opération ayant été effectuée près de l'entrepôt, la biomasse ou les tiges non commerciales ont dû être transportées par camion de la jetée en forêt à l'entrepôt. L'alimentation de la déchiqueteuse était alors assurée par deux hommes (trois à l'occasion) (voir figure 4). Les résultats obtenus pour les opérations de déchiquetage sont résumés au tableau 13. La répartition en diamètre des tiges déchiquetées est présentée à la figure 10.

Les copeaux ont été emmagasinés à l'état vert et aucune précaution pour les sécher n'a été prise de sorte que dès leur entreposage, un processus de fermentation s'est déclenché très rapidement, provoquant un dégagement de chaleur. Ce dégagement de chaleur est le résultat du processus de décomposition, ce qui implique qu'une certaine quantité de matière a pu être ainsi perdue. Cette situation s'est atténuée par la venue de températures plus froides, réduisant d'autant l'activité microbienne.

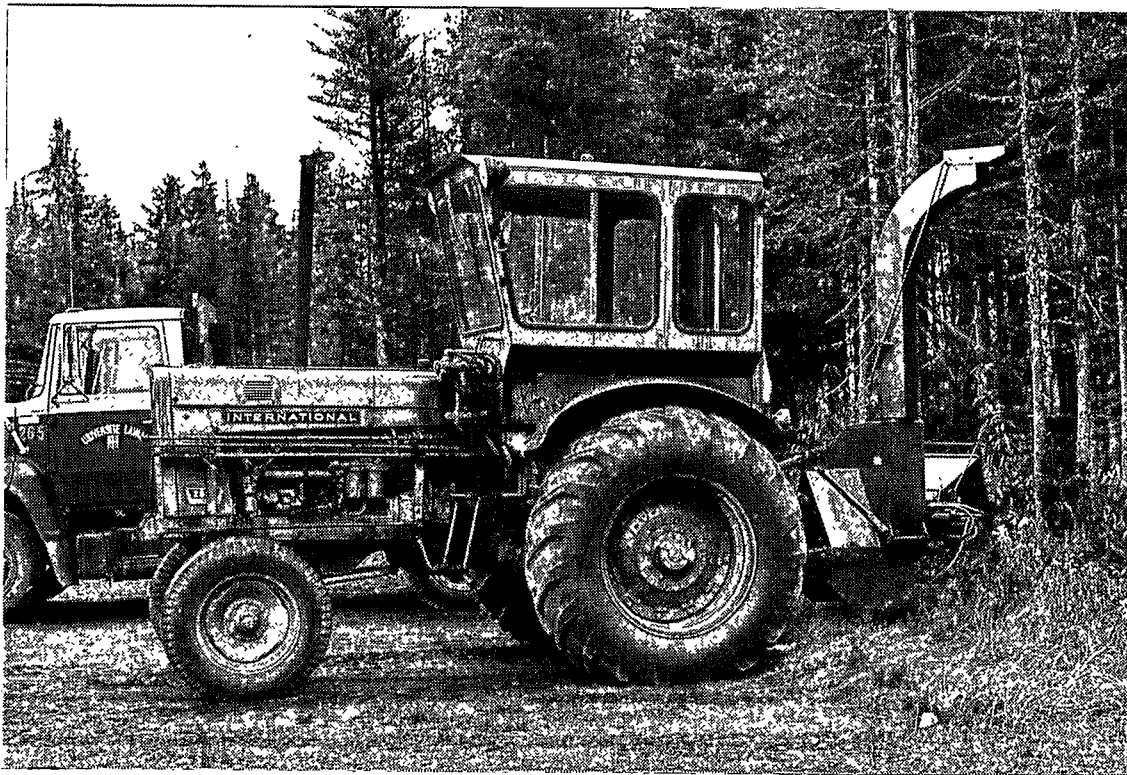


Figure 7. La déchiqueteuse de *Fontes P.N.S.*, modèle *Castor 10*

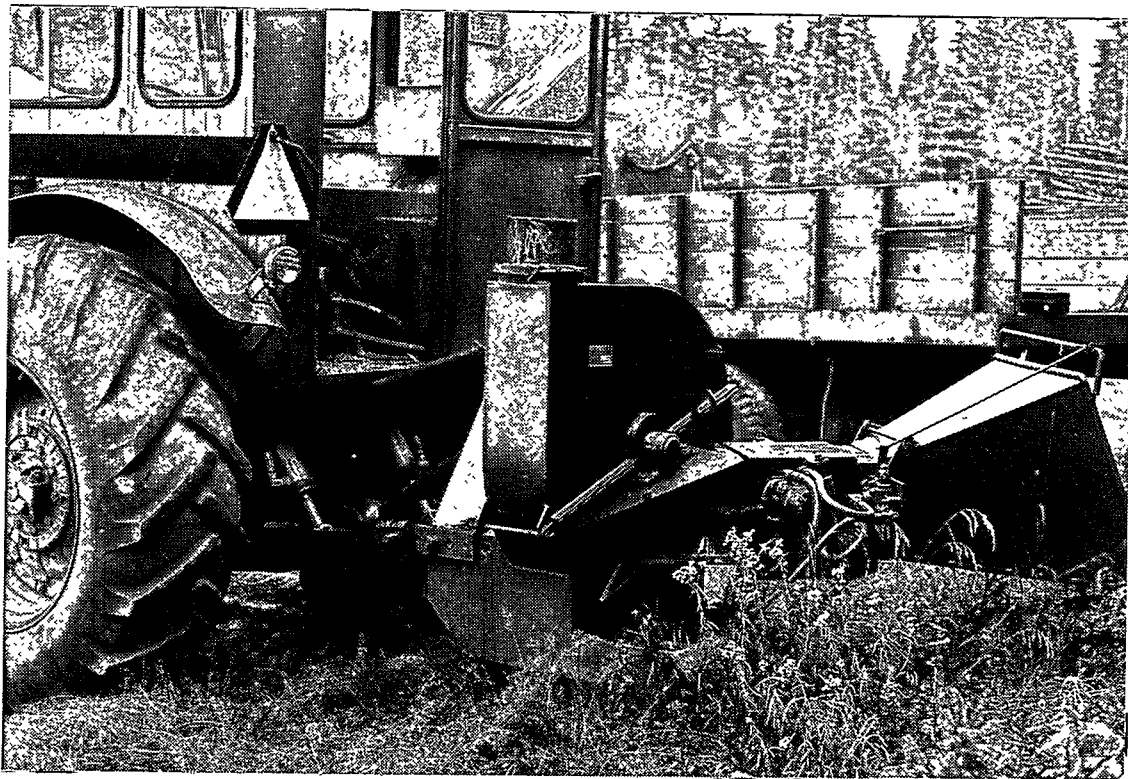


Figure 8. La déchiqueteuse *Hakki KRR*

Tableau 13: Résultats obtenus lors du déchiquetage

Volume apparent de copeaux produits	53 m ³
Nombre de tiges déchiquetées	2 604
Temps d'utilisation de la déchiqueteuse	3,5 heures
Nombre d'heures/hommes	12
Nombre de litres de carburant (diésel)	15
Nombre de litres de carburant par mètre cube	0,28
Volume de copeaux produits par heure	15,1 m ³
Nombre de tiges déchiquetées par heure	744
Nombre de tiges par mètre cube	49



Figure 9. Alimentation de la déchiqueteuse

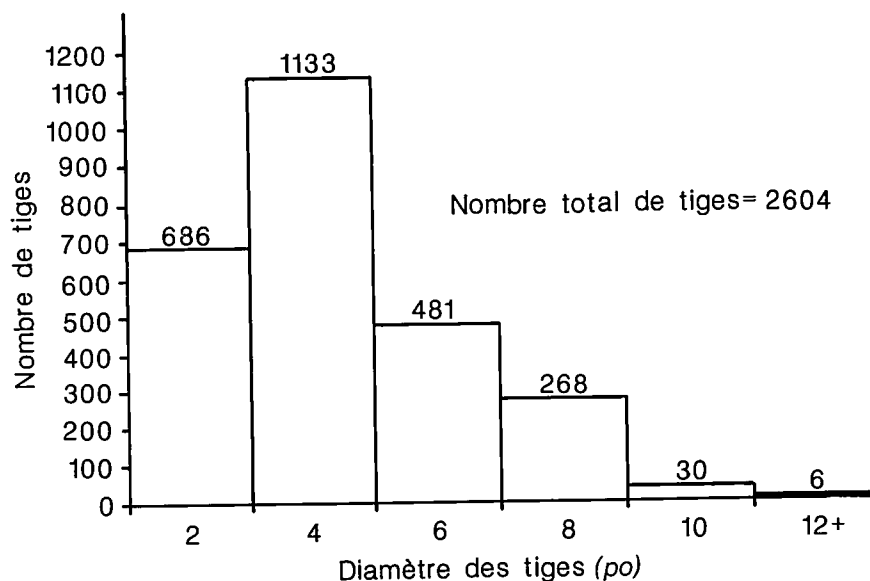


Figure 10. Distribution des diamètres à hauteur de poitrine des tiges qui ont été transformées en copeaux

3.3 Quelques caractéristiques des copeaux

3.3.1 Pouvoir calorifique des copeaux (F_h)¹

Le pouvoir calorifique est tout simplement la quantité de chaleur dégagée lors de la combustion des copeaux. A l'état anhydre, selon Kollman et Côté (1975), le bois dégage environ 20,3 Mjoul/kg, peu importe l'essence. Toutefois, cette valeur peut varier jusqu'à 8 p. 100 pour diverses pièces de bois. Malheureusement, cette variation est très faiblement expliquée par l'essence ligneuse et les plus grands écarts peuvent même se rencontrer entre des bois de la même espèce. De plus, les facteurs régissant les différences de pouvoir calorifique sont difficilement intégrables. Malgré tout cela, bien que l'essence employée soit un facteur plutôt négligeable, on croit bon dans certains cas de faire une distinction entre les résineux et les feuillus.

Résineux: $19,7 \pm 0,6$ Mjoul/kg
(8 500 $\pm$ 680 BTU/lb)

Feuillus: $20,9 \pm 1,7$ Mjoul/kg
(9 000 $\pm$ 720 BTU/lb)

En pratique, on utilise rarement le bois anhydre et lorsque ce bois contient de l'humidité, une proportion appréciable de l'énergie calorifique disponible est utilisée pour évacuer et évaporer l'eau contenue dans le bois. Cette proportion est fonction de la teneur en humidité et suit, d'après Kollmann et Côté (*op. cit.*), la relation suivante:

$$F_h = F_o \times \frac{100 - (H/7)}{100 + H}$$

où: F_h = pouvoir calorifique du bois à une teneur en humidité H

F_o = pouvoir calorifique du bois sec

H = teneur en humidité exprimée en pourcentage de la masse de l'eau sur la masse du bois sec.

Dans le cas présent, les bois déchiquetés sont à presque 100 p. 100 résineux. La formule à employer est donc la suivante:

$$\text{Pouvoir calorifique} = 19,7 \text{ Mjoul/kg} \times \frac{100 - (H/7)}{100 + H}$$

¹ Ne pas confondre avec l'expression « Puissance calorifique » employée à la section 3.5.

3.3.2 Teneur en humidité des copeaux

Puisque les copeaux sont destinés à la combustion, il est très utile de mesurer leur teneur en humidité puisque leur pouvoir calorifique est directement lié à leur contenu en eau. Afin d'obtenir un pouvoir calorifique des copeaux (F_h) proche de la réalité, il est préférable de mesurer cette teneur en humidité (H) peu de temps avant leur combustion.

Ainsi, un échantillon de $367,9 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ de copeaux produits par la déchiqueteuse *PNS Castor*, a été séché à près de 102°F jusqu'à l'obtention d'une masse constante, puis pesé à l'air libre environ 60 secondes après sa sortie de l'étuve.

La teneur en humidité (base sèche) d'un échantillon se calcule de la façon suivante:

$$\begin{array}{rcl} 1) & \text{Copeaux humides} + \text{tare} & = 451,4 \text{ g} \\ & - \text{tare} & = 83,5 \text{ g} \\ \hline & \text{Copeaux humides} & = 367,9 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} 2) & \text{Copeaux secs} + \text{tare} & = 293,1 \text{ g} \\ & - \text{tare} & = 83,5 \text{ g} \\ \hline & \text{Copeaux secs} & = 209,6 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} 3) & \text{Copeaux humides} & = 367,9 \text{ g} \\ & - \text{copeaux secs} & = 209,6 \text{ g} \\ \hline & \text{eau} & = 158,3 \text{ g} \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} 4) & \text{eau} & = 158,3 \text{ g} \\ & + \text{copeaux secs} & = 209,6 \text{ g} \\ \hline & \text{Teneur en humidité (H)} & = 76\% \end{array}$$

Le pouvoir calorifique devient donc:

$$10,0 \pm 0,8 \text{ MJoules/kg (ou } 4\,300 \pm 300 \text{ BTU/lb)}$$

En effet:

$$\begin{aligned} F_h &= F_o \times \frac{100 - (H/7)}{100 + H} = 19,7 \times \frac{100 - 76/7}{100 + 76} \\ &= 10,0 \text{ MJoules/kg} \pm 8\% \end{aligned}$$

La gamme des taux d'humidité mesurés sur les différents échantillons s'étend de 30 à 156 p. 100 (base sèche).

La variation du pouvoir calorifique des copeaux en fonction de leur teneur en humidité selon la formule de Kollman et Côté est présentée au tableau 14 et représentée graphiquement à la figure 11.

3.4 Description des installations

Comme nous l'avons mentionné à la section 3.1, l'Université a fait l'acquisition de l'équipement de chauffage pouvant utiliser des copeaux de bois comme combustible. Il s'agit d'un brûleur d'origine finlandaise, de marque *Toppi Päämppi*, modèle *T-P 2000*, d'une capacité de 50 kW, ainsi que d'une trémie pouvant contenir $1,2 \text{ m}^3$ de copeaux et munie d'une vis d'alimentation.

A l'intérieur de la trémie, un disque de brassage tourne lentement, permettant ainsi aux copeaux de descendre vers la vis. Des modifications ont dû être apportées à ce disque de brassage afin d'augmenter son efficacité et réduire l'incidence des bloquages occasionnés par la formation d'arches dans la trémie. Mentionnons que ce dernier phénomène est d'autant plus fréquent que les copeaux sont plus humides. Les figures 12 à 16 suivantes illustrent le principe de fonctionnement de la fournaise.

Tableau 14: Pouvoir calorifique des copeaux en fonction de leur teneur en humidité

Teneur en humidité (H)	pouvoir calorifique (Fh)*		
(%)	(kcal/kg)	(BTU/lb)	(MJ/kg)
0,00	4725	8505	19,7
0,10	4234	7621	17,7
0,20	3825	6884	16,0
0,30	3479	6262	14,6
0,40	3182	5727	13,3
0,50	2925	5265	12,2
0,60	2700	4860	11,3
0,70	2501	4506	10,5
0,80	2325	4185	9,7
0,90	2167	3900	9,1
1,00	2025	3645	8,5
1,10	1896	3413	7,9
1,20	1780	3204	7,5
1,30	1672	3009	7,0
1,40	1575	2835	6,6
1,50	1485	2673	6,2
1,60	1402	2523	5,9
1,70	1325	2385	5,6
1,80	1253	2255	5,2
1,90	1187	2136	5,0
2,00	1125	2025	4,7

* Formule de détermination du pouvoir calorifique (Fh) à une teneur en humidité donnée:

$$F_h \text{ (BTU/lb)} = F_0 \text{ (BTU/lb)} \times \frac{100 - [H(\%)/7]}{100 + H(\%)}$$

où F_h = pouvoir calorifique à l'état humide

F₀ = pouvoir calorifique à l'état sec

H = taux d'humidité des copeaux (base sèche).

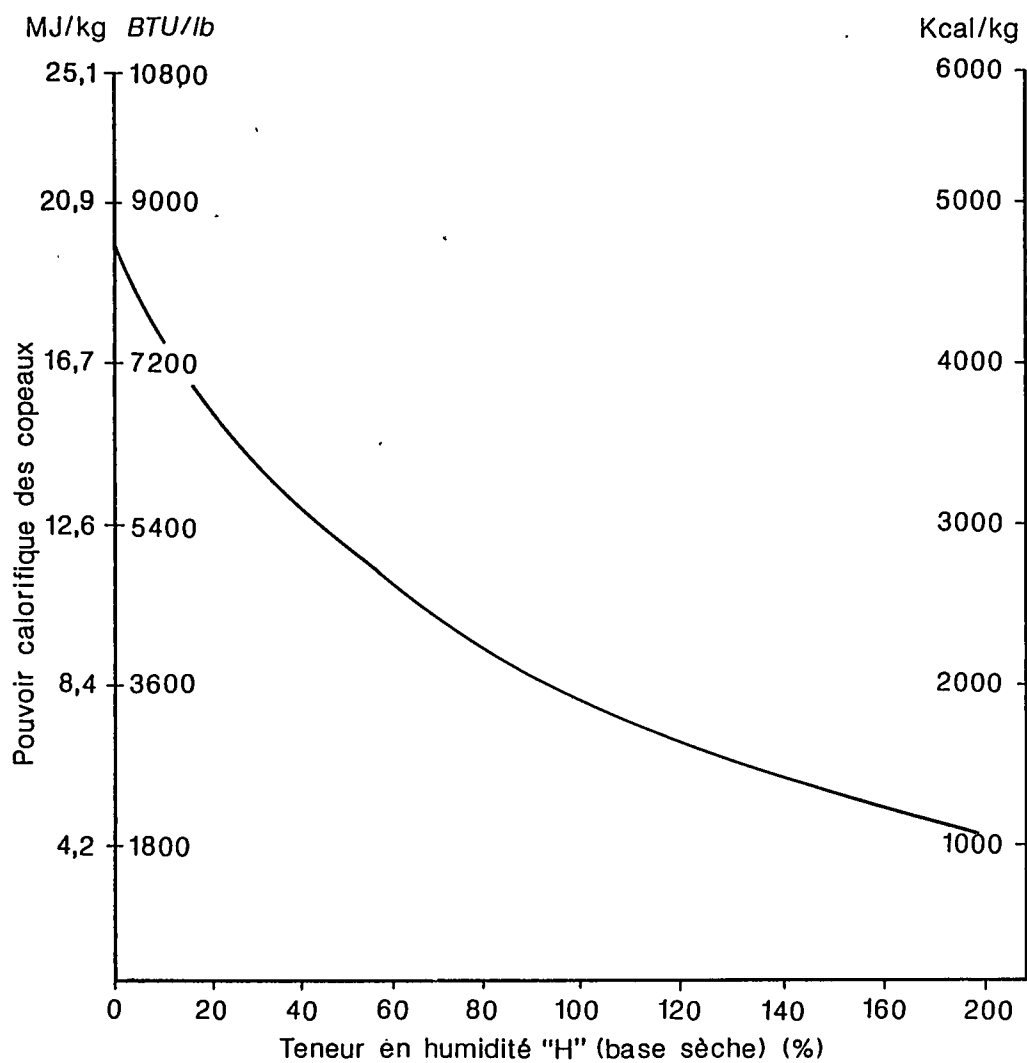


Figure 11: Pouvoir calorifique des copeaux en fonction de leur teneur en humidité

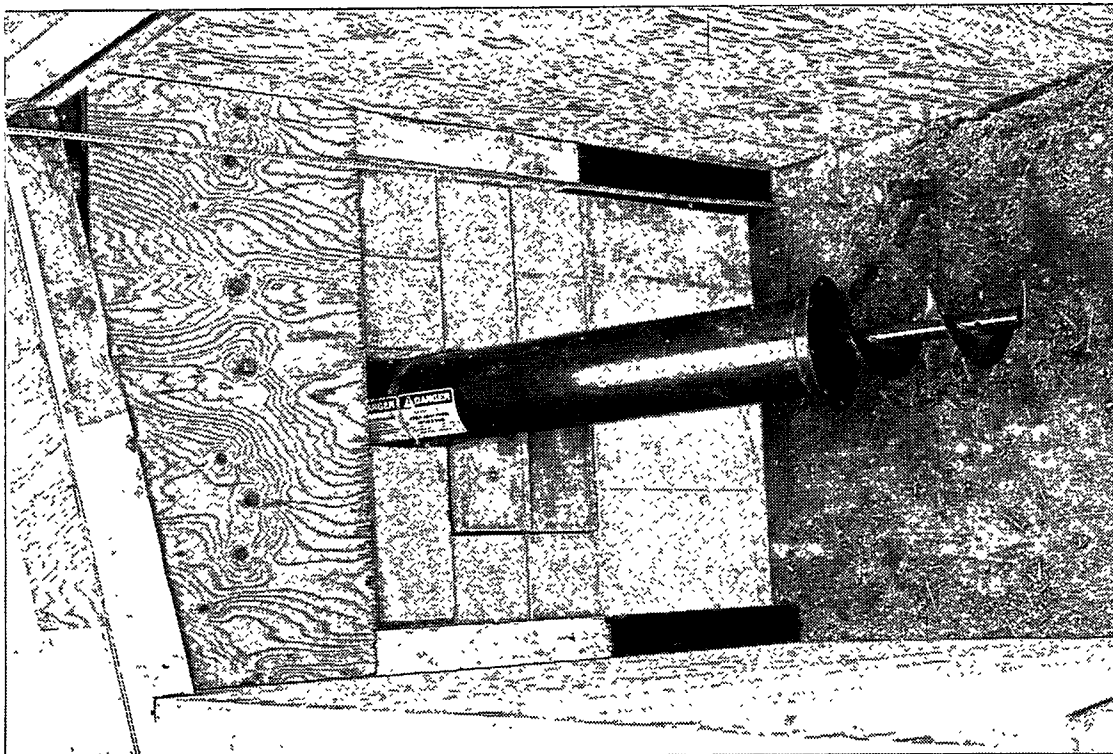


Figure 12. Vis d'alimentation acheminant les copeaux du réservoir extérieur jusqu'à la trémie.

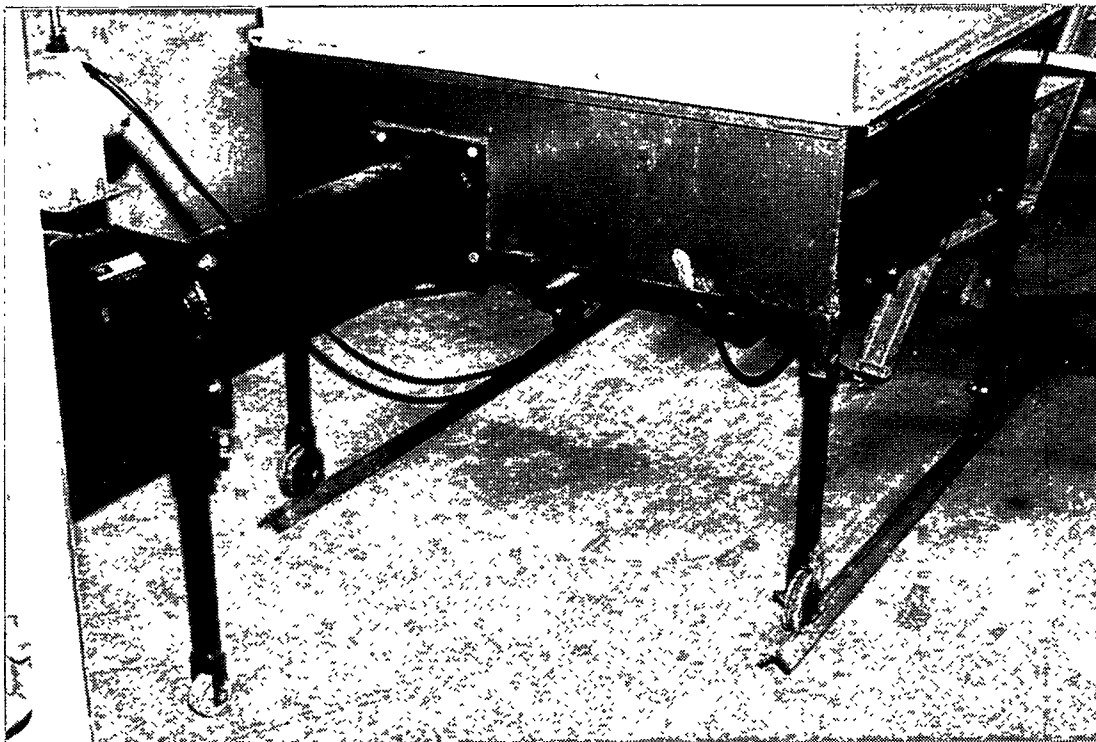


Figure 13. Trémie et conduit d'acheminement des copeaux vers le foyer mécanique.

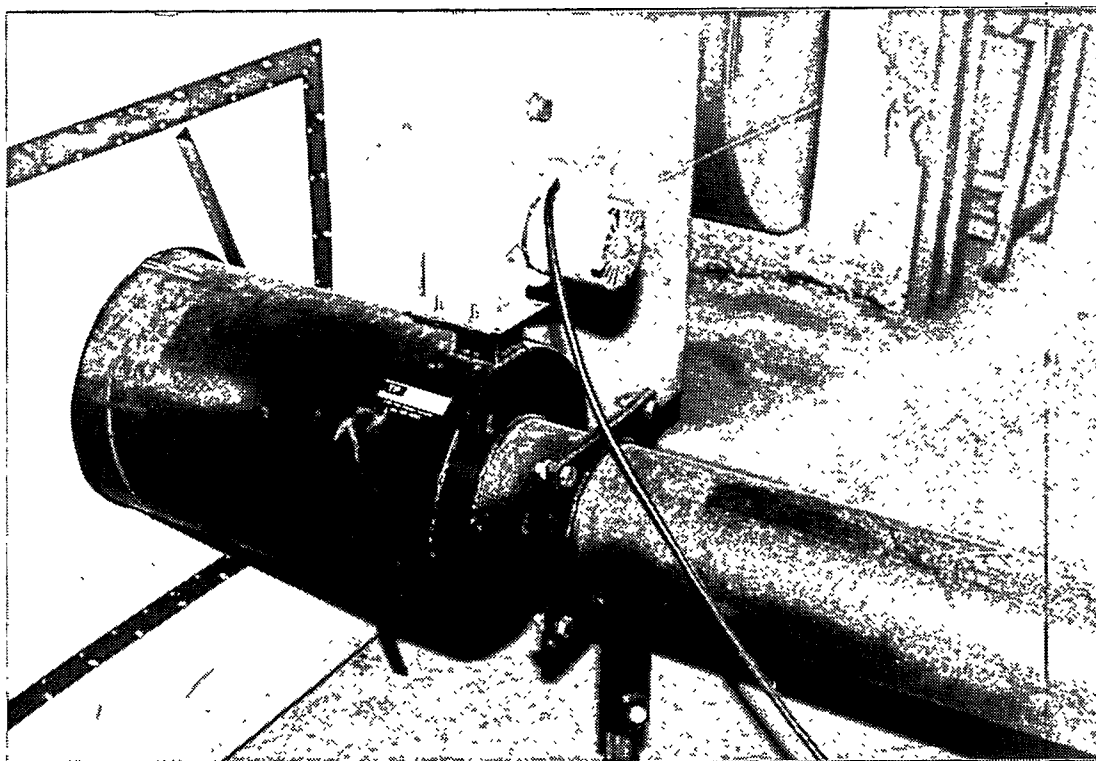


Figure 14. Ventilateur réglable alimentant le foyer en oxygène.

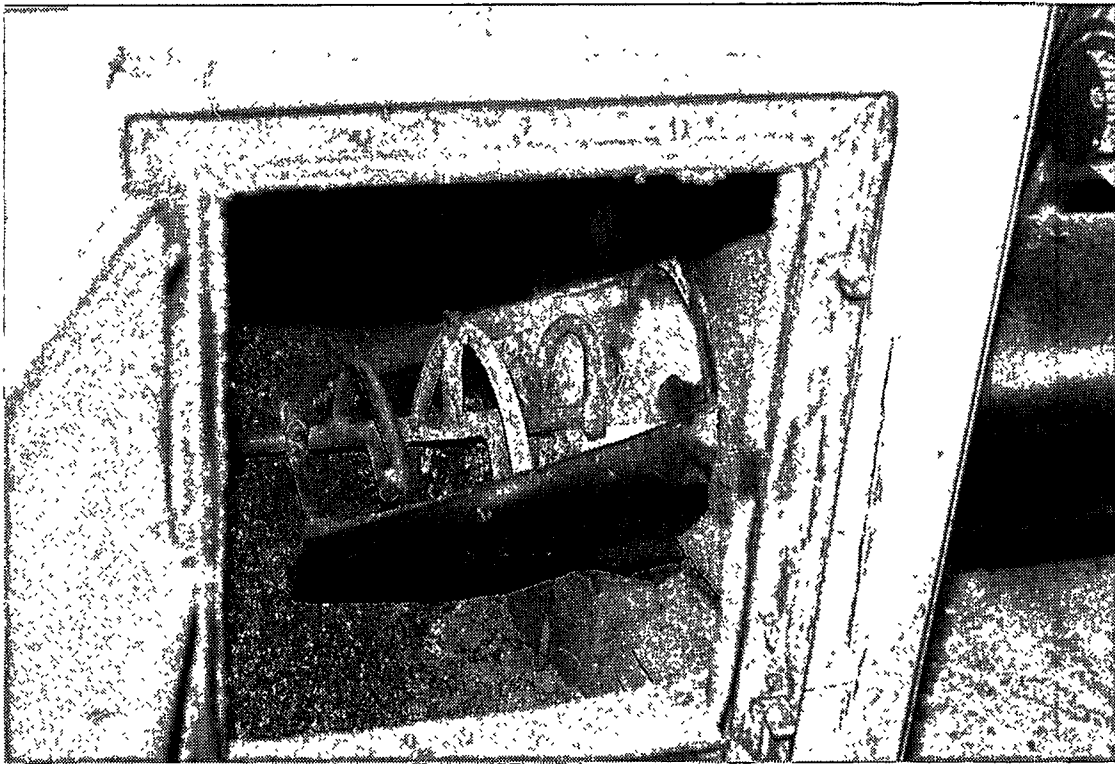


Figure 15. Intérieur de la fournaise montrant le brûleur et la section de la vis d'alimentation servant à l'évacuation des cendres.



Figure 16. Foyer mécanique en action.

3.5 Puissance calorifique de la fournaise²

La puissance calorifique (PC) est une unité de mesure qui évalue la capacité d'un système à élever la température de l'air ayant certaines caractéristiques.

La puissance calorifique de la fournaise peut être mesurée avec suffisamment de précision par la formule suivante:

$$PC = (0,35 \times V_s \times (t_s - t_e) \text{ watts} \times \frac{0,00006 \text{ Mjoule/min}}{\text{watts}})$$

où: PC = puissance calorifique (Mjoule/min); (Mjoule = 948 BTU)

V_s = débit volumique à la sortie (m^3 /heure)

t_s = température à la sortie du système ($^{\circ}C$)

t_e = température à l'entrée du système ($^{\circ}C$)

0,35 = valeur correspondant à la chaleur volumique de l'air aux conditions standards de $18^{\circ}C$ et 50 p. 100 H ($W - h/m^3^{\circ}C$).

Puisque l'air se dilate durant son réchauffement, il est prévisible que le débit à la sortie soit plus élevé qu'à l'entrée. L'approximation de la puissance calorifique par cette formule est alors meilleure si l'on mesure le débit de l'air à la sortie (Bernier 1979, p. 59).

La méthode employée pour effectuer cette mesure consiste à relever les températures de l'air à l'entrée et à la sortie du système, de même que le débit volumique, le tout alors que le système fonctionne à plein régime. Le relevé des températures est fait à l'aide de deux thermomètres au mercure ($\pm 0,5^{\circ}C$) installés aux embouchures du système de ventilation. Le débit volumique est connu grâce à un appareil nommé *Datametrics* (voir figures 16 et 17). Cet appareil mesure la vitesse de l'air en un point bien précis.

Puisqu'il existe des variations de part et d'autre d'une section de conduit d'aération, un test, afin de connaître la vitesse moyenne, a été conduit suivant les instructions de l'appareil. Les tableaux 15 et 16 ont servi à déterminer les facteurs de conversion qui, multipliés par la vitesse mesurée au centre de chacun

des conduits, permettent d'obtenir la vitesse moyenne. Le tableau 17 présente le sommaire des débits d'air et des différences de température observées.

Une fois les facteurs de conversion connus pour chacune des embouchures, le relevé des vitesses de l'air à différents moments de l'opération de contrôle du système de chauffage nous permet de déterminer la quantité d'air ayant circulé dans le système durant ce temps, c'est-à-dire au cours des 13 heures d'observation.

2 Ne pas confondre avec l'expression « Pouvoir calorifique » employée à la section 3.3.I.

**Tableau 15: Vitesse de l'air en différents points de la section
de l'embouchure #1 du système de ventilation
(m/s)**

	Section de la superficie						
	1	2	3	4	5	somme	moyenne
Gauche	5,0	5,0	3,0	0,4	0,5	13,9	2,8
Droite	4,3	3,8	3,5	4,0	4,0	19,6	3,9
Bas	5,3	5,3	4,8	5,0	3,5	3,9	4,8
Haut	5,5	5,5	5,0	3,8	2,5	22,3	4,5
Somme	20,1	19,6	16,3	13,2	10,5	79,7	15,9
Moyenne	5,0	4,9	4,1	3,3	2,6	19,9	4,0

Le facteur de conversion qui doit être appliqué à la vitesse de l'air mesuré au centre du conduit d'aération afin d'obtenir la vitesse moyenne dans toute la section du conduit est égal ici à 0,8, c'est-à-dire = 4,0/5,0

**Tableau 16: Vitesse de l'air en différents points de la section
de l'embouchure #2 du système de ventilation
(m/s)**

	Section de la superficie						
	1	2	3	4	5	somme	moyenne
Gauche	4,5	4,8	4,0	2,0	0,8	16,1	3,2
Droite	4,5	4,8	4,8	4,5	4,5	23,1	4,6
Bas	4,5	4,3	4,0	2,5	0,8	16,1	3,2
Haut	4,5	4,5	4,5	4,3	4,0	21,8	4,4
Somme	18,0	18,4	17,3	13,3	10,1	77,1	15,4
Moyenne	4,5	4,6	4,3	3,3	2,5	19,3	3,9

Le facteur de conversion est donc de 0,87 pour l'embouchure #2, c'est-à-dire = 3,9/4,5

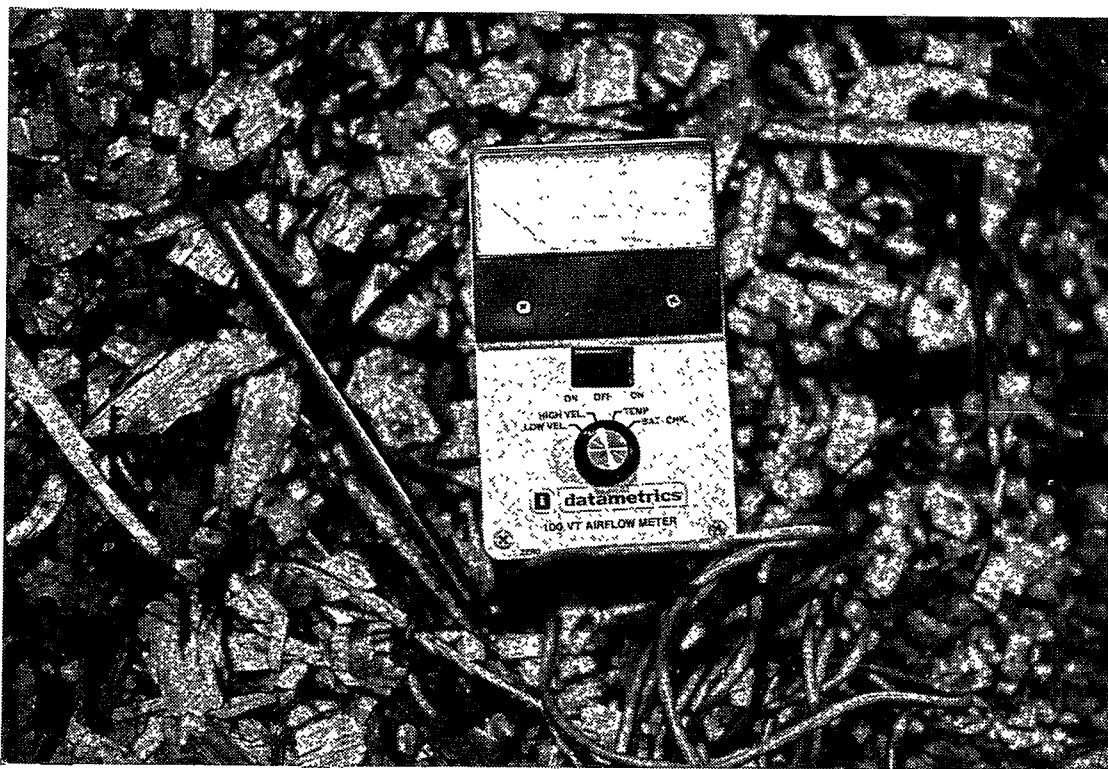


Figure 17. Appareil *Datametrics* servant à mesurer la vitesse de l'air en un point bien précis.



Figure 18. Embouchures du système de ventilation.

Tableau 17: Relevé de la vitesse de l'air à la sortie du système

	Vitesse de l'air		Différences de température
	embouchure #1 (m/s)	embouchure #2 (m/s)	°C
Début = 14 h 00	***	***	*****
16 h 20	4,8	4,5	35,0 °C - 13,5 °C = 21,5 °C
18 h 55	5,0	4,8	36,0 °C - 12,0 °C = 24,0 °C
21 h 52	5,0	4,5	35,5 °C - 13,0 °C = 22,5 °C
Fin = 3 h 00	4,8	4,5	données manquantes
Moyenne	4,9	4,6	22,5°C
Avec facteur de conversion	3,9	4,0	

L'observation de ces résultats permet de croire qu'il aurait été préférable de prendre des mesures plus fréquentes des différences de température. Toutefois, en posant l'hypothèse que les différences de tempéra-

ture et le débit de l'air sont constants en amplitude, la puissance calorifique (PC) peut être calculée de la façon suivante:

$$\text{Différence de température} = ^\circ\text{C} = (t_s - t_e) = 22,5^\circ\text{C}$$

$$\text{Débit volumique} = V_s = \text{Surface} \times (V_1 + V_2) = 0,1029 \text{ m}^2 \times (3,9 \text{ m/s} + 4,0 \text{ m/s}) = 0,81 \text{ m}^3/\text{s} = 2920 \text{ m}^3/\text{h}.$$

En appliquant ces valeurs dans la formule mathématique citée précédemment, nous obtenons une évaluation de la puissance calorifique.

Cette valeur représente environ la moitié de la valeur de 50 kW spécifiée par la compagnie. Cette différence peut être attribuable à l'emploi d'un combustible au départ de faible qualité (sapin baumier) et qui a probablement été altéré durant son entreposage.

$$\begin{aligned} \text{PC} &= 0,35 \text{ Wh/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C} \times 2920 \text{ m}^3/\text{heure} \times (22,5^\circ) = \\ &= 22\,995 \text{ watts} = 23 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 22\,995 \text{ Watts} \times \frac{0,00006 \text{ Mjoule/min}}{\text{Watts}} &= \\ &= 1,38 \text{ Mjoules/min (78 480 BTU/h)}. \end{aligned}$$

3.6 Rendement de la fournaise

La puissance calorifique peut se mesurer en watts, en Mjoule/min ou en BTU/h. Le rendement constitue pour sa part le pourcentage du pouvoir qui est effectivement employé à élever la température de l'air. Comme le pouvoir calorifique des copeaux à une

humidité H est connu, il ne reste qu'à établir le rapport entre la puissance déployée pendant un certain temps par l'appareil de combustion et le pouvoir calorifique des copeaux utilisés durant cette même période. La quantité de copeaux utilisée dans notre exemple est de 102 kg (225 lbs) à un taux d'humidité (H) de 30 p. 100. Le rendement ainsi obtenu est le suivant:

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{\text{Puissance calorifique (Mjoule/min)} \times \text{Temps (min)}}{\text{Pouvoir calorifique (Mjoule/kg)} \times \text{Masse (kg)}} \times 100$$

$$\text{Rendement (\%)} = \frac{1,38 \text{ MJoules/min} \times 780 \text{ min}^3 \times 100}{14,5 \text{ MJoules/kg} \times 102 \text{ kg}} = 73\%$$

$$\text{Rendement} = 73\% \pm 12\%$$

Un rendement de 73 p. 100 signifie que le système de chauffage a transformé 73 p. 100 de l'énergie disponible dans les copeaux, compte tenu de leur humidité, en énergie utile. Cela veut dire qu'il y a eu des pertes causées par la combustion incomplète, la radiation et les pertes de chaleur dans la cheminée de l'ordre de 27 p. 100.

3.7 Expérience de chauffage aux copeaux à la Forêt Montmorency

Le chauffage aux copeaux de bois s'est effectué de janvier à avril 1985, soit cinq jours par semaine pour une durée totale de 72 jours. Le temps net d'utilisation ne totalise toutefois que 53 jours complets, correspondant à un usage intermittent de la fournaise. Au cours de cette période, des ajustements ont été apportés à la vitesse d'alimentation en copeaux ainsi qu'à l'ouverture du ventilateur électrique de la fournaise, de façon à fournir le maximum de chaleur. Afin de mieux régler

la température du garage, un thermostat a été installé. De plus, afin d'assurer le maintien du feu dans la fournaise lorsqu'il n'y a pas de demande de chaleur, un dispositif automatique l'alimente pendant trente secondes toutes les cinq minutes.

3.7.1 Masse de copeaux brûlés

La masse totale verte de copeaux brûlés au cours de la période mentionnée ci-dessus est de 11 170 kg, soit 211 kg par jour de fonctionnement. Le taux d'humidité dans les échantillons prélevés (35) a varié de 22 à 68 p. 100 par rapport à la masse sèche pour une moyenne de 45 p. 100. Cela signifie que 7 670 kg de bois à l'état anhydre ont été brûlés au cours de la période, soit 145 kg sec par jour ou 0,9 m³ apparent par jour.

3.7.2 Énergie produite

A partir des équations des sections 3.4 et 3.5, nous pouvons maintenant calculer:

- a - le pouvoir calorifique des copeaux;
- b - la puissance calorifique dégagée;
- c - le rendement obtenu avec les copeaux utilisés.

Nous avons évalué ces trois paramètres sur la base de plusieurs jours d'observations. Le tableau 18 montre les valeurs obtenues au cours de 8 périodes spécifiques de combustion.

Les résultats présentés dans ce tableau montrent que le pouvoir calorifique des copeaux utilisés a varié entre 10,6 et 15,7 MJ/kg (4570 et 6750 BTU/lb) et que la puissance calorifique du système a varié entre 1,11 et 1,74 MJ/min (62 623 et 98 815 BTU/h) avec des rendements allant de 59 à 108 p. 100. Fait à remarquer, trois périodes montrent une puissance calorifique et un rendement fortement supérieur aux autres périodes. Au cours de ces trois périodes, la fournaise a été alimentée avec des copeaux gelés provenant de l'entrepôt et n'ayant subi aucun séchage au préalable. De plus, les différences de température observées entre l'air à l'entrée et à la sortie des conduits ont varié entre

22 et 27 ° C avec les copeaux gelés alors qu'elles ont varié entre 17 et 20,5 ° C avec l'utilisation de copeaux dégelés. Cette différence a même atteint jusqu'à 31,5 ° C au cours de l'expérience.

A la lumière de ces observations, on peut en déduire que les copeaux gelés brûlent beaucoup plus facilement que les copeaux non gelés et fournissent une énergie supérieure.

La teneur en humidité de ces copeaux a été mesurée avec la même méthode que pour les copeaux non gelés, ce qui peut expliquer en partie les rendements supérieurs à 100 p. 100. Le sur-rendement des copeaux gelés est toutefois réel et s'explique par la dessiccation des copeaux lors de la congélation. En effet, lors du passage de l'état liquide à l'état solide, l'eau contenue dans les particules de bois prend de l'expansion et se trouve en partie amenée à la surface de ces mêmes copeaux.

Etant donné que l'eau et le bois sont de mauvais conducteurs de chaleur, et que le temps nécessaire aux copeaux pour parcourir la distance entre la trémie et le foyer est faible, l'eau n'a pas le temps de repénétrer dans les copeaux, mais plutôt s'évapore ou se sublime à l'approche du brûleur. L'évaporation de l'eau en surface exigerait alors moins d'énergie que celle de l'eau située à l'intérieur du bois.

Tableau 18: Comparaison du pouvoir calorifique des copeaux avec la puissance calorifique déployée par la fournaise, pour la détermination de son rendement thermique global

Date	Température de l'air (°C)		Différence (°C)	Vitesse de l'air sortie	Humidité des copeaux %	Masse des copeaux kg (lb)	Durée de combustion (heures)	Pouvoir calorifique Fh 8% MJ/kg (BTU/lb)	Puissance calorifique PC MJ/min (BTU/h)	Rendement (%)
	entrée	sortie								
31/01/85	16,0	35,0	19,0	5,0	35,0	122,0 (269,0)	15,0	13,9 (5985)	1,23 (70242)	65,5
06/02/85	17,5	38,0	20,5	5,0	22,1	120,0 (265,0)	15,0	15,7 (6750)	1,32 (75242)	64,3
21/02/85	22,0	46,0	24,0	5,0	60,5	180,0 (397,0)	22,0	11,3 (9860)	1,56 (88815)	101,3 ¹
26/02/85	19,0	36,0	17,0	5,0	67,8	177,0 (390,0)	22,0	10,6 (4570)	1,10 (62623)	77,2
13/03/85	18,0	35,0	17,0	5,0	33,7	120,0 (265,0)	15,0	14,0 (6038)	1,11 (62861)	59,0
14/03/85	18,0	40,0	22,0	5,0	52,3	180,0 (397,0)	22,0	12,0 (5180)	1,43 (81196)	86,9 ¹
21/03/85	15,0	34,0	19,0	5,0	42,5	180,0 (397,0)	22,0	13,1 (5629)	1,23 (70242)	69,2
22/03/85	13,0	40,0	27,0	5,0	55,4	180,0 (397,0)	22,0	11,8 (5056)	1,74 (98815)	108,3 ¹

(1) Copeaux gelés.

3.7.3 Comparaison avec la valeur énergétique du mazout à chauffage

L'huile à chauffage conventionnelle produit 156 000 *BTU* par *gallon*, soit l'équivalent de 36,2 MJ/litre, ou 45,3 MJ/kg à 100 p. 100 d'efficacité. En supposant que les équipements de combustion peuvent assurer une efficacité ou un rendement de 80 p. 100, soit 29,0 MJ/litre ou 36,2 MJ/kg, le tableau suivant montre le nombre de kg de biomasse requis pour équivaloir à un litre de mazout à chauffage en fonction de différents taux d'humidité et rendements possibles.

Le tableau 19 peut être interprété de la façon suivante. La première colonne représente les taux d'humidité que nous avons mesurés à différents moments

au cours de l'expérience. La deuxième colonne est l'énergie calorifique que possède 1 kg de copeaux de bois compte tenu de sa teneur en humidité. La troisième colonne indique le rendement thermique global de la fournaise obtenu avec des copeaux aux teneurs en humidité de la colonne 1. La colonne 4 est le pouvoir qu'on peut effectivement utiliser d'une masse donnée de copeaux avec le système, compte tenu de son rendement et correspond au produit des colonnes 2 et 3. La dernière colonne du tableau représente, compte tenu de différentes teneurs en humidité des copeaux, la masse verte de copeaux qu'il faudrait brûler pour obtenir la même énergie que par la combustion d'un litre d'huile. Il s'agit, pour obtenir ce résultat, de diviser 29,0 MJ/litre par la valeur de la colonne 4.

Tableau 19: Masse verte de copeaux nécessaire pour équivaloir à un litre d'huile à chauffage

Taux observé d'humidité des copeaux (%)	Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Rendement thermique global (%)	Puissance utile par masse verte de copeaux (MJ/kg)	Masse verte de copeaux par volume d'huile	
				kg/litre	lb/gal
22,10	15,60	64,30	10,00	2,90	29
33,70	14,00	59,00	8,30	3,50	35
35,00	13,90	65,50	9,10	3,20	32
42,50	13,00	69,20	9,00	3,20	32
52,30	12,00	86,90 ⁽¹⁾	10,40	2,80	28
55,40	11,70	108,30 ⁽¹⁾	12,70	2,30	23
60,50	11,20	101,30 ⁽¹⁾	11,30	2,60	26
67,80	10,60	77,20	8,20	3,50	35

(1) Copeaux gelés

Conclusion

Travaux sylvicoles

Les résultats obtenus lors de la réalisation de travaux sylvicoles dans des peuplements très denses montrent que le nombre de tiges coupées varie de 3 à 4 par minute, selon qu'il s'agisse de la coupe d'éclaircie ou de la coupe à blanc. En ce qui concerne la superficie traitée par heure productive, elle varie de 83 à 172 mètres carrés.

Des différences appréciables ont été décelées entre la biomasse inventoriée, la biomasse transportée et celle finalement utilisée à des fins énergétiques. Ces différences permettent de conclure que des recherches devront être poursuivies afin de déterminer les pertes réelles de masse à chaque étape de travail ou de l'utilisation de cette dernière. En même temps, on devra se pencher sur les conséquences de la perte de masse due à la détérioration lors des différentes étapes de transformation et d'entreposage.

En ce qui concerne le coût de réalisation des travaux de récolte et de débardage, ils varient de 22 à 27 \$ par tonne anhydre pour la coupe à blanc et de 28 à 41 \$ dans la coupe d'éclaircie. Ces coûts sont basés sur les hypothèses formulées au départ et ont été calculés à partir de traitements effectués sur de petites superficies.

Utilisation de la biomasse non marchande à des fins énergétiques

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de récupérer avantageusement les copeaux de bois non marchand à des fins énergétiques, malgré les taux d'humidité variables de ces derniers, lesquels ont varié de 22 à 68 p. 100, par rapport à la masse sèche (45 p. 100 en moyenne). Quant au rendement moyen de la fournaise, il a été de 73 p. 100 (énergie transformée par rapport à l'énergie disponible) engendrant ainsi une puissance calorifique de 1,38 Mj/minute (78 400 BTU/heure). De plus, un rendement et une puissance calorifique supérieurs ont été observés lors de la combustion de copeaux gelés.

On peut donc conclure, à la lumière des résultats obtenus, que l'utilisation de la biomasse à des fins de production d'énergie est très prometteuse et qu'il y a place pour la poursuite d'autres travaux en ce sens, soit:

- réalisation de travaux sylvicoles de plus grande envergure et dans différentes conditions afin de mieux connaître les facteurs qui limitent la récupération de la biomasse non commerciale;
- recherche d'une utilisation plus complète de la biomasse récoltée, que ce soit à des fins
 - industrielles (sciage, pâte, autres)
 - énergétiques
 - de fertilisation
 - autres;
- élargissement des tests de rendement énergétiques à d'autres essences et à divers taux d'humidité.

Enfin, des recherches plus intensives au niveau de la réalisation des travaux sylvicoles devraient être poursuivies afin de mieux connaître la productivité de ces travaux en fonction des conditions variables des peuplements et de divers degrés d'intervention. Différentes formes d'exécution des travaux devraient être expérimentées de façon à en améliorer l'efficacité, d'en réduire les coûts et de pouvoir éventuellement proposer des alternatives rentables sur le plan économique écologique aux méthodes actuelles d'intervention en forêt.

Ouvrages cités

- Ash, M.J., P.C. Knoblock et N. Peters, 1980. *Energy analysis of energy from the forest options*. Projet ENFOR n° P-59, Service canadien des forêts, Environnement Canada.
- Bernier, J., 1979. *La pompe de chaleur: mode d'emploi*. Paris, Pye Édition.
- Kollman, F.F.P. et W.A. Côté Jr., 1975. *Principles of wood science technology*. New York, Springer-Verlag.
- Ouellet, D., 1983. *Équations de prédiction de la biomasse de douze essences commerciales du Québec*. Projet ENFOR n° P-236. Centre de foresterie des Laurentides, Service canadien des forêts, Environnement Canada. 35 p.
- Thörnquist, T., 1984. *Storing of slash: moisture content decisive*. dans: *Forest Energy in Sweden - report from seven years of whole tree utilization research*. Swedish University of Agricultural Sciences.

Les travaux sylvicoles dans les jeunes peuplements rendent souvent disponible une biomasse forestière qu'on peut difficilement récupérer par les méthodes traditionnelles. Son utilisation à des fins de production d'énergie contribuerait à rentabiliser ces travaux et permettrait une meilleure utilisation de la ressource forestière. C'est pourquoi le ministère de l'Énergie et des Ressources participe aux recherches qui permettent d'atteindre cet objectif



Gouvernement du Québec
Ministère de l'Énergie
et des Ressources (Forêts)
**Direction de la recherche
et du développement**
Service du transfert
de technologie

ISBN 2-550-20804-8
O.D.C. 839.81(047.3)(714)
L.C. SD 544

MER 5310-100