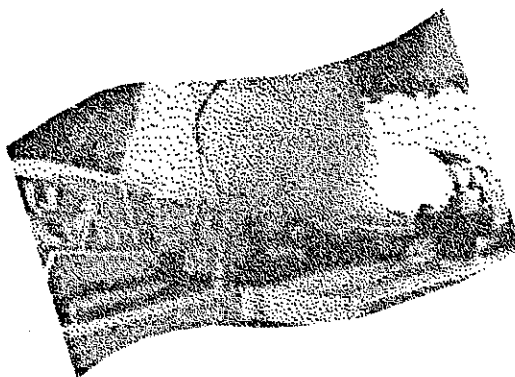


**Méthode d'essai
avec volant d'inertie
pour évaluer la performance
d'éléments de protection
contre les scies à chaîne**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Denis Turcot, Jean Arteau,
Renaud Daigle et Jérôme Boutin

Juin 1996

R-134

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Méthode d'essai
avec volant d'inertie
pour évaluer la performance
d'éléments de protection
contre les scies à chaîne**

Denis Turcot, Jean Arteau,
Renaud Daigle et Jérôme Boutin
Programme sécurité-ingénierie, IRSST

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

RÉSUMÉ

La mise au point d'une méthode d'essai pour évaluer les bottines de protection pour les travailleurs forestiers a pour objectif de fournir un outil adéquat aux utilisateurs et aux fabricants pour pouvoir évaluer la performance des produits existants ou en développement.

La méthode proposée pour évaluer les bottines consiste à mesurer l'énergie dissipée pour couper l'équipement de protection avec une scie à chaîne. En utilisant le concept de mesure d'énergie, on tient compte du couple ou de l'effort pour entraîner la chaîne, de la vitesse de la chaîne et de la période de temps pour couper l'équipement à évaluer. L'énergie est donc une mesure physique globale qui s'applique bien au phénomène de coupure provoquée par une scie à chaîne.

Dans la méthode d'essai mise au point, on utilise un moteur pour entraîner un volant qui agit comme réservoir d'énergie et qui entraîne la chaîne. Une fois la vitesse d'essai atteinte, on désengage le moteur, et le volant est alors la seule source d'énergie qui entraîne la chaîne. La chaîne entre alors en contact avec la botte à évaluer.

Un capteur installé entre le volant et la chaîne permet d'enregistrer en temps réel le couple transmis par le volant à la chaîne. Il est alors possible de déterminer l'énergie dissipée pendant la coupure de l'équipement évalué.

La phase d'essai a permis de valider le fonctionnement du banc d'essai et de vérifier la faisabilité du principe de mesure énoncé. Les deux variables retenues pour l'étude, l'énergie et le temps de traversée ont été évalués pour différents matériaux et dans différentes conditions d'essai. Les conditions d'essai retenues sont la vitesse initiale et le niveau d'énergie initiale.

Les résultats obtenus ont montré que l'énergie requise pour couper au travers d'un échantillon est une mesure répétitive et indépendante de la vitesse initiale d'essai, ce qui n'est pas le cas du temps de traversée. La dispersion des résultats pour l'énergie est inférieure à celle obtenue avec le temps de traversée.

Contrairement aux méthodes d'essai existantes, la méthode avec volant est indépendante du système d'entraînement utilisé et permet le remplacement ou l'entretien du moteur qui entraîne le volant sans que les résultats ne soient affectés. Cela nous assure que la méthode d'essai ne sera pas désuète après quelques années d'application.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES SYMBOLES	vi
1. INTRODUCTION	1
2. REVUE DES MÉTHODES D'ESSAI EXISTANTES	1
3. ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE	6
3.1 Calcul de l'énergie	6
3.2 Facteur de correction pour l'énergie	7
3.2.1 <i>Facteur de correction pour la géométrie des éprouvettes</i>	7
3.2.2 <i>Facteur de correction pour la dureté des éprouvettes</i>	7
4. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI	11
4.1 Le système d'entraînement de la chaîne	11
4.2 Le système de contrôle	13
4.3 Le système d'acquisition et de traitement des données	14
4.4 Le support d'échantillon	14
4.5 Paramètres d'essai	16
4.6 Fonctionnement à vide	16
4.6.1 <i>Temps d'arrêt à vide (t_v)</i>	16
4.6.2 <i>Énergie mesurée dans les essais à vide (E_v)</i>	19
4.6.3 <i>Équation empirique de E_v</i>	21
5. MATÉRIAUX ÉVALUÉS	23
6. RÉSULTATS ET DISCUSSION	25
6.1 Essais avec le bois	25
6.1.1 <i>Dépendance du temps de traversée (t_p) et de la vitesse d'essai</i>	25
6.1.2 <i>Énergie pour couper l'échantillon</i>	28
6.1.3 <i>Dépendance de l'énergie et de la vitesse initiale</i>	29
6.1.4 <i>Énergie de coupure et dureté des éprouvettes</i>	33
6.2 Essais avec les caoutchoucs	36
6.3 Essais avec les bottines de protection	38
7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	41
ANNEXE 1 : Calcul de E_s	44
ANNEXE 2 : Procédure d'essai	46
ANNEXE 3 : Période de réchauffement	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1a	Comparaison des différentes méthodes d'essai	3
Tableau 2.1b	Comparaison des différentes méthodes d'essai (suite)	4
Tableau 2.2	Avantages et inconvénients des méthodes normalisées	5
Tableau 3.1	Vitesses équivalentes entre les différents volants	6
Tableau 4.1	Coefficient de variation des temps d'arrêt à vide (t_v)	19
Tableau 4.2	Coefficient de variation de l'énergie cumulée à vide (E_v)	21
Tableau 4.3	Coefficients moyens A et b dans l'équation de E_v	23
Tableau 5.1	Grille d'essai	24
Tableau 6.1	Dispersion du temps de traversée (t_c) pour le pin	28
Tableau 6.2	Énergie pour couper les éprouvettes de pin	29
Tableau 6.3	Dépendance de l'énergie et de la vitesse d'essai	33
Tableau 6.4	Dureté et énergie	34
Tableau 6.5	Temps de traversée et $E_{d,s}$ pour l'érable	35
Tableau 6.6	Comparaison du t_c et de E_m pour l'érable et le pin	35
Tableau 6.7	Dispersion du t_c et de E_m pour les caoutchoucs	36
Tableau 6.8	Comparaison des résultats obtenus pour les bottines	38
Tableau 6.9	E_s pour quelques bottines	40

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Géométrie des éprouvettes utilisées	8
Figure 3.2 Essai de dureté	9
Figure 3.3 Calcul de la section coupée	10
Figure 4.1 Banc d'essai	12
Figure 4.2 Exemple de données enregistrées	15
Figure 4.3 Temps d'arrêt à vide et vitesse d'essai	17
Figure 4.4 Dispersion des t_r	18
Figure 4.5 E_m et vitesse d'essai	20
Figure 4.6 Énergie cumulative pour un essai à vide	22
Figure 6.1 Temps de traversée et vitesse d'essai	26
Figure 6.2 Temps de traversée et modèle asymptotique	27
Figure 6.3 E_m et V pour le pin, volant de 127 mm	30
Figure 6.4 E_m et V pour le pin, volant de 152 mm	31
Figure 6.5 E_m et V pour le pin, volant de 203 mm	32
Figure 6.6 E_m et V pour les caoutchoucs	37
Figure 6.7 Comparaison de E_m pour différentes bottes	39

LISTE DES SYMBOLES

A_d	(cm ²)	Surface de la section droite coupée
E_d	(J/N)	Énergie corrigée pour la dureté des éprouvettes de bois
E_m	(J)	Énergie maximum cumulée
E_s	(J/cm ²)	Énergie corrigée pour la surface de la section droite coupée
$E_{d,s}$	J/(N·cm ²)	Énergie corrigée pour la dureté et la géométrie des éprouvettes de bois
E_v	(J)	Énergie à vide
F_{3mm}	(N)	Force de pénétration moyenne à 3 mm
I	(kg·m ²)	Inertie du volant
r^2		Coefficient d'explication
t_c	(s)	Temps de traversée
t_v	(s)	Temps d'arrêt à vide
T	(N·m)	Couple
V	(tr/min)	Vitesse de rotation
ω	(rad/s)	Vitesse angulaire

1. INTRODUCTION

Le travail avec une scie à chaîne comporte des risques de blessures, qu'on soit bûcheron professionnel ou occasionnel. En effet, les fichiers d'accidents de la Commission de la santé et de la sécurité au travail (CSST) du Québec, pour les années de 1991 à 1994, contiennent un peu plus de 700 accidents occasionnés par une scie à chaîne. Plus de la moitié (56 %) de ces accidents provient du secteur de la forêt. En tout, 75 blessures aux pieds sont causées par une scie à chaîne et entraînent en moyenne une perte de travail d'environ huit semaines.

Pour se protéger des blessures causées par les scies à chaîne, les travailleurs portent des équipements de protection. La question qui se pose : comment évaluer la performance des équipements de protection?

Pour évaluer les équipements de protection contre les scies à chaîne, il existe deux grandes catégories de méthodes d'essai; les méthodes en Amérique du Nord utilisant une scie à essence et les méthodes en Europe utilisant un volant d'inertie. Pour les méthodes d'essai utilisant une scie à essence, les résultats obtenus dépendent, entre autres, du type de scie à essence utilisé. Si pour des raisons d'entretien ou de bris, on doit remplacer la scie à chaîne par une autre d'un modèle différent, il n'est pas certain que les mesures de performance soient identiques à celles précédemment obtenues. Cela rend les méthodes d'essai avec scie à essence, difficilement reproductibles. Pour ces raisons, les méthodes d'essai avec scie à essence sont sujettes à devenir désuètes.

Dans la méthode européenne, l'utilisation d'un volant d'inertie assure une plus grande période d'exploitation de la méthode d'essai, car le système d'entraînement de la chaîne ne dépend pas du moteur utilisé. Par contre, la mesure de la performance dans cette méthode d'essai ne permet pas de classer les équipements de protection du plus faible au plus résistant. De plus, la méthode européenne ne permettrait pas, selon les données de la norme, de faire la différence entre des bottines possédant un niveau de protection moyen contre les scies à chaîne et celles avec un niveau élevé.

Face à cette situation, on a donc développé une méthode d'essai qui satisfait aux critères suivants : une variable physique globale pour évaluer la performance des bottines de protection, un système d'entraînement indépendant de la méthode d'essai et une méthode d'essai facilement reproductible. Pour répondre aux besoins, un volant d'inertie est utilisé pour entraîner la scie à chaîne. L'énergie nécessaire pour couper au travers de l'équipement avec une scie à chaîne est retenue comme la principale variable pour évaluer la performance des bottines de protection. Ainsi, les mesures effectuées ne dépendent pas du moteur utilisé pour l'entraînement de la scie à chaîne.

La mise au point de la présente méthode d'essai consiste à concevoir un banc d'essai et à valider le principe de mesure d'énergie requise pour couper l'échantillon à évaluer. Pour faciliter cette phase de validation, nous avons utilisé des matériaux homogènes tels que le bois et le caoutchouc. Pour chacun de ces matériaux, nous avons évalué la dispersion des résultats pour des conditions d'essai identiques.

2. REVUE DES MÉTHODES D'ESSAI EXISTANTES

Depuis plusieurs années, des travaux de recherche visant à déterminer la performance des équipements de protection pour les travailleurs forestiers ont été réalisés [1-11,13,15]. En premier, les chercheurs ont travaillé à développer des méthodes d'essai pour évaluer le niveau de protection qu'offrent les jambières contre les scies à chaîne.

Il existe deux grandes catégories de méthode d'essai : les méthodes utilisant une scie à chaîne à essence, toutes localisées en Amérique du Nord (tableau 2.1a), et les méthodes utilisant un moteur électrique ou un volant d'inertie comme système d'entraînement de la chaîne (tableau 2.1b). Dans les méthodes utilisant des scies à chaîne à essence (moteur à combustion thermique), le moteur reste embrayé durant tout le temps que dure l'essai. Pour les méthodes d'essai avec moteur électrique ou volant d'inertie, on distingue deux modes opératoires : essai avec le moteur embrayé ou non durant la coupure de l'échantillon. Le moteur électrique non embrayé durant l'essai est en fait un volant d'inertie. C'est le cas de la méthode d'essai suédoise [13] qui a permis l'élaboration de la norme européenne [8].

Les variables utilisées pour la mesure de la performance sont différentes selon les méthodes d'essai. Les méthodes d'essai avec scie à essence [5-7,11] utilisent la vitesse limite de blocage (VLB) ou encore la limite supérieure de la vitesse sans que l'équipement évalué ne soit coupé de part en part. Les méthodes d'essai européennes avec volant d'inertie [8,9,13] préconisent, comme critère de performance, la vitesse initiale maximum admissible sans qu'il y ait traversée. La méthode d'essai utilisant une scie à chaîne électrique continuellement embrayée [2] durant l'essai recommande l'utilisation de l'énergie comme critère de performance.

Bien que ces méthodes permettent d'obtenir un classement relatif des différents modèles d'équipement de protection, elles ont des faiblesses (tableau 2.2). Pour les méthodes ASTM [5,6] et CAN/BNQ [7] utilisant de véritables scies à chaîne avec moteur à essence, nous avons observé que les performances du moteur à combustion évoluent avec le temps et par le fait même, les résultats changent et il faut alors comparer les valeurs obtenues pour les différents équipements évalués à celles obtenues pour des matériaux de référence. Avec ce type de montage, il est difficile de régler et maintenir la vitesse d'essai à une valeur donnée avant que la scie à chaîne entre en contact avec l'équipement à évaluer. Comme pour plusieurs de ces montages, la variable évaluée étant la vitesse limite de blocage, il faut un plus grand nombre d'essais pour la déterminer. De plus, le bruit et l'émanation des gaz de combustion de la scie nécessitent des installations spéciales pour opérer ce type de banc d'essai.

Quant à la méthode d'essai utilisant une scie à chaîne électrique [2] elle est sujette à devenir désuète tout comme les méthodes avec scie à essence.

La norme européenne EN 381-1 [8,9] utilise un volant d'inertie comme système d'entraînement. Ce banc d'essai permet d'atteindre des vitesses linéaires de chaîne allant jusqu'à 28 m/s mais avec un niveau d'énergie initiale peu élevé. Ainsi, à une des vitesses d'essai prescrites dans la norme EN 381, soit 20 m/s, l'énergie initiale disponible est d'environ 370 Joules (calculée selon les données sur l'inertie du système tel que publiées dans la norme) ce qui n'est pas suffisant pour couper au travers d'une botte classée moyenne selon nos calculs (550 Joules).

Les différences entre les méthodes d'essai ainsi que les différentes variables utilisées pour la mesure de la performance rendent la comparaison des résultats difficiles. Nous avons donc orienté nos travaux sur l'utilisation d'une variable de mesure plus générale, soit l'énergie requise pour couper l'équipement à évaluer par une scie à chaîne. Nous avons choisi d'utiliser un système de volant d'inertie pour l'entraînement de la chaîne et un système de mesure permettant d'évaluer l'énergie dissipée pendant la coupure de l'échantillon évalué.

Tableau 2.1a Comparaison des différentes méthodes d'essai

Entraînement de la chaîne : Critère de performance :		Scie à chaîne à essence Vitesse limite de blocage (VLB)		
Méthode d'essai		Putnam et coll. [11] USDA Forest Service	IRSST CAN/BNQ 1923-095-M90 [7]	ASTM F1414-92 [5,6]
Modèle de chaîne		Oregon 72LP	Oregon 73LP	Oregon 72LP
Dimension de l'échantillon		711 x 203 mm	711 x 203 mm	710 x 205 mm
Diamètre du support de l'échantillon		160 mm	152 mm	152 mm
Scie à chaîne ou moteur		Homelite 350	Husqvarna 266 SE	Husqvarna 266 XP
Cylindrée du moteur		57,2 cm ³	66,7 cm ³	66,7 cm ³
Puissance maximum		2,6 kW à 8 000 trs/min	3,1 kW à 8 500 trs/min	3,3 kW à 8 500 trs/min
Longueur du guide-lame		610 mm	457 mm	500 mm
Hauteur de chute		6 mm	50 mm	50 mm
Force statique au point de contact		50 N	15 N	15 N
Équipements de protection évalués		jambières	jambières	jambières et bottines

Tableau 2.1b Comparaison des différentes méthodes d'essai (suite)

Entraînement de la chaîne :	Moteur embrayé		Moteur non embrayé pendant l'essai (vitesse décroissante)	
	Énergie			Vitesse maximum sans coupure de part en part
Méthode d'essai	IRSST [2]	Suède Statens Maskin-Provingar [13]	EN 381 CEN/TC 162/WG5 [8,9]	
Modèle de chaîne	Sthil 25 TS64	Oregon 21LP	Oregon 21LP	
Diamètre du support de l'échantillon	...	100 mm	100 mm	
Scie à chaîne ou moteur	Scie électrique Husqvarna	Moteur électrique à vitesse variable	...	
Vitesse de la chaîne pendant l'essai	Moteur embrayé (Note $V_{max} = 12$ m/s)	Décroissante	Décroissante	
Puissance maximum	1,4 kW	1,0 kW	...	
Inertie des pièces en mouvement	...	900 ± 50 kg·m ²	$0,9 \times 10^3$ kg·m ² \pm 5 %	
Longueur du guide-lame	406 mm	330 mm	330 mm	
Hauteur de chute	32 mm	3 \pm 1 mm	3 \pm 1 mm	
Force statique au point de contact	15 N	15 N	15 N	
Équipements de protection évalués	bottines	jambières	jambières, bottines, gants et guêtres	

Tableau 2.2 Avantages et Inconvénients des méthodes normalisées

Type d'entraînement de la chaîne	SCIE À ESSENCE	Volant d'inertie
Méthodes normalisées	CAN/BNQ 1923-095-M90 ASTM F1414-92	CEN/TC/162 N/EN 381
Avantages	Résultats d'essai publiés	Simplicité d'opération
	Essais conformes avec la réalité : scie à essence et moteur en marche pendant l'essai	Pas d'influence du système d'entraînement, puisqu'il n'est pas engagé pendant l'essai
	En opération depuis plusieurs années	
Inconvénients	Difficile d'opération pour : le réglage de la vitesse d'essai, le bruit et les émanations d'essence	Pas de données publiées
	Influence des paramètres d'essai sur les résultats (Ex. : période de rodage de la scie à chaîne, variation de l'indice d'octane de l'essence ...)	Le niveau d'énergie initiale pour les essais est trop faible
	Les fabricants ont remplacé les modèles de scie à chaîne utilisés par de nouveaux modèles	Critère de performance est fonction de l'arrêt complet de la chaîne (ex. : de $V_f=20$ m/s à 0 m/s)

3. ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE

La méthode d'essai proposée consiste à évaluer l'énergie transmise par un disque en acier en rotation à une chaîne qui coupe un échantillon. La première section présente l'évaluation de l'énergie nécessaire pour couper un échantillon. La deuxième section explique les facteurs de correction que nous avons appliqués à la mesure de l'énergie.

3.1 Calcul de l'énergie

Le disque ou volant, est monté sur un arbre qui entraîne la chaîne. Un capteur installé entre celui-ci et la chaîne mesure le couple transmis du volant à la chaîne. Le volant est amené à la vitesse d'essai désirée, puis tourne librement jusqu'à la fin de l'essai.

Dans les essais, trois volants de différents diamètres ont été utilisés. L'énergie disponible initialement dépend de la vitesse initiale et du volant utilisé.

Ainsi pour un volant :

- R_o : rayon extérieur
- ρ : densité de l'acier
- ω : vitesse angulaire (rad/s) du volant
- e : épaisseur du disque

l'inertie du volant est

$$I = \frac{\rho \pi e}{2} R_o^4$$

et l'énergie du volant en rotation est

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Cette équation permet de calculer l'énergie disponible initialement pour chaque volant à une vitesse donnée. Les deux équations précédentes permettent également de calculer des vitesses équivalentes pour les volants de diamètres différents qui correspondraient à un même niveau d'énergie initiale. Le volant de 203 mm tournant à une vitesse V peut fournir la même énergie initiale que le volant de 152 mm tournant à une vitesse plus élevée, soit $1,78 V$ (tableau 3.1).

Tableau 3.1 Vitesses équivalentes entre les différents volants

Volant	127 mm	152 mm	203 mm
127 mm	1,00	1,44	2,56
152 mm	0,69	1,00	1,78
203 mm	0,39	0,56	1,00

Durant les essais, l'énergie est calculée à partir du couple et de la vitesse instantanée. L'énergie transmise du volant à la chaîne, en passant par le mesureur de couple, est donnée par l'équation suivante :

$$E_m = \int_0^{t_c} T \cdot \omega \, dt$$

où T est le couple enregistré pendant la coupure du matériau évalué, ω la vitesse angulaire et E_m représente l'énergie maximum cumulée pour le temps de coupure (t_c) mesuré. Les unités de l'énergie sont les J. Le même calcul s'applique pour l'évaluation de l'énergie à vide (E_v) lorsque la chaîne ne coupe aucun échantillon.

3.2 Facteur de correction pour l'énergie

Pour valider la méthode d'essai, on a utilisé des matériaux plus homogènes que les équipements de protection. On a retenu comme matériau, des éprouvettes de bois ayant une forme demi-cylindrique (figure 3.1). L'utilisation de ces matériaux nous a amenés à considérer deux facteurs de correction pouvant s'appliquer à la mesure de l'énergie pour couper ces matériaux, soit un facteur de correction pour la géométrie des éprouvettes et un autre facteur pour la dureté respective de chacune des éprouvettes d'un même type de bois.

3.2.1 Facteur de correction pour la géométrie des éprouvettes

Pour tenir compte de l'effet de la géométrie des éprouvettes, on a divisé l'énergie maximum cumulée (E_m) par la surface de la section droite coupée (A_d). Les unités utilisées dans ce cas-ci sont les J/cm². Le rayon des demi-cylindres de bois étant constant, il est possible qu'il y ait une légère excentricité e par rapport au centre du demi-cylindre, résultant de la fabrication des éprouvettes de bois (figure 3.2). En mesurant uniquement la hauteur h , on peut calculer l'excentricité et établir en fonction des autres constantes liées à la géométrie du banc d'essai, la surface de la section droite coupée, A_d , soit la partie hachurée de la figure 3.2. L'énergie par unité de surface coupée, E_s , s'exprime comme suit :

$$E_s = \frac{E_m}{A_d}$$

L'annexe 1 décrit les calculs pour obtenir la valeur de la surface de la section droite coupée (A_d) en fonction de la géométrie du banc d'essai et de celle de l'éprouvette.

3.2.2 Facteur de correction pour la dureté des éprouvettes

De plus, l'utilisation des éprouvettes de bois, nous a amenés à définir une autre variable : l'énergie corrigée pour la dureté des éprouvettes ou E_c . On a donc corrigé l'énergie maximum cumulée (E_m) obtenue pour les essais avec les éprouvettes de bois, pour tenir compte des différences de dureté entre les éprouvettes d'un même type de bois.

Pour cela, on a réalisé une dizaine d'essais de pénétration sur chacune des éprouvettes. Ces essais consistent à enfoncer un poinçon de forme déterminée dans les échantillons de bois, tout en maintenant constante la vitesse du poinçon à 100 mm/min (figure 3.3). Un appareil d'essai de traction-compression

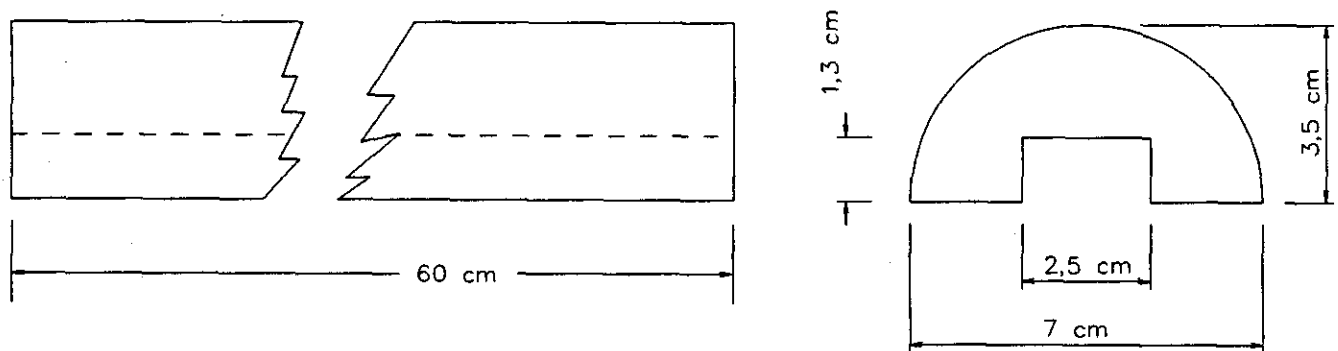
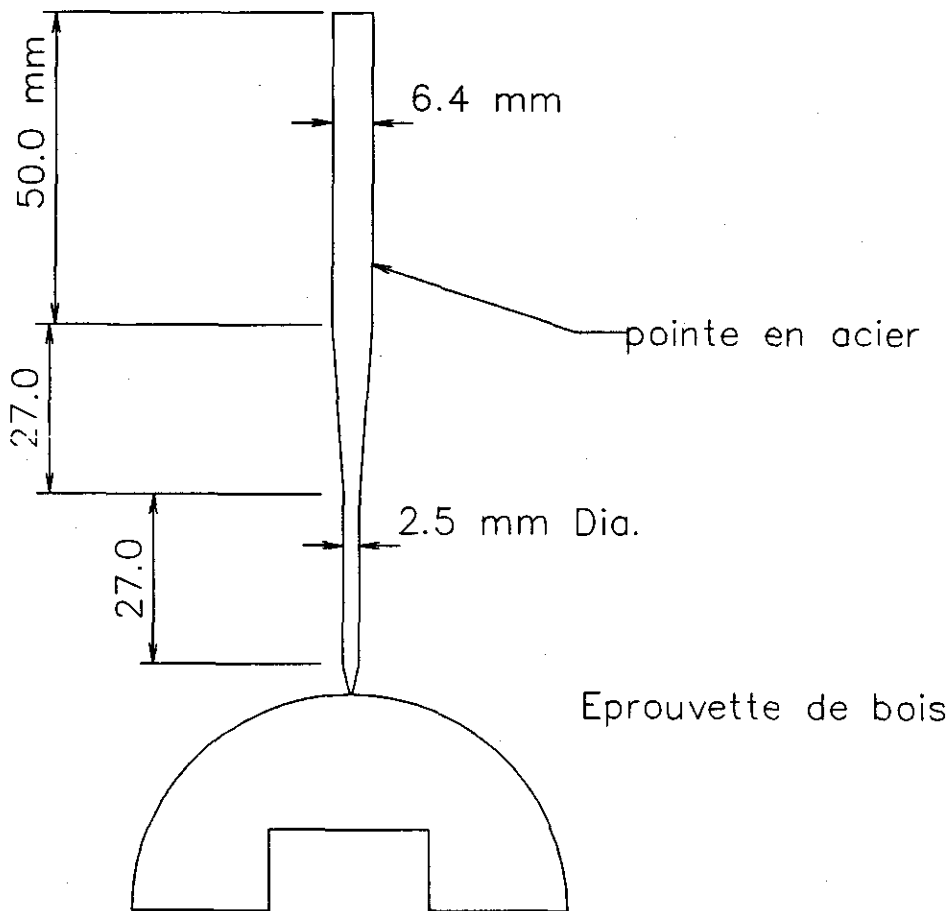


Figure 3.1 Géométrie des éprouvettes utilisées



Agrandissement de la pointe

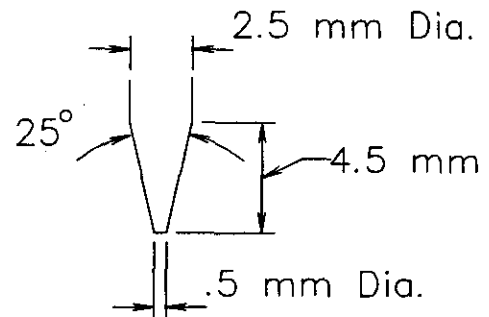


Figure 3.2 Essai de dureté

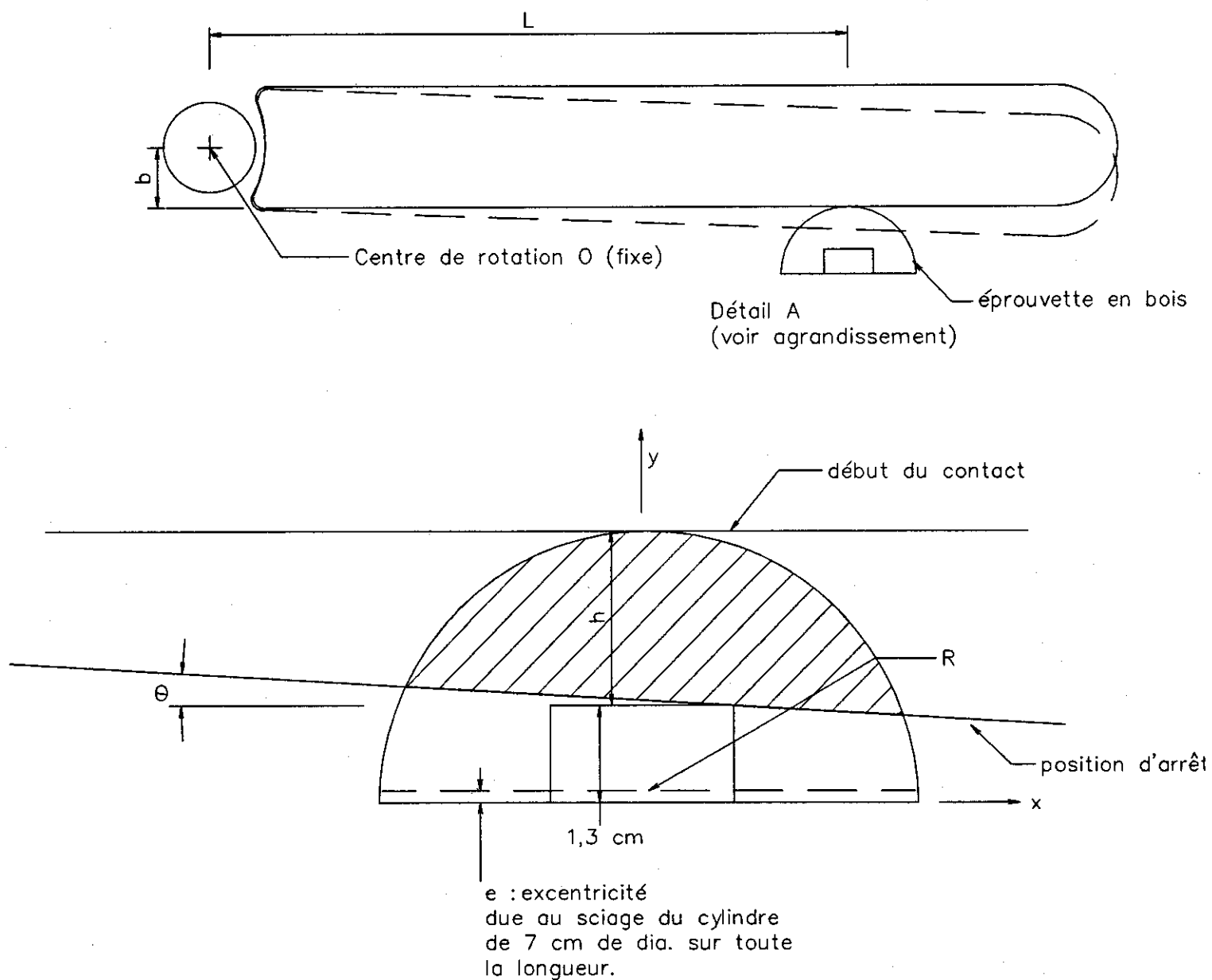


Figure 3.3 Calcul de la section coupée

de marque MTS Sintech a été employé pour réaliser les essais de dureté. Le capteur de force utilisé a une plage de mesure de 0 à 900 N (0 ± 200 lbs·f) avec une précision de 0,1 %. On a retenu comme critère de dureté la force mesurée au moment où le poinçon a pénétré de 3 mm dans l'éprouvette de bois. La valeur moyenne de la force pour pénétrer de 3 mm les éprouvettes est représentée par F_{3mm} . Pour tenir compte de l'effet de la dureté d'une éprouvette, on divise l'énergie E_m , mesurée pendant les essais de coupure, par la force moyenne de pénétration, mesurée à 3 mm, de cette éprouvette. Ainsi, l'énergie corrigée pour la dureté de l'éprouvette k , est :

$$E_d = E_m \times \frac{1}{[F_{3mm}]_k}$$

Le terme du dénominateur représente la force moyenne évaluée à 3 mm de pénétration dans l'éprouvette de bois k considérée. Les unités de E_d sont des J/N. Finalement, l'énergie corrigée pour la dureté et la géométrie, $E_{d,s}$, est :

$$E_{d,s} = \frac{E_m}{A_d} \times \frac{1}{[F_{3mm}]_k}$$

Les unités de $E_{d,s}$ sont des J/(N·cm²).

4. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

Le banc d'essai est composé essentiellement de quatre parties qui sont détaillées dans les sections suivantes : le système d'entraînement de la chaîne, le système de contrôle, le système d'acquisition et de traitement des données, et finalement le support d'échantillon. La cinquième section décrit les paramètres que le banc d'essai permet de contrôler. Finalement, la dernière section montre comment la mesure du temps d'arrêt à vide (t_0) permet de s'assurer du bon fonctionnement du banc d'essai.

4.1 Le système d'entraînement de la chaîne

Le schéma du banc d'essai représenté à la figure 4.1, nous montre les différentes composantes du système d'entraînement. Dans cette figure, de gauche à droite, on voit que le système d'entraînement est constitué d'un moteur à vitesse variable (moteur DC de type servo), d'une unité frein et embrayage, d'un volant d'inertie, d'un appareil de mesure du couple et de la vitesse, et finalement du pignon d'entraînement de la chaîne installé sur l'arbre. La précision de montage de ces pièces est essentielle pour obtenir des vitesses de rotation de plus de 8 000 tours/minute tout en effectuant des mesures en continu du couple transmis par le volant à la chaîne.

L'unité frein et embrayage permet de découpler le moteur du reste du système d'entraînement une fois la vitesse d'essai atteinte.

Le volant d'inertie consiste en un disque en acier monté sur l'arbre d'entraînement. Il est situé entre l'unité frein et embrayage, et l'appareil de mesure du couple. Des volants de 127 mm, 152 mm et 203 mm de diamètre (25,4 mm d'épaisseur) ont été fabriqués pour pouvoir varier le niveau d'énergie disponible initialement à une même vitesse d'essai.

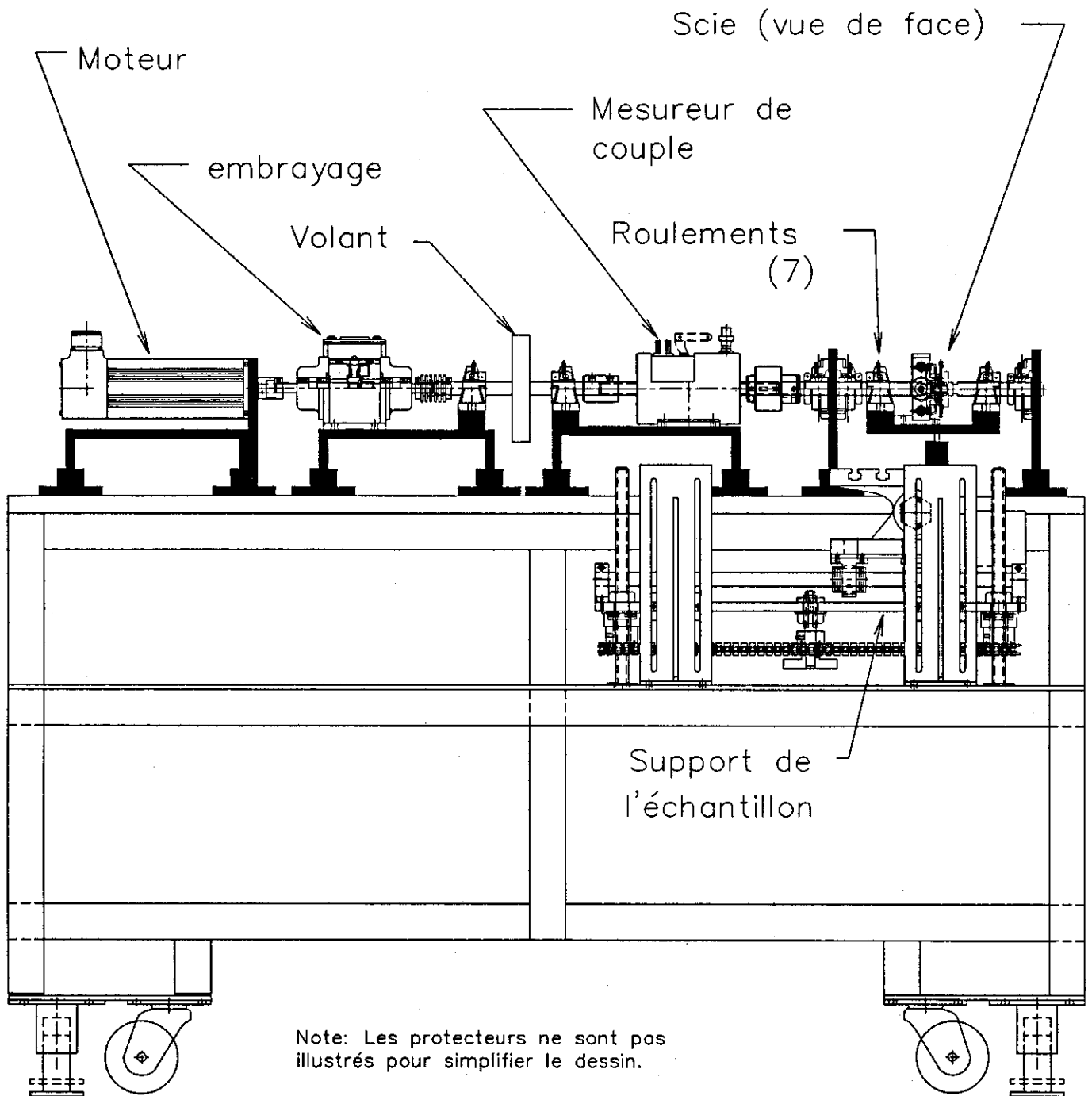


Figure 4.1 Banc d'essai

L'utilisation d'un accouplement de protection entre le mesureur de couple et le pignon d'entraînement, permet le débrayage mécanique lorsque le couple agissant sur l'arbre dépasse une valeur fixée, prévenant ainsi tout dommage à l'appareil de mesure.

Le pignon d'entraînement (modèle 7T Oregon) de la chaîne est glissé librement sur la partie mâle de la coupole d'embrayage centrifuge, comme sur une vraie scie à chaîne. La partie femelle de la coupole de l'embrayage centrifuge est fixée sur l'arbre d'entraînement. On a donc un système à entraînement direct de la chaîne. Cet arrangement permet l'auto-alignement continu de la chaîne à toutes les vitesses. Ce système nous permet d'adapter des pignons d'entraînement de diamètres externes différents pour varier la vitesse linéaire de la chaîne sans changer la vitesse de rotation du volant.

L'arbre qui supporte le pignon d'entraînement est fabriqué en deux sections de même diamètre, dont une des sections a une partie qui se visse dans l'autre. Cet arrangement permet l'entretien et le changement de la chaîne ainsi que du guide-lame.

Le guide-lame est maintenu par deux supports fixés sur un plateau. Deux roulements à billes permettent la rotation de ce plateau autour de l'arbre d'entraînement. Ainsi, l'axe de l'arbre d'entraînement de la chaîne est le même que l'axe de rotation du guide-lame. Le plateau peut donc basculer librement sur l'échantillon à évaluer.

Le déplacement d'un poids fixé sous ce plateau permet d'ajuster la charge appliquée par le guide-lame sur la bottine. De plus, un mécanisme à gâchette permet de maintenir le plateau légèrement incliné (6° par rapport à l'horizontale) pour assurer une chute de 32 mm entre la chaîne et la botte à l'endroit évalué. La gâchette est actionnée par un solénoïde.

Le type de chaîne utilisé pendant les essais, le modèle 73 LP de marque Oregon, est un des modèles couramment utilisés par les bûcherons professionnels et classé par le fabricant comme une chaîne à rendement élevé. Cette chaîne est installée sur un guide-lame Oregon de 406 mm.

La lubrification de la chaîne lors des essais est assurée par une pompe à déplacement positif qui fournit un débit constant de 6,3 ml/min. Il s'agit du débit recommandé par le fabricant de scies à chaîne pour des travaux exigeants.

La tension dans la chaîne est ajustée par un mécanisme à vis qui permet d'éloigner ou de rapprocher le guide-lame par rapport à l'arbre d'entraînement, et donc de régler la tension dans la chaîne. Un capteur de force installé sur ce mécanisme d'ajustement permet de mesurer indirectement la tension dans la chaîne avant les essais. Une fois la tension ajustée, le guide-lame est bloqué en position.

4.2 Le système de contrôle

Le système de contrôle permet de régler la vitesse du moteur pour l'essai, de contrôler le mécanisme d'embrayage et de déclencher la gâchette de retenue du plateau de support du guide-lame. Il contrôle aussi l'alimentation de l'huile pour la chaîne. Il permet aussi de vérifier l'intégrité du circuit électrique de mesure de la traversée de l'échantillon par la chaîne. Il filtre les signaux de durée de l'essai et de la vitesse de rotation du système d'entraînement.

De plus, le système de contrôle peut être complètement pris en charge par l'ordinateur. De cette façon, les caractéristiques des périodes de réchauffement du banc d'essai peuvent être programmées : la période totale de réchauffement, les différentes vitesses de fonctionnement et leurs temps d'application respectifs, l'accélération pour passer d'une vitesse à l'autre et les périodes de huilage de la chaîne. Le même

processus de réchauffement peut donc être répété.

Un mécanisme d'interverrouillage de la garde mobile située au-dessus du guide-lame assure la sécurité. Ce mécanisme empêche le démarrage du système d'entraînement si la garde n'est pas en position au-dessus du guide-lame.

4.3 Le système d'acquisition et de traitement des données

Il est composé d'une unité de conditionnement des signaux (Vishay Measurement 2 000), d'un ordinateur compatible IBM et d'une carte d'acquisition TEAM490 qui permet l'acquisition simultanée de tous les signaux. La fréquence d'échantillonnage est de 5kHz (5 000 enregistrements/seconde pour chaque variable) pour les essais réalisés sur les différents matériaux. Pour les essais à vide, la fréquence d'échantillonnage est fixée à 1 kHz. Les données suivantes sont enregistrées en continu pendant l'essai :

- la vitesse de rotation du système d'entraînement;
- le couple agissant sur l'arbre entre le volant et la chaîne;
- la durée de l'essai.

Le mesureur de couple et de la vitesse (Lebow 1104-200) est un capteur de couple à bague tournante, opérant dans la plage de mesure de couple de 0 à 20 N·m (0 à 200 lbs·po) pour des vitesses de 0 à 9000 tours/min avec une sensibilité de $\pm 0,1\%$ ($\pm 0,02$ N·m). Un capteur de rotation est inclus dans l'appareil et possède une résolution de 6°.

La figure 4.2 présente un exemple des données enregistrées pendant les essais.

L'analyse des résultats est complétée à l'aide du logiciel de traitement des signaux, FAMOS, suivant une séquence programmée qui permet de déterminer :

- le temps de traversée;
- la vitesse au moment du contact de la scie et de l'échantillon;
- la vitesse finale de la chaîne au moment de la traversée de l'échantillon;
- la puissance instantanée;
- l'énergie cumulée pendant la durée de la coupure;
- la valeur maximum du couple pendant la coupure.

4.4 Le support d'échantillon

Sa fonction est de maintenir en place l'échantillon à évaluer lors de l'essai. Sa flexibilité permet de positionner l'échantillon de façon à pouvoir l'évaluer à différents endroits. Nous avons évalué des éprouvettes de bois de forme demi-cylindrique, des échantillons en caoutchouc ainsi que des bottines. Deux plateaux ont été conçus pour maintenir solidement chaque type d'éprouvette : les demi-cylindres de bois et les bottes.

Pour les bottines de protection, le système permet l'ajustement en hauteur de l'échantillon, le déplacement longitudinal (axe parallèle à celui reliant le talon aux orteils) ainsi que l'angle entre la semelle et l'horizontale. Des bottes de pointure 8 à 13 et de pied gauche ou droit peuvent être évaluées. Dans la présente série d'essais, deux endroits sont retenus; sur le pied de la botte à 10 mm de l'embout de protection et sur la tige de la botte à 150 mm de la semelle du talon. La botte est maintenue en place par une fixation de ski.

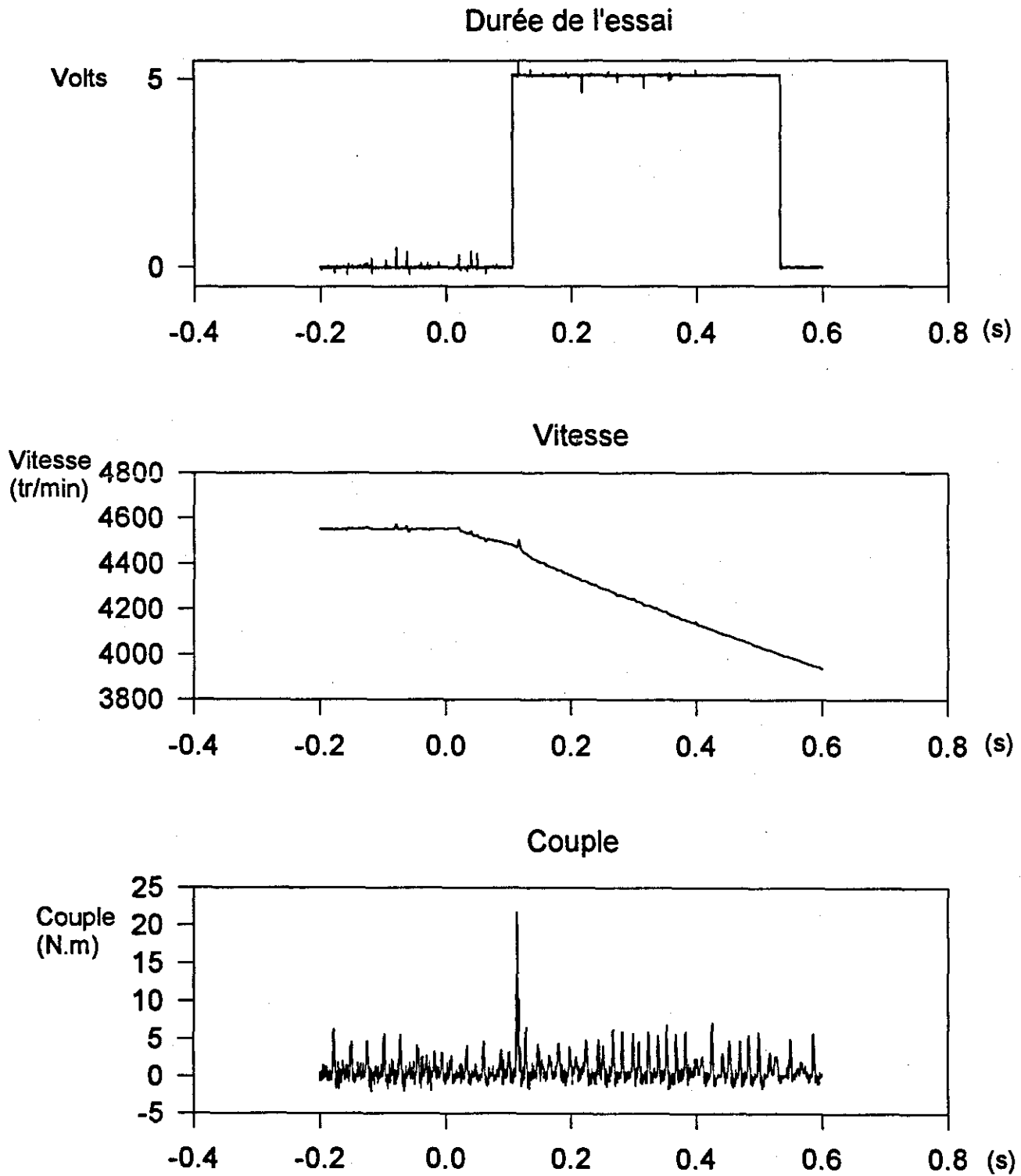


Figure 4.2 Exemple de données enregistrées

4.5 Paramètres d'essai

Pour chaque essai les paramètres suivants sont contrôlés :

- la vitesse de rotation du moteur (0-8 000 tours/minute);
- la hauteur de chute du guide-lame (32 mm);
- la tension initiale dans la chaîne (170 ± 15 N);
- l'alimentation de l'huile pour la chaîne (6,3 ml/min);
- la charge statique appliquée par la chaîne sur l'échantillon ($15,0 \pm 0,5$ N);
- l'angle de contact entre le guide-lame et la bottine (90°);
- le temps de fonctionnement à vide avant chaque essai (voir l'annexe 3);
- le type de chaîne utilisé (Oregon 73 LP).

La conception du banc d'essai permet de changer de volant en gardant la même précision de montage. Il est aussi possible d'utiliser différents modèles de chaîne et de changer de type de pignon d'entraînement sans modification du banc d'essai.

Les différentes étapes nécessaires à la réalisation d'un essai sont présentées à l'annexe 2.

4.6 Fonctionnement à vide

Pour s'assurer que le banc d'essai présente les mêmes caractéristiques de fonctionnement d'une fois à l'autre, on a étudié le comportement du banc d'essai à vide, sans contact de la scie à chaîne avec des matériaux. La détermination du temps d'arrêt à vide a permis de bien contrôler le banc d'essai sur une période de mise au point de plusieurs mois.

Ces essais à vide consistent à amener le volant à une vitesse de rotation déterminée, à désengager le moteur et à laisser la chaîne tourner librement. La vitesse de rotation diminue graduellement et le temps que prend le système pour s'arrêter complètement est le temps d'arrêt à vide (t_v). La perte de vitesse dans un essai à vide est due au frottement dans les roulements, dans les joints d'accouplement, dans l'appareil de mesure du couple, entre la transmission du mouvement de l'arbre à la chaîne, dans le nez du guide-lame (pignon), et entre la chaîne et le guide-lame.

4.6.1 Temps d'arrêt à vide (t_v)

Une première vérification sur les essais effectués à vide, figures 4.3 et 4.4, indique une faible dispersion du temps d'arrêt à vide (t_v) en fonction de la vitesse initiale. Cette dispersion semble principalement due à l'état d'échauffement du banc (graisse dans les roulements) et à la tension dans la chaîne.

Pour mieux apprécier la dispersion des résultats, on utilise le coefficient de variation (C.V.) qui est défini comme le rapport de l'écart-type sur la moyenne de l'échantillon. Un coefficient de variation maximum de 10 % pour les t_v moyens mesurés aux vitesses considérées est acceptable (voir tableau 4.1). Ce faible coefficient de variation indique que les composantes mécaniques du banc d'essai ont un comportement constant dans le temps et que cela n'influencera peu ou pas les résultats.

La figure 4.4 montre comment évaluer rapidement la condition d'échauffement du banc d'essai. Il suffit de comparer le temps d'arrêt à vide obtenu à une certaine vitesse, avec les valeurs affichées à cette même vitesse, et de vérifier que le t_v est compris dans l'intervalle de prédiction des t_v , à un niveau de confiance de 95 %, i.e. $\pm 3\sigma$ (3 fois l'écart-type). La mesure des t_v est une méthode rapide pour vérifier si le banc d'essai est opérationnel ou s'il a besoin d'entretien.

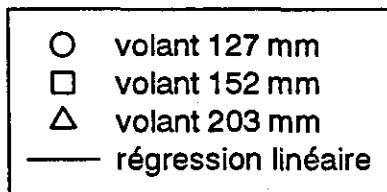
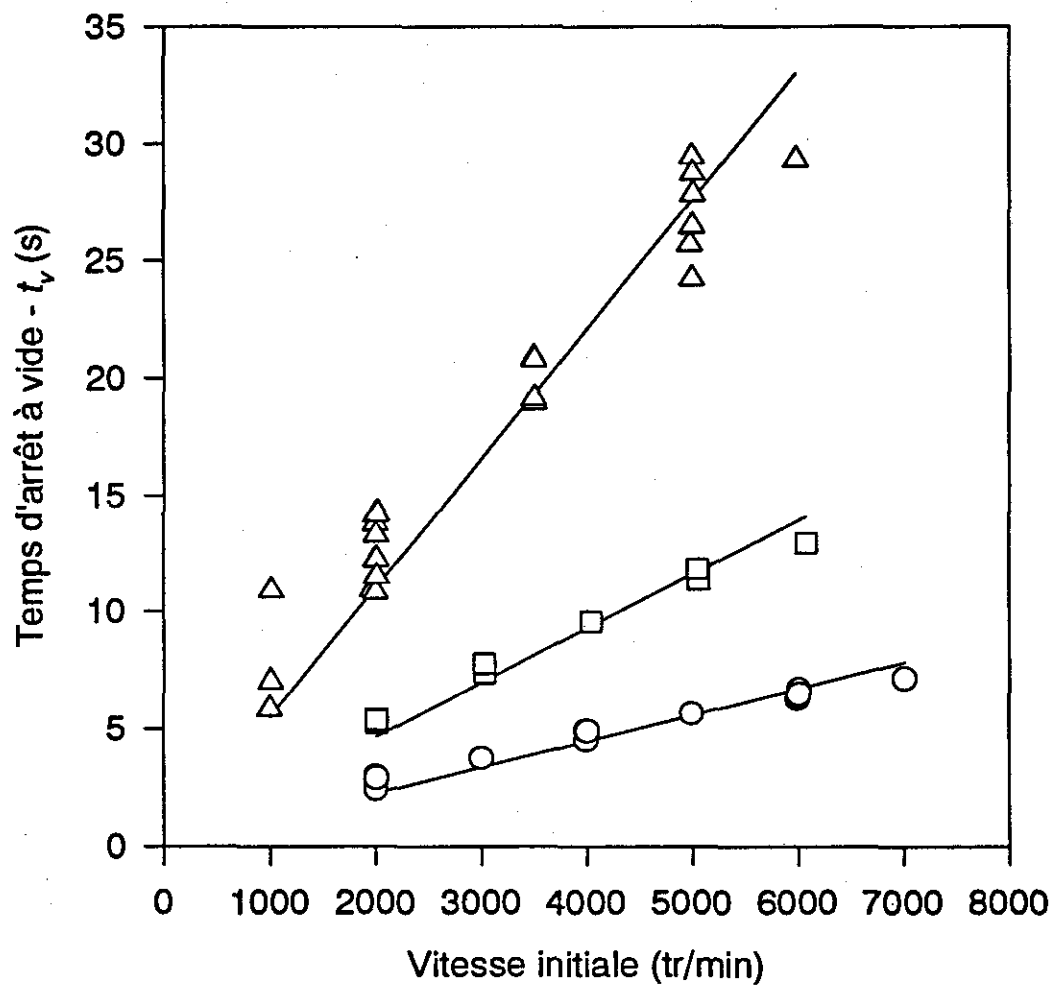
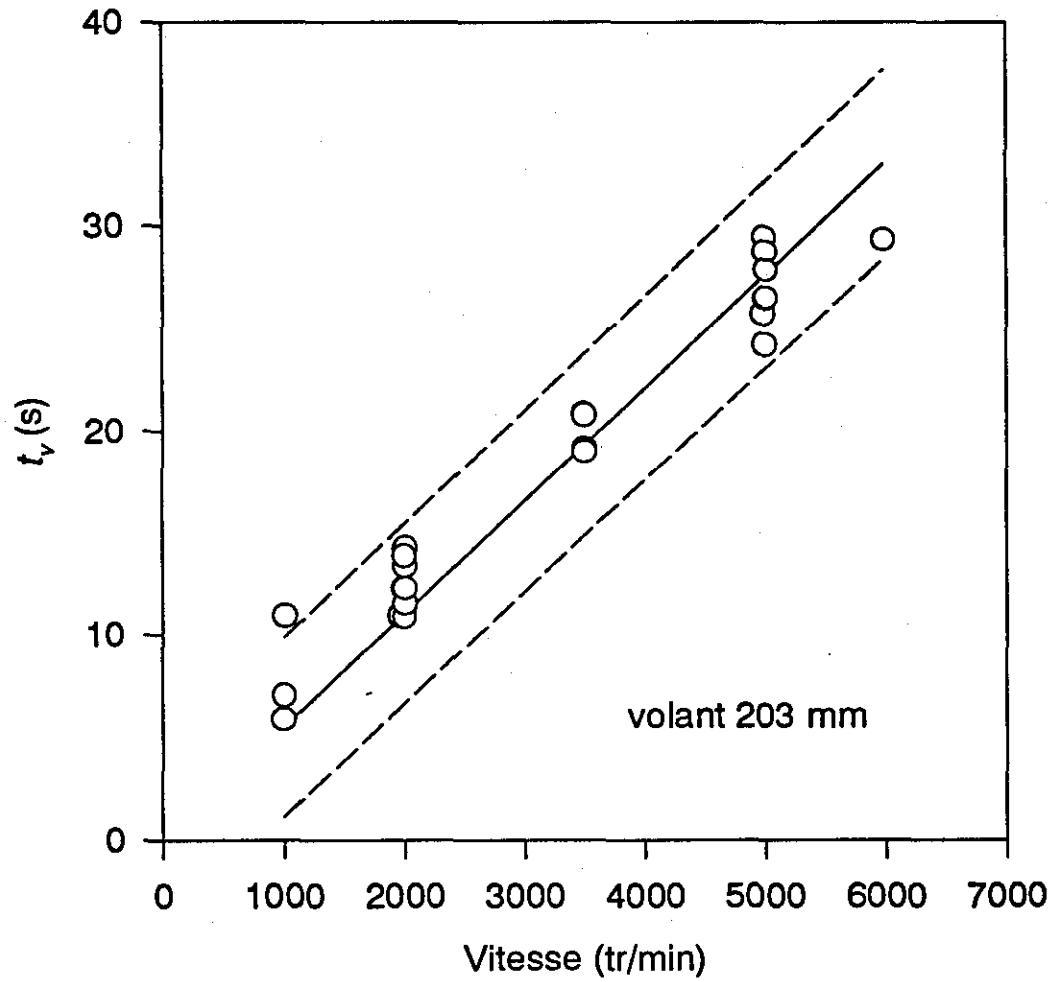


Figure 4.3 Temps d'arrêt à vide et vitesse d'essai



----- intervalle de prédiction pour les TAV
niveau de confiance de 95%

Figure 4.4 Dispersion des t_v

Un bon contrôle des t_v permet de réduire par la suite les coefficients de variation des variables évaluées pour les essais effectués sur les différentes éprouvettes.

Tableau 4.1 Coefficient de variation des temps d'arrêt à vide (t_v)

Volant	Vitesse (tr/min)	t_v (s)	Écart-type (σ)	Coefficient de variation (C.V.) (%)
203 mm	2 000	12,6	1,3	10,7
	3 500	19,9	1,0	5,1
	5 000	27,2	1,9	7,0
152 mm	2 000	5,3	0,1	1,4
	3 000	7,6	0,2	2,5
	5 000	11,6	0,2	1,8
127 mm	2 000	2,8	0,2	9,0
	4 000	4,8	0,2	3,8
	6 000	6,4	0,2	2,5

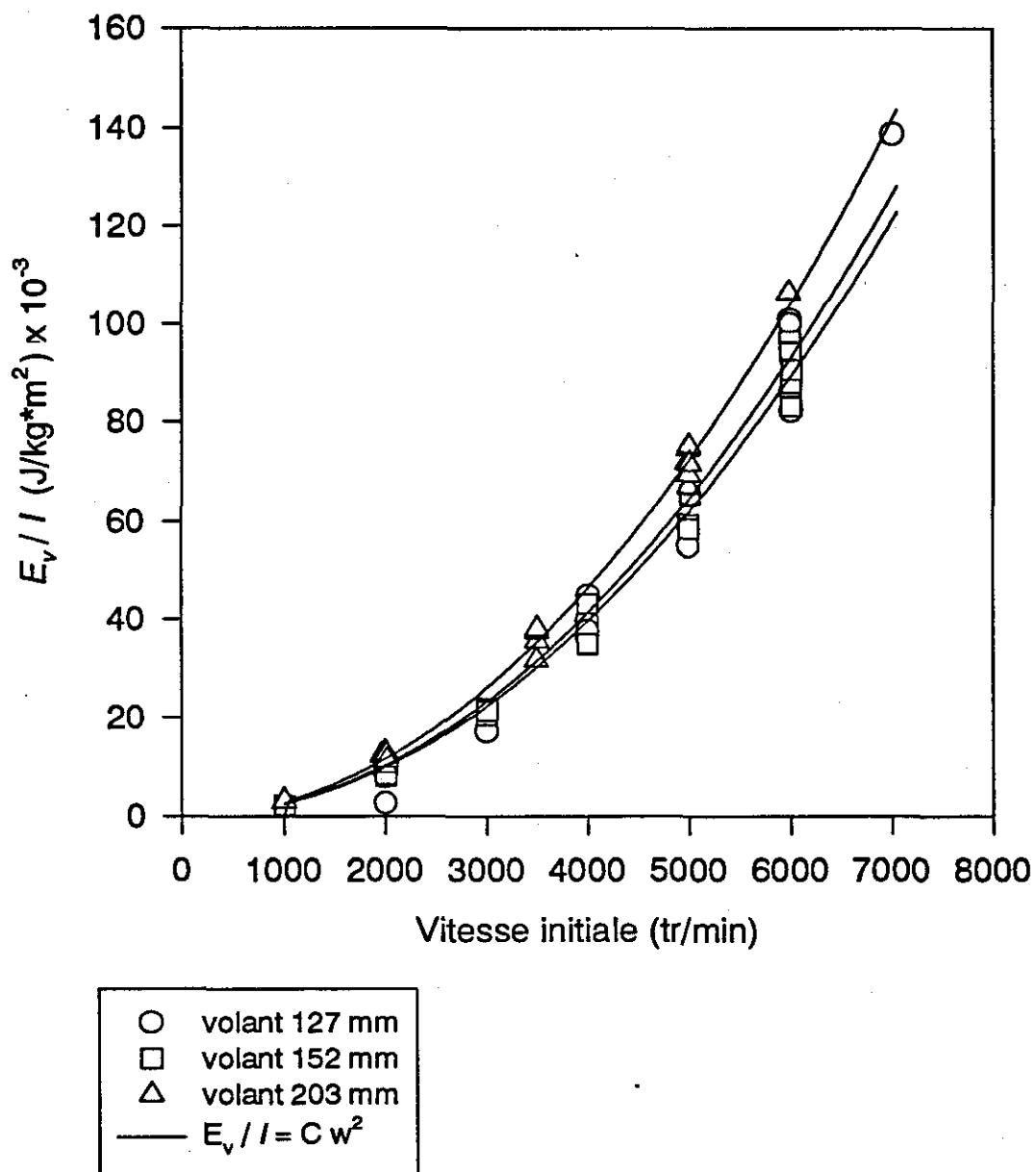
4.6.2 Énergie mesurée dans les essais à vide (E_v)

En évaluant l'énergie lors des essais à vide, soit du moment où on désengage le système d'entraînement jusqu'à l'arrêt, on obtient l'énergie totale disponible dans le système pour des conditions d'essai déterminées (volant et vitesse).

L'énergie à vide (E_v) ainsi mesurée, permet de vérifier le principe de vitesses équivalentes entre différents volants, énoncé à la section 3.1. Ce principe se résume à ceci : deux volants de diamètres différents, d'une même épaisseur et d'un même matériau, possèdent le même niveau d'énergie, si le rapport de leur vitesse de rotation est inversement proportionnel au rapport de leur inertie. La figure 4.5 présente les trois courbes obtenues pour la mesure de l'énergie à vide, pour chacun des volants. Les symboles représentent les valeurs mesurées pour l'énergie à vide pour les trois volants à différentes vitesses et chaque courbe est représentée par une expression de la forme;

$$E_v/I = C\omega^2$$

Où I est l'inertie respective de chaque volant et C une constante. Les courbes tendent à se confondre, indiquant que pour une même vitesse, le rapport de E_v sur l'inertie respective de chaque volant est égale. Cela confirme le principe de vitesse équivalente.

Figure 4.5 E_v/I et vitesse d'essai

Le tableau 4.2 montre les valeurs moyennes de l'énergie à vide (E_v) mesurées pour chaque condition d'essai. On observe que le coefficient de variation maximum pour E_v est de 10% excepté pour le résultat à basse vitesse obtenu avec le volant de 127 mm (C.V. = 43 %); il apparaît que le frottement dans le système est trop important pour le faible niveau d'énergie initiale mis en jeu et il n'est pas recommandé d'utiliser cette condition d'essai.

Tableau 4.2 Coefficient de variation de l'énergie cumulée à vide (E_v)

Volant	Vitesse (tr/min)	E_v (J)	σ	C.V. (%)
203 mm	2 000	391	29	7,3
	3 500	1 190	95	8,0
	5 000	2 380	102	4,3
152 mm	2 000	122	10	8,3
	3 000	265	27	10,1
	5 000	733	81	11,1
127 mm	2 000	35	15	42,6
	4 000	201	18	9,0
	6 000	469	49	10,5

4.6.3 Équation empirique de E_v

Le développement d'un modèle empirique de l'énergie en fonction du temps dans les essais à vide, permet d'évaluer l'énergie dissipée en frottement dans les essais à vide. La figure 4.6 présente une courbe typique de l'énergie en fonction du temps dans un essai à vide. Ces courbes sont définies par 32 000 points résultants du calcul sur les données enregistrées dans chacun des essais. Comme l'énergie cumulative en fonction du temps ne présente pas de sauts brusques, les courbes ont été réduites à 128 points pour simplifier l'analyse des courbes sur un ordinateur personnel. L'équation qui représente les courbes de E_v en fonction du temps est :

$$E_v(t) = A (1 - e^{-bt})$$

où A et b sont fonction de la vitesse de rotation initiale qu'on nomme aussi fréquence circulaire (ω);

$$A = f(\omega^2)$$

$$b = f\left(\frac{1}{\omega}\right)$$

$$\omega = 2\pi \frac{V(\text{tr/min})}{60}$$

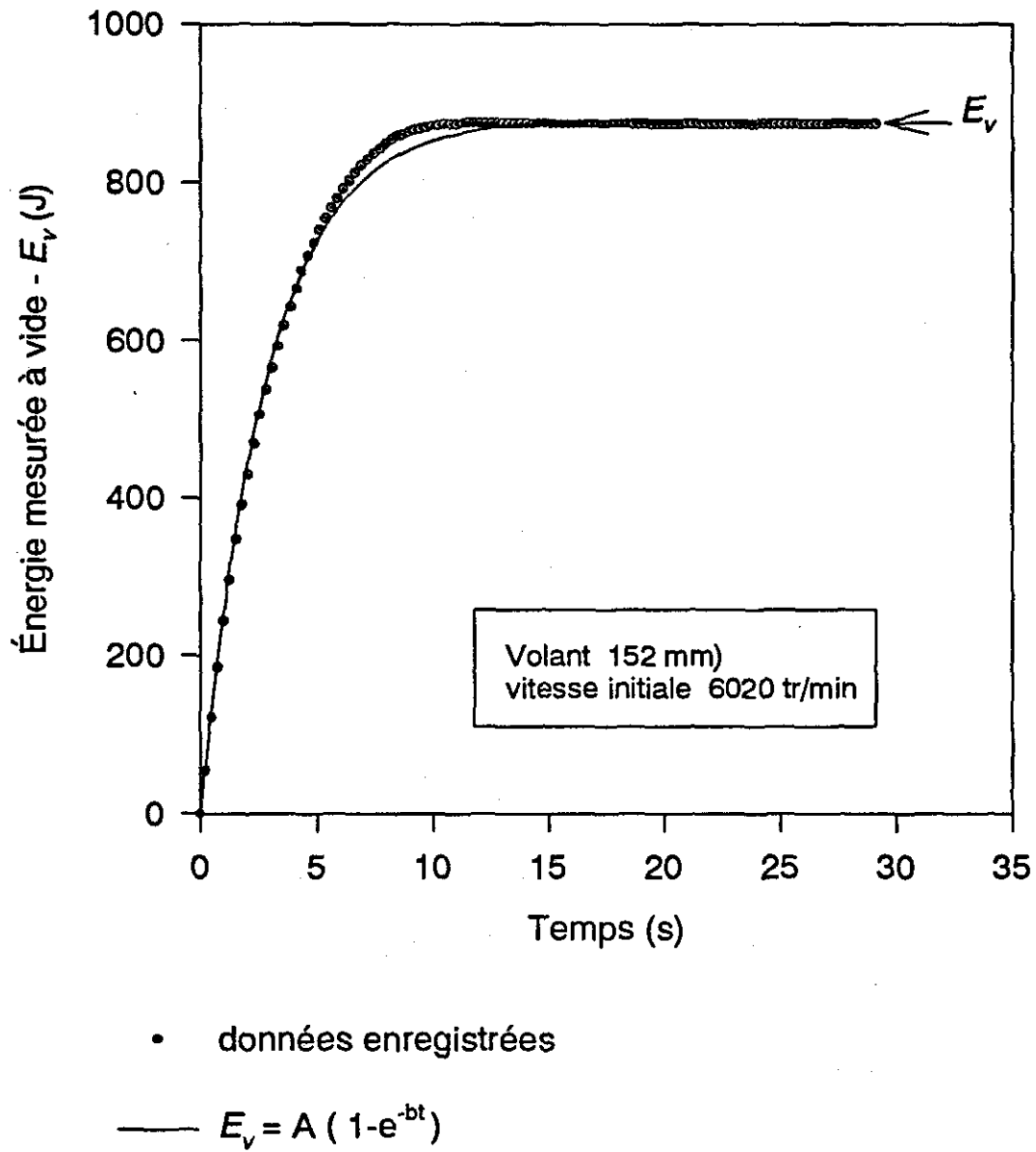


Figure 4.6 Énergie cumulative pour un essai à vide

Les coefficients d'explication obtenus pour l'ajustement des données calculées pour le modèle de E_v sont de l'ordre de $r^2=0,99$.

Pour chaque volant, on a ainsi obtenu un tableau des paramètres A et b en fonction de la vitesse initiale d'essai. Les valeurs moyennes de ces coefficients sont présentées au tableau 4.3. Un exemple de l'équation de l'énergie à vide cumulée en fonction du temps t pour le volant de 152 mm de diamètre, est :

$$E_v(t) = \frac{9 \omega^2}{4000} \left(1 - e^{-\frac{u \cdot t^2}{a}} \right)$$

Ce type d'équation permet de caractériser les pertes d'énergie dans le système, attribuables au frottement, lors d'essais à vide effectués pour évaluer l'énergie initiale. La perte d'énergie due au frottement évalué de cette façon, ne peut être retranchée de l'énergie mesurée pour couper un échantillon. En effet, dans un essai où on mesure l'énergie nécessaire pour couper un échantillon, le frottement n'est plus le même que pendant un essai à vide, car les forces en jeu entre la chaîne et l'éprouvette évaluée ont pour effet d'augmenter le frottement.

Tableau 4.3 Coefficients moyens A et b dans l'équation de E_v

Volant	coefficient A	coefficient b
127 mm	$1,04 \times 10^{-3}$	19,0
152 mm	$2,25 \times 10^{-3}$	14,3
203 mm	$6,70 \times 10^{-3}$	8,3

5. MATÉRIAUX ÉVALUÉS

Bien que la méthode soit développée pour évaluer les bottines de protection, il est important de valider la méthode avec des matériaux plus homogènes et uniformes que les bottes, car les observations des bottines d'un même modèle montrent qu'il existe des variations importantes. On a effectivement observé que les matériaux utilisés dans la fabrication des bottines présentent des variations d'épaisseur suivant leur emplacement, qu'il y a des coutures inégales et aussi des problèmes d'assemblage des matériaux multicouches. De plus, la géométrie de la botte peut varier ainsi que les pointures des bottines évaluées.

Pour limiter l'effet de ces variations dû aux échantillons, on a donc retenu des matériaux plus homogènes. On a utilisé des matériaux couramment disponibles : le bois tel que l'érable et le pin, les caoutchoucs synthétiques comme le SBR (styrène-butadiène) et le néoprène. Le bois est un matériau anisotrope avec une structure fibreuse, il n'est donc pas homogène, mais comme nous le constaterons dans le chapitre suivant, il répond aux critères nécessaires pour être utilisé comme matériau de référence. En effet, l'écart des valeurs sur les variables mesurées, pour des conditions d'essais identiques est acceptable. De plus, il n'affecte pas à court terme le tranchant de la chaîne. Ce qui ne serait pas le cas d'un matériau parfaitement homogène tel que l'aluminium. Le choix d'un matériau de référence nous amène donc à certains compromis. Ce matériau doit avoir le moins d'influence sur le tranchant de la chaîne, doit

permettre d'obtenir des valeurs répétitives dans des conditions identiques d'essai et doit posséder des caractéristiques physiques constantes dans le temps.

Pour les éprouvettes de bois, on a décidé d'utiliser des formes demi-cylindriques de 70 mm de diamètre. Pour les caoutchoucs, on utilisait des bandes d'environ 50 mm de large, provenant de feuilles de 6,4 mm d'épaisseur, qu'on maintenait en place sur les demi-cylindres de bois au moyen de ruban adhésif, les demi-cylindres étant eux-mêmes fixés comme précédemment.

Une fois les matériaux choisis pour la phase de validation, on a fixé les conditions d'essai pour établir le comportement du banc en fonction de différentes variables d'essai. On a utilisé trois volants d'inertie de diamètres différents comme source de transfert d'énergie, et au moins trois vitesses d'essai différentes pour chaque combinaison précédente. Pour chaque condition d'essai ainsi établie, on effectuait une série de plus de sept essais identiques. Le tableau 5.1 résume la séquence d'essais réalisée.

En plus de ces essais, nous avons effectué des séries d'essais pour déterminer si l'énergie nécessaire pour couper le matériau est fonction de la vitesse d'essai. Ces essais sont réalisés à des intervalles de vitesse de 500 tr/min, pour la plage de vitesse allant de 2 000 à 6 000 tr/min, avec les volants de 152 mm et 203 mm.

Tableau 5.1 Grille d'essai

Volant	Matériau		Vitesse d'essai (× 1 000 tr/min)						
			2,5	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
203 mm	Bois	pin	X	X			X		X
		érable					X		
	Caoutchouc	SBR 60 Duro		X		X		X	
		néoprène		X		X		X	
	Bottes	différentes constructions					X		
152 mm	Bois	pin		X			X		X
		érable					X		
127 mm	Bois	pin		X	X		X		X
		érable							X

6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse des résultats va nous permettre de valider la méthode d'essai mise au point. Cela consiste à déterminer le comportement de la méthode d'essai pour le critère de performance retenu, en fonction des différentes conditions d'essai. L'analyse de la distribution statistique des résultats pour des conditions d'essai identiques (matériau, vitesse, volant) permettra d'établir la précision et la fiabilité de la méthode d'essai. Les résultats obtenus avec la méthode d'essai doivent nous permettre de classer les différents échantillons évalués en fonction du critère retenu.

Régulièrement, durant les différentes périodes d'essai, des tests à vide ont été réalisés pour s'assurer que le comportement du banc d'essai était constant et n'influencerait pas les résultats différemment d'une fois à l'autre.

6.1 Essais avec le bois

Une fois que sont déterminés les t_c , qui confirment que le banc d'essai est en bon ordre, des essais réalisés sur des éprouvettes de forme identique nous permettent de valider la mesure de l'énergie nécessaire pour couper au travers du matériau à évaluer. Dans une première phase, des essais réalisés sur un bois mou, le pin, et un bois dur, l'érable, nous permettent de déterminer le comportement du banc d'essai pour ces matériaux dans différentes conditions d'essai.

Nous évaluerons le temps de traversée et l'énergie nécessaire pour couper au travers d'un échantillon, pour constater les avantages et les inconvénients de chaque variable comme critère de performance.

6.1.1 Dépendance du temps de traversée (t_c) et de la vitesse d'essai

La dépendance du temps de traversée est bien établie. La figure 6.1 montre les résultats obtenus pour le t_c en fonction de la vitesse initiale, soit la vitesse juste avant le contact de la scie avec l'éprouvette, pour les essais effectués sur plusieurs éprouvettes en pin avec le volant de 152 mm. On constate que le t_c est inversement proportionnel à la vitesse initiale. La forme générale de la relation entre le temps de traversée et la vitesse initiale est une courbe asymptotique de type :

$$t_c = a/(V - b)$$

La figure 6.2 nous montre une courbe du temps de traversée obtenu pour une seule éprouvette en pin avec le volant de 203 mm pour une plage de vitesses allant de 1 500 à 6 500 tr/min. On obtient pour l'ajustement d'une courbe asymptotique du type précédent aux données enregistrées, un coefficient d'explication $r^2 = 0,98$ qui indique un bon ajustement du modèle choisi aux données. Les essais réalisés avec les différents volants montrent le même type de relation asymptotique entre t_c et V . On remarque qu'en deçà d'une certaine vitesse, la scie ne peut couper l'échantillon de part en part, et que le temps de traversée est alors infini.

La dispersion du temps de traversée est à peu près constante, quel que soit le volant ou la vitesse d'essai (tableau 6.1). On constate que le coefficient de variation (C.V.) maximum du t_c pour des essais effectués sur une même éprouvette en pin est de 16 %. La variation que l'on calcule pour le temps de traversée s'étend de 3,4 % à 16,3 %, selon les plages de vitesses et le volant choisi, pour l'ensemble des éprouvettes en pin évaluées. Ces valeurs de dispersion du temps de traversée sont acceptables, car elles sont peu élevées.

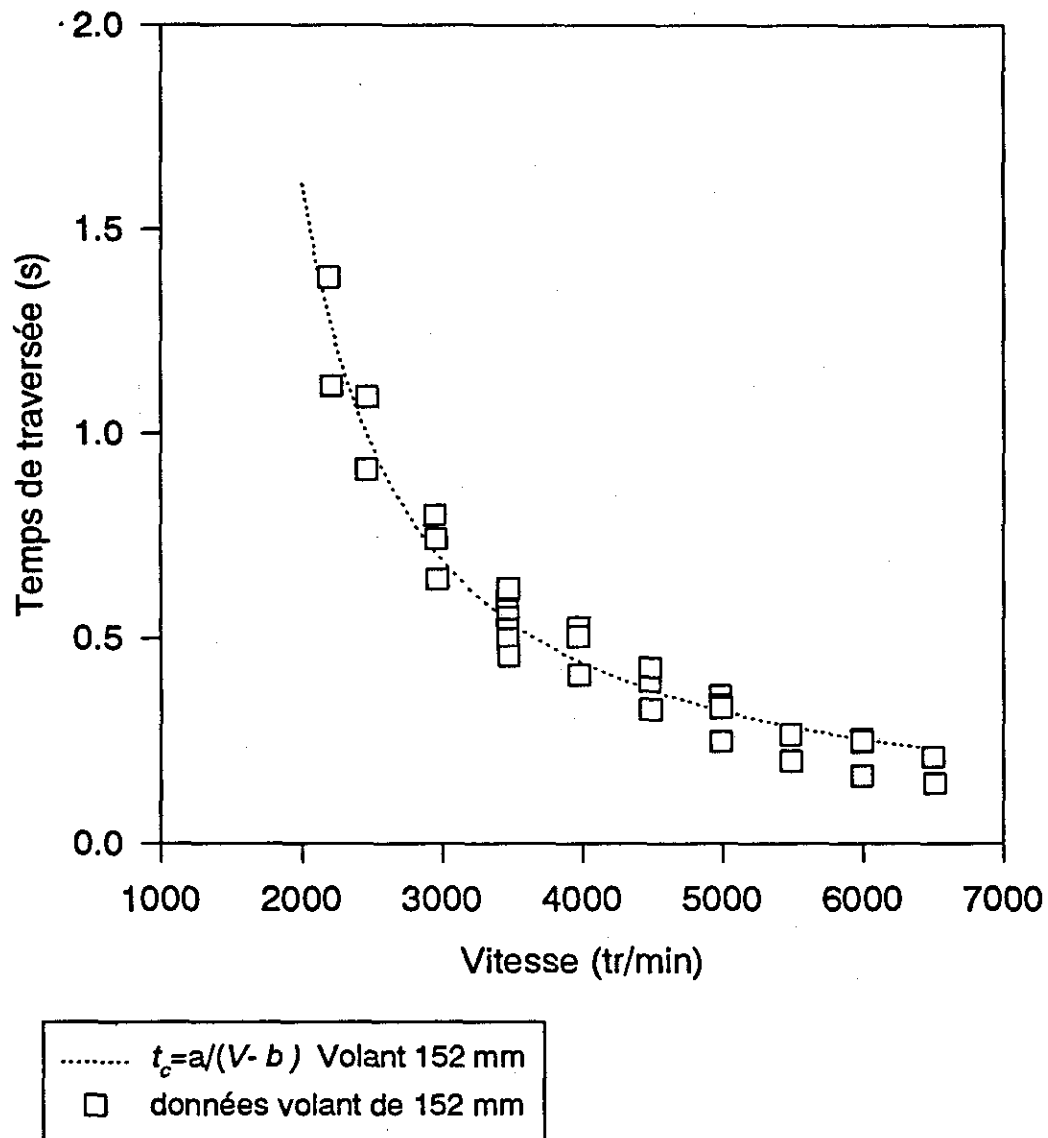
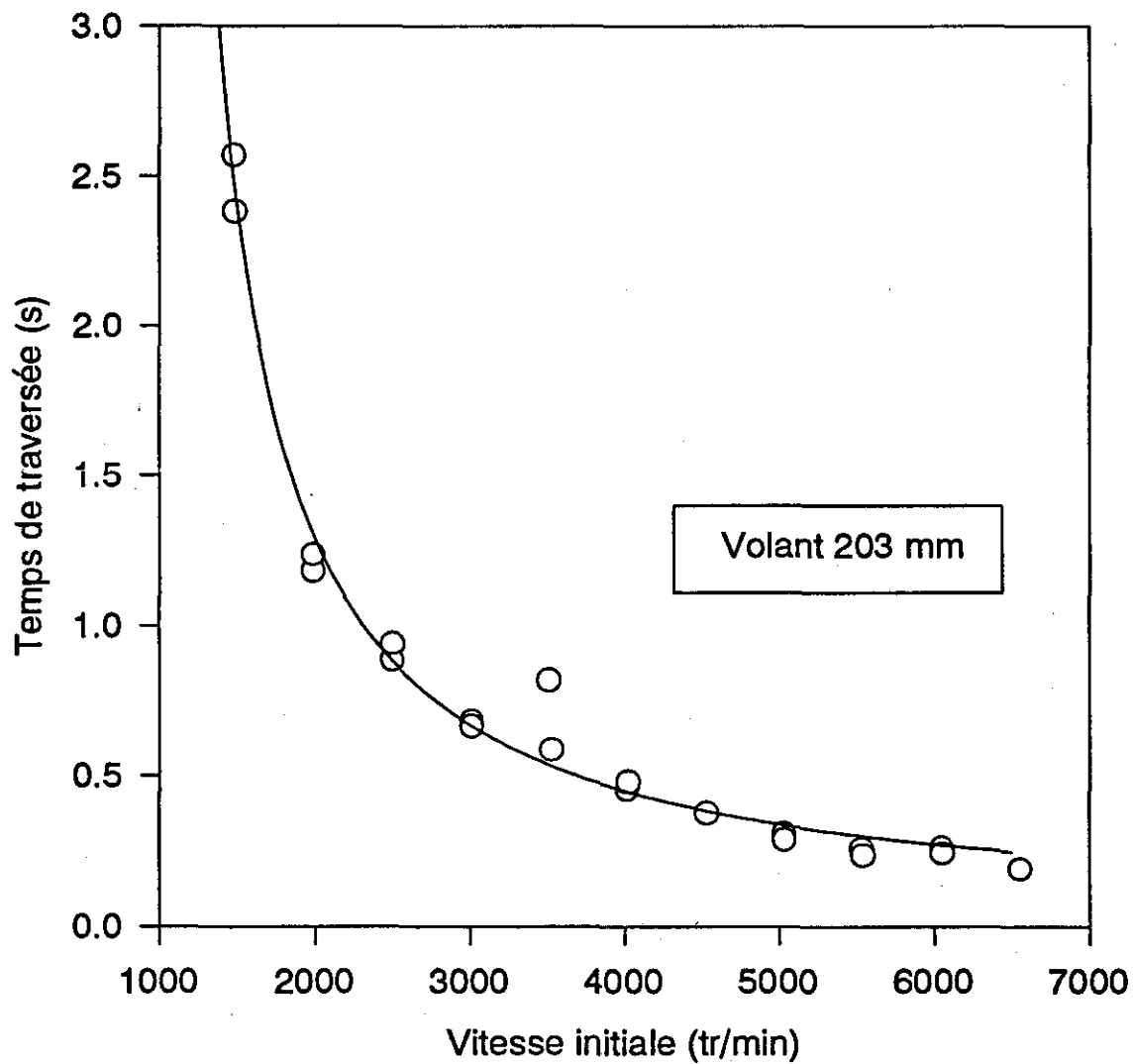


Figure 6.1 Temps de traversée et vitesse d'essai



○ données expérimentales
éprouvette no 14 (pin)

Modèle théorique
 $t_c = A / (V - b)$
($r^2 = 0,98$)

Figure 6.2 Temps de traversée et modèle asymptotique

Tableau 6.1 Dispersion du temps de traversée (t_d) pour le pin

Volant (mm)	Éprouvette	N' (essais)	Vitesse (tr/min)	Temps de traversée (t_d)		
				μ	σ	C.V.(%)
127	11	5	3 250	0,550	0,035	6,4
	10	5	3 740	0,499	0,067	13,5
	11	7	4 800	0,272	0,009	3,4
152	16	4	3 460	0,595	0,032	5,4
	17	4	3 470	0,496	0,029	5,8
	16	3	4 980	0,342	0,014	4,2
203	8	5	2 390	0,787	0,077	9,7
	7	6	3 410	0,402	0,019	4,7
	7	5	4 960	0,233	0,038	16,3

Note 1 : Nombre d'essais effectués sur la même éprouvette.

Remarque : Coefficient de variation de la vitesse est inférieur à 5 %.

6.1.2 Énergie pour couper l'échantillon

Pour chaque essai effectué, deux méthodes de calcul de l'énergie nécessaire pour couper l'échantillon ont été employées. Il s'agit de E_m et $E_{d,s}$. Rappelons que les valeurs de l'énergie représentent la valeur totale calculée pour l'intervalle de temps correspondant au t_c .

L'énergie maximum (E_m) calculée mesure l'énergie requise pour couper au travers de l'échantillon évalué et de l'énergie dispersée dans tout le système d'entraînement de la scie sous forme de frottement.

Les variations de géométrie des échantillons de bois ainsi que la dureté des éprouvettes sont prises en considération dans le calcul de l'énergie corrigée ($E_{d,s}$). Ainsi, il est possible de comparer différentes éprouvettes d'un même type de bois même si leurs dimensions et leur dureté respectives ne sont pas tout à fait identiques.

Le tableau 6.2 présente les valeurs moyennes obtenues pour E_m pour plusieurs séries d'essais à différentes vitesses initiales et avec différents volants. Le coefficient de variation dans chacune de ces conditions d'essai est indiqué dans la dernière colonne du tableau. Le coefficient de variation pour chaque condition d'essai est le même pour E_m , E_s et $E_{d,s}$, car les résultats sont présentés par éprouvette (colonne 2), donc même géométrie et dureté respective, pour les essais réalisés avec la même éprouvette. On constate que la dispersion des valeurs moyennes de E_m est très faible, inférieure à 8 % dans tous les cas, sauf un (13 %).

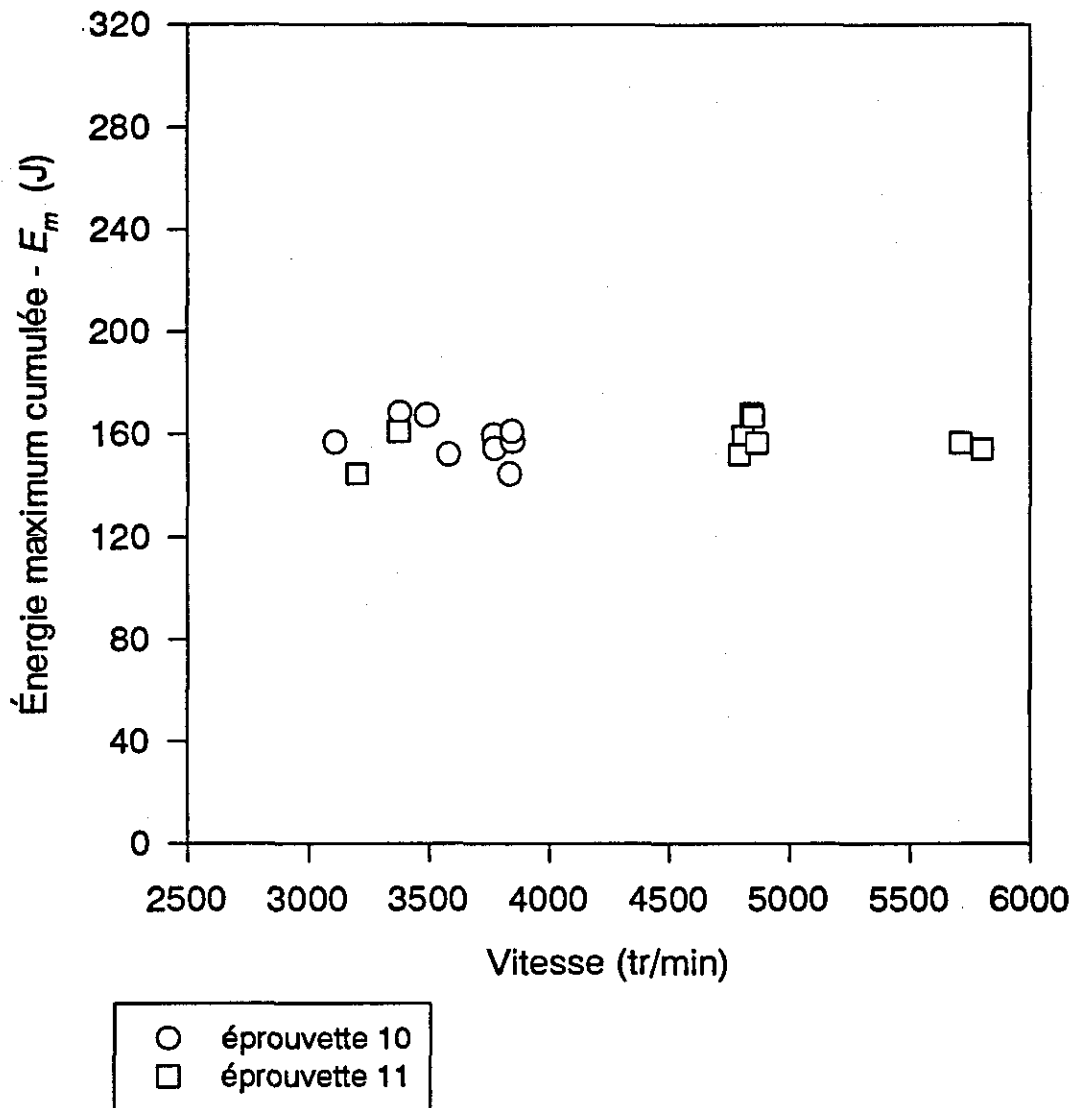
Avant de comparer les valeurs moyennes de E_m obtenues pour les essais réalisés avec le même volant, mais à des vitesses différentes, il faut déterminer l'effet de la vitesse initiale d'essai sur l'énergie. De plus, l'analyse de la dureté moyenne pour chaque éprouvette et pour l'ensemble des éprouvettes, mettra en évidence l'importance d'utiliser un facteur de correction pour E_m . Ces deux points, effet de la vitesse et de la dureté sur E_m , sont abordés dans les deux sections suivantes.

Tableau 6.2 Énergie pour couper les éprouvettes de pin

Volant (mm)	Pièce	N°	Vitesse (rad/s)	E_m (J)	E_s (J/cm ²)	$E_{d,s}$ J/(N·cm ²)	C.V. (%)
				μ	μ	μ	
127	11	5	3 250	141,2	23,5	0,374	4,6
	10	5	3 740	156,5	25,7	0,331	4,6
	11	7	4 800	140,0	23,3	0,371	6,8
152	16	4	3 460	198,1	32,6	0,420	4,1
	17	4	3 470	169,1	28,2	0,442	7,6
	16	3	4 980	202,5	33,3	0,430	2,0
203	8	5	2 390	217,6	35,9	0,527	7,3
	7	6	3 410	176,3	29,0	0,526	4,5
	7	5	4 960	181,8	29,9	0,541	13,0

6.1.3 Dépendance de l'énergie et de la vitesse initiale

Les figures 6.3 à 6.5 montrent le comportement de l'énergie en fonction de la vitesse initiale. Les essais réalisés avec les différents volants sur les éprouvettes en pin montrent qu'il n'y a pas de variation de l'énergie en fonction de la vitesse initiale d'essai. Pour chacun des trois volants utilisés, nous avons analysé une série d'essais réalisée sur une même éprouvette. Une analyse statistique de régression linéaire ainsi qu'un test paramétrique permettant d'évaluer le degré d'association entre les paires de variables sont présentés au tableau 6.3. Dans les deux cas, on suppose que les données proviennent de population normale. Les résultats ont montré que la variation de l'énergie, en fonction de la vitesse, n'était pas significative à un seuil de 5 % ($p > 0,05$).

Figure 6.3 E_m et V pour le pin, volant de 127 mm

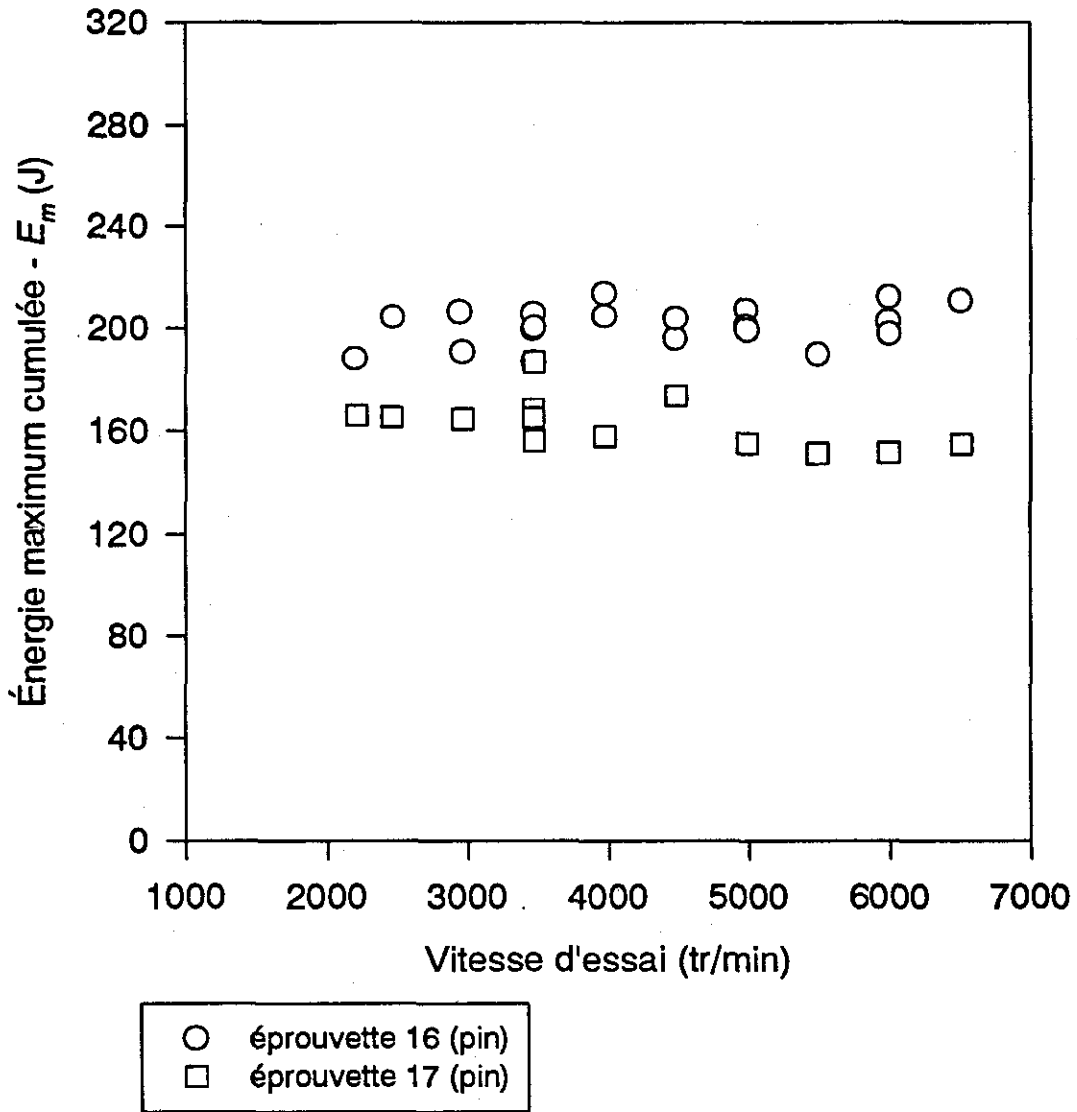


Figure 6.4 E_m et V pour le pin, volant de 152 mm

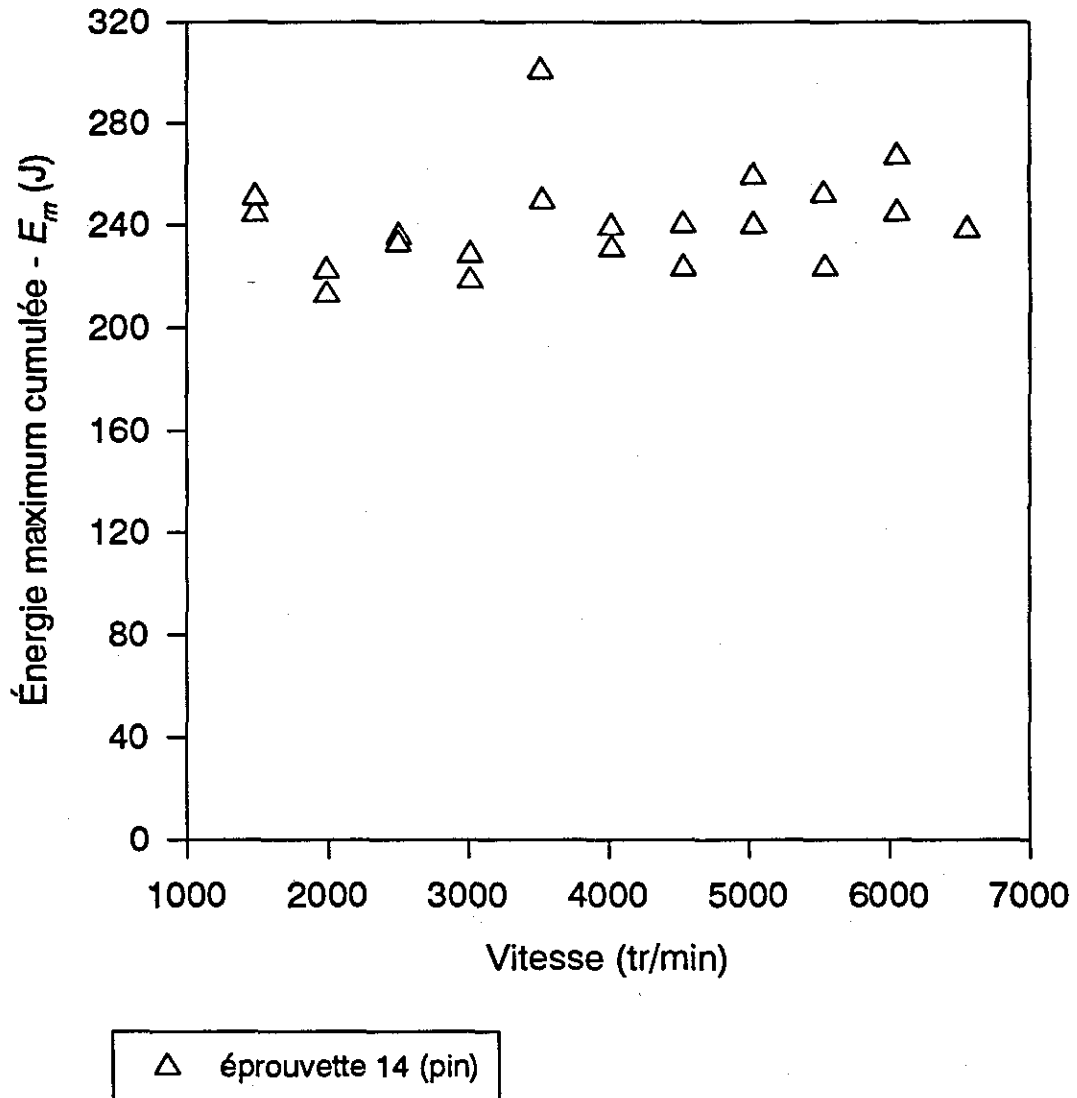
Figure 6.5 E_m et V pour le pin, volant de 203 mm

Tableau 6.3 Dépendance de l'énergie et de la vitesse d'essai

Volant	Pièce	N	Plage de vitesse (tr/min)	Régression linéaire coefficient		p	Association significative (entre E et V)
				r ²	r		
127 mm	11	14	3 140 à 5 800	0,05	-0,23	0,42	non
152 mm	16	20	2 200 à 6 500	0,09	0,32	0,17	non
	17	13	2 200 à 6 500	0,29	-0,54	0,06	non
203 mm	14	21	1 500 à 6 500	0,07	0,27	0,40	non
	7	14	2 370 à 4 990	0,04	0,19	0,52	non

L'avantage d'utiliser l'énergie comme critère de performance est renforcé puisque l'énergie ne dépend pas de la vitesse initiale.

6.1.4 Énergie de coupure et dureté des éprouvettes

Comme on l'a mentionné au chapitre 3, on a caractérisé chacune des éprouvettes de bois par une caractéristique physique, la dureté. Celle-ci est déterminée en mesurant la charge obtenue en enfonçant un poinçon à une profondeur de 3 mm (F_{3mm}) dans l'éprouvette évaluée. Les essais de pénétration complétés sur l'ensemble des éprouvettes de bois nous ont permis d'établir, pour la dureté, les paramètres de distribution statistique suivants :

Moyenne échantillonnale pour F_{3mm}	69,0 N
C.V. maximum pour F_{3mm} pour le lot d'éprouvettes de pin	18 %

Le tableau 6.4 présente les valeurs moyennes de F_{3mm} , de E_m et de $E_{d,s}$ pour chaque volant et chaque éprouvette utilisée. Les résultats sont présentés indépendamment de la vitesse d'essai, car comme nous l'avons montré dans la section précédente, l'énergie pour couper les éprouvettes de bois ne dépend pas de la vitesse d'essai.

Dans le tableau 6.4, on constate que les coefficients de variation obtenus pour chaque valeur de E_m ne sont pas liés à ceux de F_{3mm} . En général, les coefficients de variation de l'énergie sont plus faibles que ceux obtenus pour la dureté, pour les mêmes éprouvettes respectives.

Les valeurs moyennes de l'énergie corrigée pour la dureté et la géométrie des éprouvettes, dernière colonne du tableau 6.4, obtenues pendant les essais pour couper les éprouvettes de pin avec les volants de 127 mm, 152 mm et 203 mm de diamètre sont respectivement : 0,356 J/(N·cm²), 0,427 J/(N·cm²) et 0,474 J/(N·cm²). Ces moyennes interéprouvettes sont calculées en donnant comme poids relatif à chaque valeur de $E_{d,s}$, le nombre d'essais respectifs.

Tableau 6.4 Dureté et énergie

Volant (mm)	Pièce no.	N	F_{3mm}		E_m		$E_{d,s}$
			μ (N)	C.V. %	μ (J)	C.V. %	μ J/(N·cm ²)
127	10	9	77,3	8,0	157,7	4,7	0,335
	11	14	62,8	10,7	139,4	5,7	0,370
152	16	20	77,5	12,9	201,0	3,8	0,427
	17	13	63,8	13,5	162,9	6,1	0,426
203	2	10	74,5	12,8	200,4	6,1	0,436
	3	8	73,3	7,4	162,9	5,4	0,374
	4	13	64,4	13,7	153,4	12,2	0,386
	6	9	65,0	15,2	214,3	5,6	0,552
	7	16	55,0	11,8	181,0	9,0	0,541
	8	8	67,8	8,3	214,2	8,2	0,521
	11	5	62,8	10,7	188,7	12,9	0,500
	12	5	55,9	8,4	153,5	6,8	0,456
	14	21	82,0	8,9	240,6	8,1	0,482

Les essais réalisés sur un autre type de bois, un bois plus dur, l'érable, montrent que l'énergie corrigée pour la dureté et la géométrie présente une faible dispersion de l'ordre de 4 % (tableau 6.5) pour des séries d'essais identiques. Les résultats dans ce tableau ont été obtenus avec le volant de 203 mm et à une vitesse initiale de 4960 tr/min. Dans ce tableau, on peut voir qu'une série de six essais identiques réalisée sur une même éprouvette en érable, à la même vitesse, a un C.V. de 15 % pour le t_c et seulement de 4 % pour $E_{d,s}$. En effet, nous avons observé que la scie à chaîne peut rebondir occasionnellement lors des essais sur les éprouvettes en érable, si la vitesse n'est pas assez élevée. Ces rebonds introduisent des variations sur le temps de traversée mesuré, alors que la mesure d'énergie y est beaucoup moins sensible lorsque la chaîne n'est plus en contact avec l'éprouvette.

La dureté des éprouvettes en érable a été évaluée en mesurant la force de pénétration moyenne, mesurée à 3 mm. Cette force est de 315,0 N, environ 4,6 fois plus que celle obtenue avec les éprouvettes de pin. Le rapport de l'énergie nécessaire, corrigée pour la dureté et la géométrie, pour couper les éprouvettes en érable est au moins trois fois plus élevé que l'énergie requise pour couper les éprouvettes de pin (tableau 6.6).

Tableau 6.5 Temps de traversée et $E_{d,s}$ pour l'érable

Éprouvette	N	Temps de traversée (s)			$E_{d,s}$ J/(N·cm ²)		
		μ	σ	C.V.	μ	σ	C.V.
5	3	0,956	0,030	3,1	0,275	3,3	3,9
5	5	0,969	0,024	2,5	0,344	2,6	2,4
13	6	1,257	0,194	15,4	0,340	4,4	4,1

Note : Volant de 203 mm.
Vitesse initiale moyenne de 4 960 tr/min.

Tableau 6.6 Comparaison du t_c et de E_m pour l'érable et le pin

Volant (mm)	Vitesse (rad/s)	Érable		Pin		$\frac{[t_c]_{érable}}{[t_c]_{pin}}$	$\frac{[E_m]_{érable}}{[E_m]_{pin}}$
		t_c	E_m	t_c	E_m		
127	5 760	1,247	93	0,185	24,3	6,7	3,8
152	4 960	1,235	100	0,342	29,8	3,6	3,4
203	4 960	0,950	103	0,233	37,5	4,1	2,7

Les essais réalisés sur les éprouvettes en pin et en érable confirment que l'énergie corrigée pour la dureté et la géométrie est proportionnelle à la dureté du bois. Un bois dur qui est plus difficile à pénétrer avec un poinçon nécessite plus d'énergie pour être coupé par une scie à chaîne. Il est alors important d'utiliser un facteur de correction pour tenir compte des variations de dureté du bois qui pourraient être plus accentuées entre les différents lots d'éprouvettes.

De façon générale, on observe une dispersion plus faible pour l'énergie corrigée ($E_{d,s}$) que pour le temps de traversée (t_c), pour une même série d'essais. Cette différence de 2 à 10 % montre un avantage à utiliser la mesure d'énergie comme paramètre pour évaluer la performance des matériaux contre une scie à chaîne.

6.2 Essais avec les caoutchoucs

Deux types de caoutchouc synthétique, le caoutchouc styrène-butadiène (SBR) avec une dureté de 60 DURO ainsi que le néoprène de dureté 70 DURO. Tous les essais sur les caoutchoucs ont été réalisés avec le volant de 203 mm.

Les résultats du tableau 6.7 montrent une très grande dispersion pour les paramètres t_c et E_m . En effet, les coefficients de variation de ces deux paramètres atteignent des valeurs maximums de 60 % pour le caoutchouc SBR et de 25 % pour le néoprène. Malgré ces niveaux élevés de dispersion, on constate que le temps de traversée moyen diminue avec l'augmentation de la vitesse.

L'évaluation de l'énergie par unité de surface de la section droite coupée (E_s) permet de comparer la quantité d'énergie absorbée, par unité de surface, entre les différents matériaux (tableau 6.7). On constate que les caoutchoucs absorbent 3 à 4 fois plus d'énergie par unité de surface que les éprouvettes de pin. Et environ 1 fois à 1½ fois plus que les éprouvettes d'érable. Le calcul de la surface de la section droite coupée des caoutchoucs est de 1,89 cm².

Avec une dispersion de cette ampleur, il est difficile de déterminer le comportement de l'énergie en fonction de la vitesse d'essai (figure 6.6). On constate tout de même que E_m moyenne pour le néoprène est supérieure à celle du caoutchouc pour des vitesses supérieures ou égales à 4 500 tr/min.

Ces deux matériaux caoutchouteux ne sont donc pas indiqués pour être utilisés comme matériaux d'étalonnage, mais reflètent bien la qualité du banc d'essai à discerner les variations du temps de traversée et de l'énergie liées aux matériaux eux-mêmes. On observe que la dispersion des résultats pour ces matériaux diminue avec l'augmentation de la vitesse d'essai.

Ces deux résultats obtenus pour les caoutchoucs évalués nous indiquent qu'on doit s'attendre à une grande dispersion des résultats pour les bottines de caoutchouc que nous évaluerons. Et pour maintenir la dispersion des résultats au minimum, il y a avantage à évaluer les bottines à une vitesse de 5 000 tr/min et plus avec le volant de 203 mm.

Tableau 6.7 Dispersion du t_c et de E_m pour les caoutchoucs

Matériau	N	Vitesse (rad/s)	t_c (s)		E_m (J)		E_s (J/cm ²)
			μ	C.V.(%)	μ	C.V.(%)	μ
Néoprène	7	3 450	0,492	27,4	269,1	26,8	142,3
	6	4 465	0,422	23,5	321,5	22,7	170,1
	4	5 450	0,328	11,4	292,7	16,0	154,9
Caoutchouc	8	3 450	0,474	59,1	252,3	55,2	133,5
	5	4 430	0,212	43,2	168,5	31,9	89,2
	6	5 470	0,177	26,6	184,0	24,0	97,4

Note : volant 203 mm.

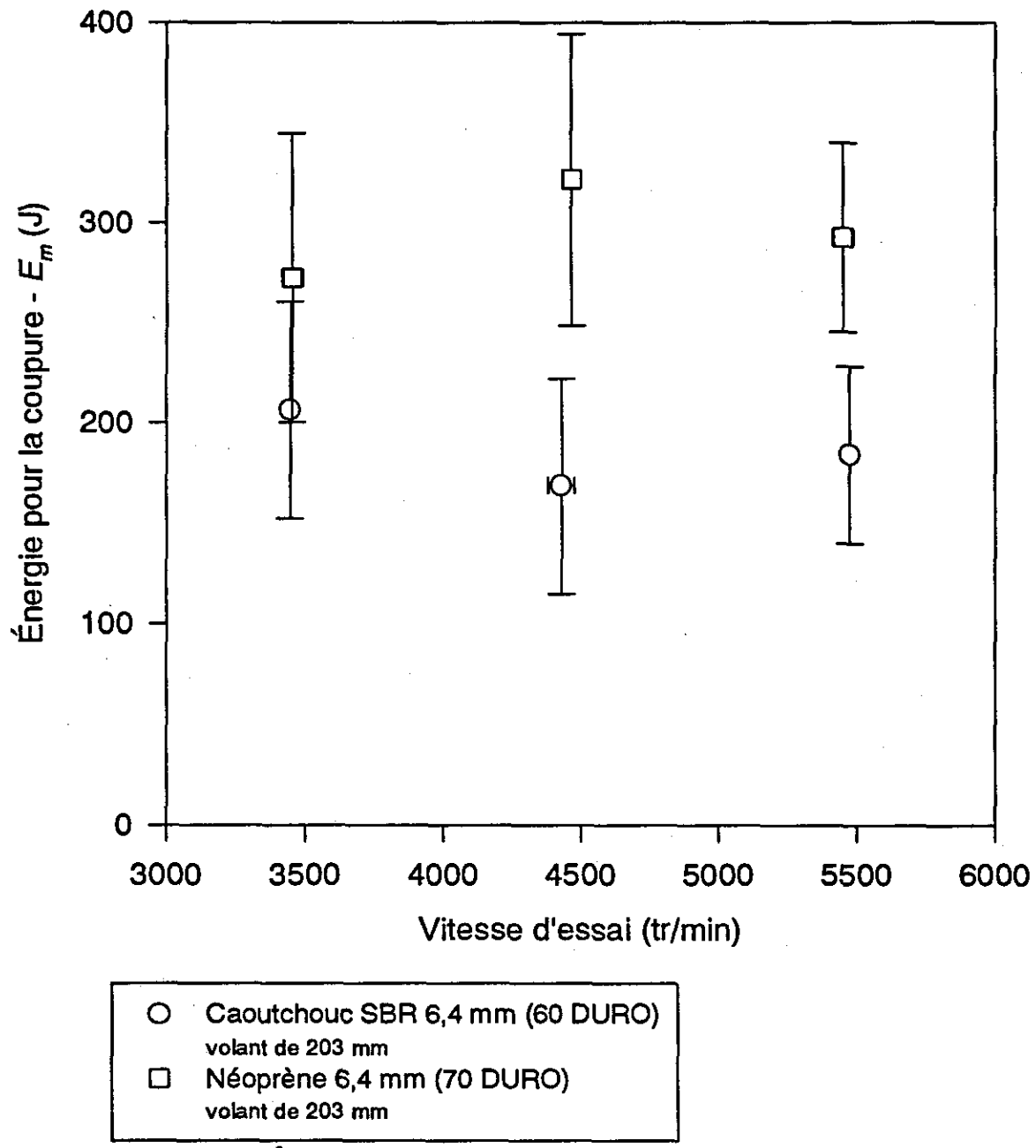


Figure 6.6 E_m et V pour les caoutchoucs

6.3 Essais avec les bottines de protection

La première phase d'évaluation des bottines porte sur un nombre restreint d'échantillons évalués avec le volant de 203 mm. On a évalué des bottes de cuir sans protection contre les scies à chaîne, des bottes de cuir avec deux couches de nylon protecteur et des bottes tout en caoutchouc conçues pour la protection contre les scies à chaîne. La figure 6.7 résume les quelques résultats obtenus pour ces types de bottes. On constate que les bottes A et B (bottes de cuir sans protection contre les scies) nécessitent que la chaîne et le système d'entraînement possèdent une énergie de 100 à 150 Joules, pour que la chaîne coupe au travers des bottes près de l'embout de protection. Ce niveau d'énergie correspond environ à celui mesuré avec des éprouvettes en pin pour des essais effectués avant et après les essais sur les bottes à une même vitesse d'essai.

Dans les essais effectués près de l'embout de protection, la mesure du niveau d'énergie pour couper la botte C qui inclut un textile protecteur fait de deux couches de nylon, est presque identique au niveau d'énergie requis pour couper une éprouvette en érable. L'énergie pour couper la botte C est cinq fois plus élevée que celle requise pour couper la botte A.

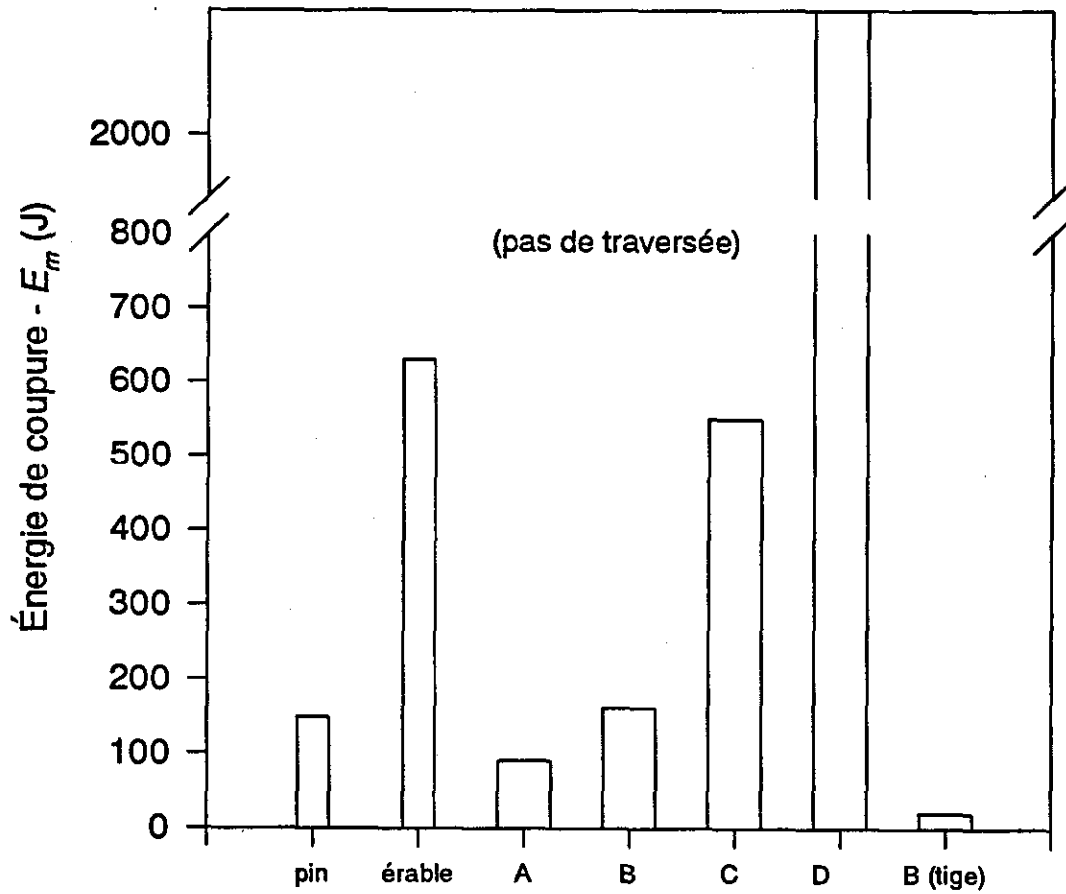
Quant aux bottes de type D (tout en caoutchouc), elles n'ont pas été traversées par la chaîne malgré le niveau d'énergie initialement disponible de 2 300 J (volant de 203 mm et vitesse initiale de 5 000 tr/min).

Les valeurs obtenues avec cette méthode d'essai correspondent avec le classement obtenu avec la méthode d'essai utilisant une scie à chaîne électrique comme nous le montre le tableau 6.8. On constate que les mesures de l'énergie pour couper les bottes ne sont pas identiques d'une méthode à l'autre. La méthode utilisant un moteur électrique présente des valeurs plus basses pour les bottes sans protection et avec une protection moyenne. La différence pourrait être due au mode opératoire; le moteur électrique reste embrayé durant le processus de coupure tandis que le volant n'est plus alimenté par le moteur pendant la coupure. Pour la méthode d'essai avec la scie à chaîne électrique, le calcul de l'énergie est basé sur la puissance électrique consommée par le moteur.

Tableau 6.8 Comparaison des résultats obtenus pour les bottines

BOTTINE	MÉTHODE D'ESSAI : VOLANT D'INERTIE	MÉTHODE D'ESSAI : SCIE À CHAÎNE ÉLECTRIQUE ¹
cuir sans protection	100 J	30 J
cuir + 2 couches de nylon	550 J	200 J
embout caoutchouc et tige en cuir	280 à 850 J	480 à 1 200 J
tout en caoutchouc	pas de traversée (2 600 J après 6 s)	pas de traversée (1 600 J après 2 s)

¹ Selon la référence [2]



- botte A: bottine de travail en cuir
- botte B: botte de cuir avec coussinet de 3 mm
- botte C: botte de cuir + 2 plis de nylon
- botte D: botte tout en caoutchouc

Figure 6.7 Comparaison de E_m pour différentes bottes

On a évalué la surface de la section droite des bottines coupée par la scie à chaîne. Seule la section près de l'embout protecteur a été considérée. La troisième colonne du tableau 6.9 donne la surface coupée (A_s) pour les trois bottines retenues. Les valeurs de E_s obtenues pour les bottines (essai près de l'embout de protection) mettent en évidence la capacité du ou des matériaux dont les bottines sont fabriquées, à absorber l'énergie de la scie à chaîne.

Tableau 6.9 E_s pour quelques bottines

Description de la bottine	Traversée	A_s (cm ²)	E_m (J)	E_s (J/cm ²)
embout de caoutchouc et tige de cuir	oui	4,6	1600	350
embout de caoutchouc et tige de cuir	non	3,9	2580	655
tout en caoutchouc	non	3,2	2620	815

Note : Les essais sur les bottines ont été réalisés près de l'embout de protection.

On constate que les valeurs calculées de l'énergie par unité de surface pour couper les bottines, sont plus grandes que celles mesurées pour les caoutchoucs et beaucoup plus grandes que celles obtenues avec les éprouvettes de bois.

Une plus grande série d'essais serait nécessaire pour établir un tableau de classement des différentes bottines de protection disponibles sur le marché.

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La méthode d'essai mise au point, basée sur l'énergie absorbée durant la coupure, permet d'évaluer la performance des matériaux contre une scie à chaîne. Les résultats obtenus sont répétitifs et permettent de classer les différents matériaux selon l'énergie requise pour les couper.

Nous avons montré qu'il était possible de contrôler l'état du banc d'essai en évaluant régulièrement les temps d'arrêt à vide (t_0).

L'analyse des résultats a permis de démontrer que l'énergie requise pour couper les éprouvettes en bois ne dépend pas de la vitesse d'essai. La dispersion des résultats de la mesure de l'énergie est égale ou moindre que celle obtenue pour le temps de traversée. Ces résultats montrent l'avantage à utiliser l'énergie comme critère de performance.

L'utilisation d'un facteur de correction pour tenir compte de la dureté des éprouvettes provenant de différents lots, permet de comparer les différentes éprouvettes entre elles. Cela s'avère important si on utilise le bois comme matériau de référence.

Des essais ont montré que l'énergie requise pour couper au travers des bottines était respectivement de 100 J, 500 J et 3 000 J, pour des bottes sans protection, avec une protection moyenne et avec la meilleure protection. Il est donc possible d'obtenir un classement des bottines de protection en utilisant la méthode d'essai mise au point.

Une série d'essais sur tous les types de bottines de protection serait nécessaire pour établir une classification de la performance des bottines contre une scie à chaîne. De plus, des essais effectués sur les jambières de protection pourraient confirmer l'universalité de la méthode d'essai avec volant d'inertie comme méthode pour évaluer les équipements de protection contre les scies à chaîne.

La méthode d'essai mise au point pourrait servir à l'élaboration d'une norme d'essai pour évaluer les bottines de protection utilisées par les travailleurs forestiers.

Liste des références

1. American Pulpwood Association, *Foot Protection for Chain Saw Users*, Voluntary standard, Washington D.C., mars 1993, révision.
2. Arteau, J. et Turcot, D., *Energy as Performance Criterion for Chain Saw Protective Clothing*, Performance of protective clothing : fourth volume, ASTM STP 1133, James P. McBriarty and Norman W. Henry, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphie, 1992, p. 703-716.
3. Arteau, J., *Requirements for Working Clothes and Personal Protective Equipment in Forestry*, Conférence thématique. Seminar on clothing and safety equipment in forestry, Kuopio, Finland, ed. Kuopio Regional Institute on Occupational Health, 1994, p. 91-125.
4. Arteau, J., Arcand, J.-F. et Turcot, D., *Factors Influencing the Performance of Chain Saw Leg Protective Devices and Its Measurements*, Performance of protective clothing : Fifth Volume, ASTM STP 1237, James S. Johnson and S.Z. Mansdorf, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphie. Accepté pour publication.
5. ASTM F 1414-92a, *Standard Test Method for Measurement of Cut Resistance to Chain Saw in Lower Body (legs) Protective Clothing*, 1992.
6. ASTM F 1458-94, *Standard Test Method for Measurement of Cut Resistance to Chain Saw of Foot Protective Device*, 1994.
7. Bureau de normalisation du Québec, CAN/BNQ 1923-095-M90, *Élément de protection des pantalons et des jambières pour les utilisateurs de scie à chaîne - Détermination de la vitesse de blocage et du temps de traversée*, Québec 1990.
8. CEN/TC/162 N/EN 381 PART 3 : *Test Methods for Footwear*, février 1995.
9. CEN/TC/162 N/EN 381 PART 6 : *Requirements for Footwear*, février 1995.
10. Monroe, G., *Test Device and Procedure for Testing Protective Pads for Chain Saw Operators*, Agricultural Engineering Department, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA., décembre 1980, rapport non publié.
11. Putnam, T., Jackson G. et Davis, J., *Chain Saw Chaps Redesign*, EDT Report 9102, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Missoula, MT, août 1982, 23 p.
12. Stacke, L.-E., *Cutting Action of Saw Chains*, Department of mechanical engineering, Chalmers University of technology, Goteberg, Sweden, 1989, 150 p.
13. Statens Maskin-Provingar, *Testing of Protective Clothing for Users of Chain Saws*, Meddelande 3240, Umeå, 1990.
14. Turcot, D., Arteau, J., Daigle, R. et Drouin, P., *Study Report Evaluation of the Performance of Protective Boots*, presented to Ontario Hydro, IRSST, Montréal, 1990 (non-publié).

15. Turtiainen, K., *Comparaison of Test Methods Used for Durability Testing of Leg Shields for Chain Saw Users*, Vakola, Finnish Research Institute of Engineering in Agriculture and Forestry, Helsinki, 1979.

ANNEXE 1 : Calcul de E_s

L'équation de la pente de la droite en position d'arrêt pour la détection de la coupure de la scie à chaîne qui a traversé l'échantillon est selon la géométrie du banc d'essai, telle que montrée à la figure 3.2 :

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{\left(\frac{1}{2} + h + b\right) - \left(y_1 + \frac{b}{\cos(\theta)}\right)}{L}$$

où y_1 est l'ordonnée à l'origine. Cette valeur peut s'exprimer en termes de θ de la façon suivante :

$$y_1 = \frac{1}{2} \operatorname{tg}(\theta) + \frac{1}{2}$$

L'équation de la pente de la droite en position d'arrêt est donc :

$$\operatorname{tg}(\theta) = \left[\frac{h + b - \left(\frac{1}{2} \operatorname{tg}(\theta) + \frac{b}{\cos(\theta)}\right)}{L} \right]$$

et en solutionnant pour θ (par substitution), on trouve :

$$\theta = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{1}{2(2h + 4b)} \left(-4L - 2 + 2\sqrt{4L^2 + 4L + 1 + 4h^2 + 8hb} \right) \right]$$

Et l'équation de la droite à la position d'arrêt devient donc :

$$y = \frac{\left[\frac{1}{2} \operatorname{tg}(\theta) + \frac{1}{2} + \frac{b}{\cos(\theta)} \right] - \left(\frac{1}{2} + h + b \right)}{L} x + \left(\frac{1}{2} \operatorname{tg}(\theta) + \frac{1}{2} \right)$$

Avec en plus l'équation de la partie semi-circulaire, soit le début du contact entre l'éprouvette et la scie à chaîne, qui est :

$$y = \sqrt{R^2 - x^2} - e$$

on trouve les valeurs de y qui satisfont les deux dernières équations en remplaçant les valeurs des constantes h , b , L , et en solutionnant numériquement. Les racines de l'équation ainsi obtenues permettent de trouver l'aire comprise entre les deux courbes (cercle et droite).

Ainsi, l'aire (A_d) est égale à :

$$\int \left\{ \sqrt{R^2 - x^2} - e - \left[\frac{\left(\frac{1}{2} \operatorname{tg}(\theta) + \frac{1}{2} + \frac{b}{\cos(\theta)} \right) - \left(\frac{1}{2} + h + b \right)}{L} x + \frac{1}{2} \operatorname{tg}(\theta) + \frac{1}{2} \right] \right\} dx$$

Les bornes d'intégration sont données par les racines obtenues précédemment.
Finalement, l'énergie corrigée pour la géométrie des éprouvettes est :

$$E_s = \frac{E_p}{A_d} \quad (\text{J/cm}^2)$$

ANNEXE 2 : Procédure d'essai

La première étape consiste à préparer les bottines à évaluer pour pouvoir détecter le début et la fin de la coupure. La méthode utilisée permet de détecter un contact électrique entre la scie à chaîne et un papier d'aluminium collé sur le dessus de la botte et un autre collé à l'intérieur.

Une fois les capteurs de début et d'arrêt installés, la botte est remplie de petites «billes» (diamètre moyen de 3 mm) en polystyrène pour que la botte garde sa forme lorsque la scie à chaîne est en contact et appuie sur elle. La botte est ensuite installée sur le support d'échantillon et positionnée pour que le contact avec la chaîne soit perpendiculaire. La hauteur de chute est vérifiée (32 mm).

Le système d'entraînement, la chaîne et le guide-lame sont nettoyés avant chaque essai. La tension dans la chaîne est vérifiée.

La garde recouvrant le guide-lame est mise en place. Une fois le mécanisme verrouillé le moteur pourra démarrer.

La pompe qui alimente le guide-lame avec de l'huile est mise en marche.

Le système tourne à la vitesse déterminée pendant 30 secondes. Le moteur est débrayé et la gâchette libère le plateau de support du guide-lame qui tourne librement autour de l'axe d'entraînement.

Le système d'acquisition est mis en marche par le déclenchement de la gâchette. La carte d'acquisition permet de garder un nombre de données (ex. 200) antérieures au départ de l'acquisition (mode «pré-trig»).

La chaîne entre en contact avec le capteur et déclenche le chronomètre. L'arrêt est marqué lorsque la chaîne entre en contact avec le papier d'aluminium collé à l'intérieur de la botte.

ANNEXE 3 : Période de réchauffement

MÉTHODE D'ESSAI : VOLANT D'INERTIE

VITESSE	Après une période d'inactivité de plus de 2 jours	Quotidien
2 000 tr/min	10 min	4 min
3 000 tr/min	5 min	-
4 000 tr/min	2 min	2 min
5 000 tr/min	1 min	1 min

Note : Avant de poursuivre des essais subséquents à une période de réchauffement du montage, on recommande de faire une pause de 5 minutes.