PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

| | |
|---|---|
| **Titre:** Title: | Développement d'une méthode d'essai pour évaluer les équipements de protection contre les scies à chaînes |
| **Auteur:** Author: | Denis Turcot |
| **Date:** | 1996 |
| **Type:** | Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis |
| **Référence:** Citation: | Turcot, D. (1996). Développement d'une méthode d'essai pour évaluer les équipements de protection contre les scies à chaînes [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/9030/ |

**Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

| | |
|---|---|
| **URL de PolyPublie:** PolyPublie URL: | https://publications.polymtl.ca/9030/ |
| **Directeurs de recherche:** Advisors: | Marie Bernard, & Thang Bui-Quoc |
| **Programme:** Program: | Unspecified |

**Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal**
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

# DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'ESSAI POUR ÉVALUER LES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION CONTRE LES SCIES À CHAÎNES

DENIS TURCOT

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE MÉCANIQUE)

OCTOBRE 1996

© Denis Turcot, 1996

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26527-7

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

# DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'ESSAI POUR ÉVALUER LES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION CONTRE LES SCIES À CHAÎNES

présenté par : Turcot Denis

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. YELLE Henri, Ph.D., président

Mme BERNARD Marie, Ph.D., directrice de recherche

M. BUI-QUOC Thang, D.Sc.A., codirecteur de recherche

M. ARTEAU Jean, Ph.D., membre

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à mes directeurs de recherche, madame Marie Bernard et monsieur Thang Bui-Quoc, pour leurs encouragements et les conseils qu'ils m'ont prodigués tout au long de cette étude. De plus, je tiens à remercier monsieur Jean Arteau qui a contribué par ses commentaires à la mise au point de cette méthode d'essai.

Je voudrais remercier mon correcteur d'épreuve, Henri Laberge, pour sa persévérance à relire plusieurs fois ce mémoire.

Un merci spécial à monsieur Renaud Daigle, qui a réalisé les essais avec l'attention toute particulière que requiert la mise au point d'une méthode d'essai.

Et finalement, je tiens à remercier mon épouse, France Laberge, pour sa patience et ses encouragements, qui m'ont permis de mener à bien ce projet.

# RÉSUMÉ

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

La méthode proposée ici 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, le couple pour entraîner la chaîne, la vitesse de la chaîne et la période de temps pour couper l'équipement à évaluer sont pris en compte. L'énergie est donc un paramètre physique global qui permet d'évaluer la capacité d'un matériau à résister à une coupure provoquée par une scie à chaîne.

Dans la méthode d'essai mise au point, un moteur entraîne un volant qui agit comme réservoir d'énergie et qui à son tour, entraîne la chaîne. Une fois la vitesse d'essai atteinte, le moteur est désengagé et le volant devient la seule source d'énergie qui entraîne la chaîne. La chaîne entre alors en contact avec l'équipement de protection 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 évaluées 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 ou égale à celle obtenue avec le temps de traversée.

Contrairement aux méthodes d'essai existantes, la méthode mise au point 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 assure que la méthode d'essai ne sera pas désuète après quelques années d'application.

# ABSTRACT

The present work proposes a test method for evaluating the protective equipment used by workers in the forest industry. The objective of the method is to provide users and manufacturers with a reliable tool to evaluate the performance of such equipment.

The method proposed here consists of measuring the energy dissipated in the controlled cutting of samples of protective equipment using a modified chain saw apparatus. To determine the quantity of energy dissipated, the parameters measured are: the speed of the chain, the torque required to turn the chain, and the time elapsed in cutting through a standard sample of the equipment. By measuring the total energy dissipated, it is possible to evaluate the resistance of a material to cutting by a chain saw.

In the test method developed here, a motor is used to rotate a flywheel which acts as an energy reservoir and which, in turn, is used to drive the chain. Once the desired test speed is attained, the motor is disengaged from the flywheel, which then becomes the sole energy source used to drive the chain. The turning chain is then applied against the test sample.

A sensor installed between the flywheel and the chain records in real time the torque transmitted from the flywheel to the chain. Through this arrangement, it is possible to directly calculate the energy dissipated during the cutting of the sample.

The reliability of the test apparatus, as well as that of the proposed measurement technique were confirmed during an extended evaluation period. The resistance caracterised by the two variables considered in the study, the energy and cut-through time, were examined for different materials under varying test conditions.

The results obtained show that the energy required to cut through a sample is invariant and independent of the initial test speed, which was clearly not the case for the methods based solely on cut-through time. The scatter in the results for the energy-based measurement was consistently less than, or equal to, that obtained in using the measurement based on cut-through time.

As opposed to existent test methods, the present method has the advantage of being independent of the drive system used and allows for the maintenance or replacement of the motor used to drive the flywheel without affecting the results obtained. This assures that the test apparatus will continue to supply objective and reliable measurements over a longer useful life.

# TABLE DES MATIÈRES

**REMERCIEMENTS** . . . . . iv

**RÉSUMÉ** . . . . . v

**ABSTRACT** . . . . . vii

**TABLE DES MATIÈRES** . . . . . ix

**LISTE DES TABLEAUX** . . . . . xiii

**LISTE DES FIGURES** . . . . . xv

**LISTE DES ANNEXES** . . . . . xviii

**LISTE DES SIGLES, SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS** . . . . . xix

**INTRODUCTION** . . . . . 1

**CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE** . . . . . 6

1.1 MÉTHODES D'ESSAIS EXISTANTES . . . . . 6

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

1.2 PARAMÈTRES INFLUANT SUR LA COUPURE . . . . . 12

1.3 ORIENTATION DES TRAVAUX . . . . . 14

**CHAPITRE 2 : ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE** . . . . . 16

2.1 CALCUL DE L'ÉNERGIE . . . . . 16

2.2 ÉNERGIE SPÉCIFIQUE DE COUPURE . . . . . 19

2.2.1 FACTEUR DE CORRECTION POUR LA GÉOMÉTRIE DES ÉPROUVETTES . . . . . 19

2.2.2 FACTEUR DE CORRECTION POUR LA DURETÉ DES ÉPROUVETTES . . . . . 21

**CHAPITRE 3 : PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE** . . . . . 25

3.1 SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT DE LA CHAÎNE . . . . . 25

3.2 SYSTÈME DE CONTRÔLE . . . . . 31

3.3 SYSTÈME D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES . . . . . 32

3.4 SUPPORT D'ÉCHANTILLON . . . . . 34

3.5 CONDITIONS D'ESSAIS . . . . . 37

3.6 FONCTIONNEMENT À VIDE . . . . . 37

3.6.1 TEMPS D'ARRÊT À VIDE ($t_v$) . . . . . 38

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

3.6.2 ÉNERGIE INITIALE POUR LES ESSAIS DE COUPURE . . . . . 43

**CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET ANALYSE** . . . . . 50

4.1 ESSAIS AVEC LE BOIS . . . . . 52

4.1.1 INFLUENCE DE LA VITESSE INITIALE D'ESSAI SUR LE TEMPS DE TRAVERSÉE D'UNE ÉPROUVETTE EN PIN . . . . . 53

4.1.2 ÉNERGIE DE COUPURE DU PIN . . . . . 57

4.1.3 INFLUENCE DE LA VITESSE INITIALE D'ESSAI SUR L'ÉNERGIE DE COUPURE DU PIN . . . . . 59

4.1.4 INFLUENCE DE LA DURETÉ DES ÉPROUVETTES . . . 62

4.1.5 ESSAIS SUR L'ÉRABLE . . . . . 78

4.1.6 COMPARAISON ENTRE LES RÉSULTATS OBTENUS SUR LE PIN ET SUR L'ÉRABLE . . . . . 81

4.2 ESSAIS SUR LES CAOUTCHOUCS . . . . . 82

4.3 ESSAIS SUR LES BOTTES DE PROTECTION . . . . . 87

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

**CHAPITRE 5 : DISCUSSION** . . . . . 94

5.1 CHOIX DU PARAMÈTRE POUR LE CRITÈRE DE PERFORMANCE . . . . . 94

5.2 INFLUENCE DU CHOIX DU VOLANT . . . . . 96

5.3 ÉNERGIE PAR UNITÉ DE SURFACE . . . . . 99

5.4 MATÉRIAUX D'ÉTALONNAGE . . . . . 100

5.5 REPRODUCTIBILITÉ DE LA MÉTHODE . . . . . 101

**CHAPITRE 6 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS** . . . . . 103

6.1 CONCLUSIONS . . . . . 103

6.2 RECOMMANDATIONS . . . . . 104

**LISTE DES RÉFÉRENCES** . . . . . 107

**ANNEXES** . . . . . 112

# LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 1.1a** Comparaison des différentes méthodes d'essai . . . . . 9

**Tableau 1.1b** Comparaison des différentes méthodes d'essai (suite) . . . . . 10

**Tableau 1.2** Avantages et inconvénients des méthodes normalisées . . . . . 11

**Tableau 2.1** Rapport de vitesses entre les différents volants . . . . . 17

**Tableau 3.1** Coefficient de variation des temps d'arrêt à vide ($t_v$) . . . . . 42

**Tableau 3.2** Comparaison de l'énergie initiale théorique et de l'énergie de freinage mesurée avec les différents volants . . . . . 44

**Tableau 3.3** Écart entre l'énergie initiale évaluée théoriquement et l'énergie à vide mesurée . . . . . 45

**Tableau 4.1** Matériaux et conditions d'essais . . . . . 51

**Tableau 4.2** Dispersion du temps de traversée ($t_c$) pour le pin . . . . . 57

**Tableau 4.3** Énergie moyenne pour couper les éprouvettes de pin . . . . . 59

**Tableau 4.4** Énergie de coupure du pin et vitesse initiale d'essai . . . . . 61

**Tableau 4.5** Dépendance de l'énergie et de la vitesse d'essai pour le pin . . . . 62

**Tableau 4.6** Dureté moyenne du lot d'éprouvettes de pin . . . . . 67

**Tableau 4.7** Dureté et énergie pour les éprouvettes de pin . . . . . 73

**Tableau 4.8** Temps de traversée et $E_{d,s}$ pour l'érable; volant G et vitesse initiale d'essai de 520 rad/s . . . . . 78

**Tableau 4.9** Temps de traversée et énergie de coupure corrigée (dureté et géométrie) pour l'érable; volants P, M et G . . . . . 79

## LISTE DES TABLEAUX (suite)

**Tableau 4.10** Dureté moyenne de l'érable . . . . . 80

**Tableau 4.11** Comparaison des valeurs de $t_c$ et de $E_m$ pour l'érable et le pin . . . . . 82

**Tableau 4.12** Valeurs moyennes du temps de traversée et de l'énergie de coupure pour l'ensemble des essais sur les caoutchoucs . . . . . 85

**Tableau 4.13** Énergie de coupure pour différents types de bottes . . . . . 90

**Tableau 4.14** Comparaison des niveaux d'énergie de coupure $E_m$ des bottes de protection à partir de deux méthodes d'essai . . . . . 91

**Tableau 5.1** Comparaison de l'énergie totale de coupure mesurée avec les différents volants . . . . . 98

**Tableau C.1** Temps de fonctionnement à vide avant un essai . . . . . 118

**Tableau H.1** Équation du couple moyen de frottement pour chacun des volants . 128

**Tableau H.2** Évaluation des pertes par frottement lors des essais de coupure . . . 129

# LISTE DES FIGURES

**Figure 2.1** Géométrie des éprouvettes . . . . . 20

**Figure 2.2** Coupe d'un échantillon a) position de l'échantillon par rapport à la scie b) aire de la section coupée . . . . . 23

**Figure 2.3** Géométrie de l'indenteur pour l'essai de dureté a) vue d'ensemble b) détail de la pointe de l'indenteur . . . . . 24

**Figure 3.1** Vue d'ensemble du montage expérimental . . . . . 26

**Figure 3.2** Banc d'essai . . . . . 27

**Figure 3.3** Système d'entraînement de la chaîne a)schéma d'assemblage des pièces b)vue d'ensemble . . . . . 30

**Figure 3.4** Vue rapprochée du support de l'échantillon . . . . . 35

**Figure 3.5** Exemple des données enregistrées pendant un essai a) durée de l'essai b) vitesse c) couple . . . . . 36

**Figure 3.6** Système de retenue pour les éprouvettes de bois . . . . . 39

**Figure 3.7** Positions des coupures pour l'évaluation des bottes . . . . . 40

**Figure 3.8** Temps d'arrêt à vide en fonction de la vitesse initiale d'essai pour les trois volants considérés . . . . . 46

**Figure 3.9** Variation du temps d'arrêt à vide normalisé en fonction de la vitesse initiale du volant . . . . . 47

**Figure 3.10** Dispersion du temps d'arrêt à vide en fonction de la vitesse initiale de l'essai . . . . . 48

## LISTE DES FIGURES (suite)

**Figure 3.11** Application d'un frein au système d'entraînement de la chaîne a) vitesse b) couple . . . . . 49

**Figure 4.1** Variation du temps de traversée des éprouvettes en pin en fonction de la vitesse initiale d'essai avec le volant M . . . . . 55

**Figure 4.2** Variation du temps de traversée des éprouvettes en pin en fonction de la vitesse initiale d'essai, avec le volant G . . . . . 56

**Figure 4.3** Distribution de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le volant P et une éprouvette en pin . . . . . 63

**Figure 4.4** Distribution de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le volant M et une éprouvette en pin . . . . . 64

**Figure 4.5** Distribution de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le volant G et une éprouvette en pin . . . . . 65

**Figure 4.6** Force de pénétration lors de la mesure de dureté des éprouvettes de pin . . . . . 70

**Figure 4.7** Coefficient de variation de la force de pénétration à 3 mm ($F_{3mm}$) lors de la mesure de dureté des différentes éprouvettes de pin . . . . . 71

**Figure 4.8** Diagramme pour le contrôle de qualité des éprouvettes de pin a)Force moyenne de pénétration, b)écart-type c)écart maximum ($F_{max}$ - $F_{min}$) . . . . . 72

## LISTE DES FIGURES (suite)

**Figure 4.9** Énergie de coupure, corrigée pour la dureté et la géométrie, du pin; volants P, M et G . . . . . 77

**Figure 4.10** Variation de l'énergie spécifique de coupure en fonction de la dureté des éprouvettes . . . . . 83

**Figure 4.11** Variation de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le caoutchouc SBR et le néoprène . . . . . 86

**Figure 4.12** Énergie de coupure, $E_m$, pour différents types de bottes . . . . . 93

**Figure A.1** Géométrie de l'ensemble scie à chaîne et éprouvette pour le calcul de la section droite a)vue d'ensemble b)section droite coupée de l'éprouvette . . . . . 113

**Figure B.1** Extrait d'un signal typique du couple . . . . . 117

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : CALCUL DE LA SURFACE DE LA SECTION DROITE COUPÉE DES ÉPROUVETTES . . . . . 113

ANNEXE B : OBSERVATIONS SUR LE SIGNAL DU COUPLE . . . . . 116

ANNEXE C : PÉRIODE DE RÉCHAUFFEMENT . . . . . 118

ANNEXE D : PROCÉDURE D'ESSAI . . . . . 119

ANNEXE E : CALCUL DE L'INERTIE DU SYSTÈME . . . . . 121

ANNEXE F : CALCUL DES DROITES DE RÉGRESSION POUR $t_v/I_T$ . . . . . 123

ANNEXE G : MANUEL DU COUPLEMÈTRE, SECTION DYNAMIQUE . . 125

ANNEXE H : CALCUL DES PERTES ASSOCIÉES AU FROTTEMENT . . . 127

# LISTE DES SIGLES, SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

| | | |
|---|---|---|
| ASTM | | American Society for Testing and Materials |
| BNQ | | Bureau de normalisation du Québec |
| CSST | | Commission de la Santé et de la Sécurité au Travail |
| CEN | | Comité européen de normalisation |
| $A_d$ | ($cm^2$) | Surface de la section droite coupée |
| $E_d$ | ($J/cm^2$) | Énergie corrigée pour la dureté des éprouvettes de bois |
| $E_f$ | (J) | Énergie de freinage |
| $E_F$ | (J) | Énergie perdue en frottement |
| $E_i$ | (J) | Énergie initiale |
| $E_m$ | (J) | Énergie de coupure |
| $E_s$ | ($J/cm^2$) | Énergie spécifique de coupure (énergie par unité de surface de la section droite coupée) |
| $E_{d,s}$ | ($J/cm^2$) | Énergie corrigée pour la dureté et la géométrie des éprouvettes de bois |
| $E_T$ | (J) | Énergie totale |
| $E_v$ | (J) | Énergie à vide |

## LISTE DES SIGLES, SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS (suite)

| | | |
|---|---|---|
| $f_k$ | | Facteur de correction pour la dureté de l'éprouvette $k$, par rapport à l'ensemble des éprouvettes d'un même type |
| $F_{3mm}$ | (N) | Force de pénétration moyenne à 3 mm |
| $I_s$ | ($kg \cdot m^2$) | Inertie des pièces en rotation (excluant le volant) |
| $I_T$ | ($kg \cdot m^2$) | Inertie totale |
| $I_v$ | ($kg \cdot m^2$) | Inertie du volant |
| $r$ | | Coefficient de corrélation |
| $r^2$ | | Coefficient d'explication |
| $t_c$ | (s) | Temps de traversée |
| $t_v$ | (s) | Temps d'arrêt à vide |
| $T$ | ($N \cdot m$) | Couple |
| $T_f$ | ($N \cdot m$) | Couple de frottement moyen |
| $T_r$ | ($N \cdot m$) | Couple résistif |
| $V$ | (tr/min) | Vitesse de rotation |
| $\mu$ | | Moyenne |
| $\sigma$ | | Écart-type |
| $\alpha$ | ($rad/s^2$) | accélération angulaire |
| $\omega$ | (rad/s) | Vitesse angulaire |

# INTRODUCTION

Le travail avec une scie à chaîne comporte des risques de blessures, qu'on soit bûcheron, professionnel ou occasionnel. En effet, on a relevé dans 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, un peu plus de 700 accidents occasionnés par une scie à chaîne. Plus de la moitié (56%) de ces accidents proviennent du secteur de la forêt. En tout, soixante-quinze 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. Deux questions peuvent se poser. Est-ce qu'il existe des équipements de protection, les bottes dans le cas présent, qui soient plus performants que d'autres? Comment évaluer ces équipements?

La mise au point d'une méthode d'essais a pour objectif de fournir un outil adéquat aux utilisateurs d'équipements de protection et aux fabricants pour évaluer la performance des produits existants ou en développement. Une norme de rendement (de performance) pour cet équipement de protection qui serait basée sur cette méthode d'essai permettrait aux utilisateurs de choisir des équipements de protection performants, et aussi l'élimination des équipements qui ne le sont pas.

Les équipements de protection utilisés par les travailleurs forestiers sont fabriqués de façons différentes suivant la partie du corps protégée, le niveau de protection désiré, et dépendant du manufacturier. Pour des raisons de confort et de souplesse au cours de l'exécution des tâches, les textiles ont une place prépondérante comme matériau de protection dans la fabrication des pantalons et jambières. On retrouve fréquemment dans la fabrication de jambières de protection des assemblages multicouches.

Ces matériaux qu'on doit classer en terme de performance pour la résistance qu'ils offrent contre une scie à chaîne sont presque tous anisotropes. De plus, la méthode d'essai ne doit pas influencer le mécanisme de protection du vêtement évalué, tel qu'il est utilisé sur le terrain. Ainsi, dans les jambières composées de textile, le mode de retenue du spécimen à évaluer ne doit pas empêcher le mouvement des fibres, qui constitue un des mécanismes de protection du vêtement.

Il en est de même pour les bottes qu'utilisent les usagers de scie à chaîne. La fabrication va du modèle en cuir avec des éléments de textile cousus à l'intérieur de la botte, au modèle tout en caoutchouc. Ce dernier modèle est conçu avec des matériaux multicouches de différents caoutchoucs ou de textiles et même des combinaisons de ces deux matériaux. De plus, la tige de la botte présente souvent une construction différente de l'empeigne.

Le caractère anisotrope et non-uniforme des équipements à évaluer indique la nécessité

d'utiliser une méthode d'essai qui permette aux différents mécanismes de protection des vêtements d'être libres d'agir pendant les essais. La méthode d'essai doit permettre de classer les différents produits évalués selon une échelle de mesure des propriétés physiques.

L'objectif du présent travail est de proposer une nouvelle méthode, pour évaluer les équipements de protection, qui répond aux attentes des associations de sécurité du milieu de la forêt. Ces associations désirent que la méthode d'essai soit conforme à la réalité, d'où l'utilisation d'une scie à chaîne pour évaluer les équipements de protection. Cette méthode 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.

L'analyse statistique des résultats obtenus permettra de valider la méthode d'essai proposée. La répétabilité des résultats obtenus avec la méthode d'essai est déterminée en comparant certains indicateurs statistiques mesurés lors des séries d'essais. Les indicateurs utilisés dans cette étude sont: la moyenne ($\mu$), l'écart-type ($\sigma$) et le coefficient de variation (C.V.). Ce dernier est défini comme étant le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Il permet d'apprécier la dispersion des résultats autour de la moyenne.

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.

Une phase d'essai préliminaire permettra de valider le fonctionnement du banc d'essai et de vérifier la faisabilité du principe de mesure énoncé. La validation de la méthode d'essai consiste à déterminer le comportement de différentes variables, telle l'énergie et le temps de traversée, pour différents matériaux évalués dans différentes conditions d'essai. Les paramètres d'essai retenus pour cette étude sont principalement la vitesse initiale du volant et le niveau initial d'énergie disponible pour la coupe.

Pour la phase de validation de la méthode d'essai, des matériaux plus homogènes que les équipements de protection, tel des éprouvettes de bois et de caoutchouc, sont utilisés. Ainsi, en contrôlant mieux les matériaux utilisés, il est possible d'évaluer l'influence des conditions d'essais sur les variables considérées, soit le temps et l'énergie pour couper au travers du matériau.

Pour que la méthode d'essai soit valide, les résultats obtenus pour les différentes variables, dans les mêmes conditions d'essai, doivent être identiques. De plus, la méthode doit être suffisamment sensible pour permettre de classer les différents matériaux.

Dans le chapitre qui suit l'introduction, la revue des méthodes d'essai existantes pour évaluer les équipements de protection montre leurs faiblesses et l'importance de développer une nouvelle méthode d'essai (chapitre 1). Le deuxième chapitre explique la méthode employée pour évaluer l'énergie nécessaire à la coupure. Il y est expliqué de quelle façon la correction de l'énergie calculée tient compte de la géométrie et de la dureté des échantillons de bois utilisés. Le troisième chapitre, décrit en détails le banc d'essai mis au point. La particularité de construction de ce montage permet d'éviter qu'il soit désuet et simplifie l'entretien et le remplacement des pièces. De plus, il est expliqué comment la mesure du temps d'arrêt à vide ($t_v$) permet de vérifier le bon fonctionnement du banc d'essai. L'analyse des résultats présentée au quatrième chapitre, permet de vérifier la répétabilité des résultats obtenus avec la méthode d'essai mise au point. Les variables retenues pour cette étude sont évaluées et comparées entre elles, pour déterminer celle qui présente le moins de variations. Suivra au cinquième chapitre, une discussion sur les points suivants: le choix du critère de performance, l'influence du choix du volant, l'énergie par unité de surface, les matériaux d'étalonnage et la reproductibilité de la méthode. Finalement, la conclusion résume les caractéristiques importantes de cette méthode d'essai et les recommandations pour les travaux futurs.

# CHAPITRE 1

# REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, la revue de la littérature met l'emphase sur les avantages et les inconvénients des méthodes existantes et permettra de constater les atouts de la méthode proposée; en particulier, l'évolution des méthodes d'essai pour évaluer la performance des équipements de protection contre les scies à chaîne est détaillée dans ce chapitre. De plus, les faits saillants des études traitant des forces et de la puissance en jeu lors de la coupure d'un échantillon de bois par une scie à chaîne sont résumés. Ces études avaient pour but de concevoir ou d'améliorer le design de la combinaison moteur et chaînes afin d'augmenter la performance des scies à chaîne existantes.

## 1.1 MÉTHODES D'ESSAIS EXISTANTES

Depuis plusieurs années, des travaux de recherche visant à déterminer la performance des équipements de protection pour les travailleurs forestiers ont été réalisés. En premier, les chercheurs ont travaillé à développer des méthodes d'essai pour évaluer le niveau de protection qu'offrent les jambières de protection contre les scies à chaîne. Ces travaux ont fourni les données nécessaires à la rédaction de normes d'essai sur les équipements de protection contre les scies à chaîne ; ASTM F 1414-92a, ASTM F 1458-94, CAN/BNQ 1923-095-M90 et EN 381.

Les méthodes d'essais existantes diffèrent les unes des autres par le mode d'entraînement

de la chaîne, le mode d'attache de l'équipement évalué et par les variables utilisées comme unités de mesure de la performance. Dans l'étude de ARTEAU et TURCOT (1992), les différences majeures entre les méthodes d'essai ont été présentées. Rappelons qu'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 1.1a), et les méthodes utilisant un moteur électrique ou un volant d'inertie comme système d'entraînement de la chaîne (tableau 1.1b). 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 élaborée par le STATENS MASKIN-PROVINGAR (1990) qui a permis l'élaboration de la norme européenne EN 381-3.

Les variables utilisées pour la mesure de la performance sont différentes selon les méthodes d'essai. Les méthodes d'essai avec scie à essence, ASTM F 1414-92a, ASTM F 1458-94, CAN/BNQ 1923-095-M90 et PUTNAM (1982), utilisent la vitesse limite de blocage (VLB), i.e. 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 EN 381-3 et STATENS

MASKIN-PROVINGAR (1990) préconisent, comme critère de performance, la vitesse initiale maximum admissible sans qu'il y ait traversée de l'équipement à évaluer. La méthode d'essai utilisant une scie à chaîne électrique continuellement embrayée durant l'essai, ARTEAU et TURCOT (1992), recommande l'utilisation de l'énergie comme critère de performance. La méthode développée par Monroe (1980), basée sur un volant d'inertie entraîné par un moteur électrique durant tout le temps que dure l'essai, préconisait uniquement l'utilisation du temps de traversée pour couper l'équipement évalué et n'est plus utilisée aujourd'hui.

Bien que ces méthodes permettent d'obtenir un classement relatif des différents modèles d'équipement de protection, elles ont des faiblesses (tableau 1.2). Pour les méthodes 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 ne peuvent plus être utilisés comme valeur absolue. 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.

**Tableau 1.1a** Comparaison des différentes méthodes d'essai

| Entraînement de la chaîne :<br>Critère de performance : | Scie à chaîne à essence<br>Vitesse limite de blocage (VLB) | | |
|---|---|---|---|
| Méthode d'essai | Putnam (1982)<br>USDA Forest Service | IRSST-<br>CAN/BNQ 1923-095-M90 | ASTM F1414-92a<br>ASTM F1458-94 |
| Modèle de chaîne | Oregon 72LP | Oregon 73LP | Oregon 72LP |
| Dimension de l'échantillon | 711 × 203 mm | 711 × 203 mm | 710 × 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<br>8 000 trs/min | 3,1 kW à 8 500 trs/min | 3,3 kW à<br>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<br>bottines |

**Tableau 1.1b** Comparaison des différentes méthodes d'essai (suite)

| Entraînement de la chaîne : | Moteur embrayé | Moteur non embrayé pendant l'essai (vitesse décroissante) | |
|---|---|---|---|
| Critère de performance : | Énergie | Vitesse maximum sans coupure de part en part | |
| Méthode d'essai | IRSST - ARTEAU et TURCOT (1992) | Suède Statens Maskin-Provingar | EN 381 |
| 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 $V_{max} \approx 12$ m/s) | Décroissante | Décroissante |
| Puissance maximum | 1,4 kW | 1,0 kW | ... |
| Inertie des pièces en mouvement | ... | 900 ± 50 kg·mm$^2$ | 0,47 × 10$^{-3}$ kg·m$^2$±5 % *(sans chaîne et pignon) |
| Longueur du guide-lame | 406 mm | 330 mm | 330 mm |
| Hauteur de chute | 32 mm | 3 ± 1 mm | 3 ± 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 1.2** 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<br>•ASTM F1414-92 | 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 $V_i$=*20 m/s à 0 m/s*) |

La faiblesse que présente la norme européenne EN 381-1 vient de l'utilisation d'un volant d'inertie trop petit comme système d'entraînement de la chaîne. Ce banc d'essai permet d'atteindre des vitesses linéaires de chaîne allant jusqu'à 28 m/s mais avec un niveau

initial d'énergie 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 complètement au travers d'une botte classée moyenne selon nos calculs (550 Joules). Malheureusement, il n'y a pas de données publiées pour valider cette méthode d'essai.

Quant à la méthode d'essai utilisant une scie à chaîne électrique, présentée au tableau 1.1b, elle est sujette à devenir désuète tout comme les méthodes avec scie à essence, car elle est basée sur un entraînement direct de la chaîne par la scie.

## 1.2 PARAMÈTRES INFLUANT SUR LA COUPURE

Les recherches sur les paramètres influant sur la coupure qui ont été réalisées par McKENZIE (1960 et 1962) et GAMBRELL (1966) avaient pour but de mettre au point les scies à chaîne et traitaient des forces de contact entre les dents des chaînes et des échantillons de bois. Les premiers travaux expérimentaux de McKENZIE (1960) ont montré que la vitesse de la chaîne n'avait pas d'effet sur les forces de coupe.

L'application de la mécanique de la rupture au problème des dents de scie coupant une pièce de bois a été traitée par DOI et YOKOYAMA (1975) et McKENZIE (1962). Ces auteurs ont déterminé théoriquement les forces de coupe et les ont comparé aux valeurs qu'ils ont obtenues expérimentalement. L'objectif poursuivi en déterminant les forces

en jeu, était de comprendre les mécanismes de coupure et par la suite, améliorer le design des chaînes. L'extrapolation des résultats a permis de déterminer la puissance requise pour le moteur de la scie à chaîne. Ce type d'approche ne peut cependant s'appliquer à notre situation, à cause de la diversité des matériaux utilisés pour les équipements de protection.

Les travaux de GAMBRELL (1966), REYNOLDS et SOEDEL (1970 et 1972) étaient de nature expérimentale. Ils ont démontré que les trois forces de coupe (horizontale, latérale et verticale) à l'interface dent-bois étaient principalement proportionnelles à la profondeur de coupe obtenue par le passage d'une seule dent. GAMBRELL (1966) a déterminé l'énergie moyenne dissipée par le passage d'une seule dent de scie à chaîne dans un échantillon de bois en fonction de la profondeur de coupe. La profondeur de coupe est définie comme étant l'épaisseur de matériau enlevé par le passage d'une dent de la scie à chaîne. Il a montré que la force horizontale de coupe, de même que l'énergie, était proportionnelle à la profondeur de coupe mais indépendante de la vitesse de la chaîne, jusqu'à une vitesse d'environ 15,2 m/s (3 000 pi/min). Pour des vitesses supérieures il a toutefois observé que la force horizontale de coupe décroît rapidement.

Les travaux de REYNOLDS (1970) ont démontré que la puissance requise pour couper un échantillon de bois est fonction de la vitesse de la chaîne et du taux d'alimentation de la scie dans le bois. De plus, si on augmente la puissance du moteur, le temps de coupe diminue, mais la force verticale augmente, ce qui nécessite un effort supplémentaire de

la part de l'opérateur de la scie à chaîne. Par la suite, REYNOLDS (1972) a conclu qu'il y a un niveau de puissance maximum pour laquelle une augmentation de puissance n'entraînera pas de diminution de temps de coupe (productivité des scies à chaîne). D'où l'utilisation de scie à chaîne de petites cylindrées (50 cc).

Plus récemment, STACKE (1989) a étudié les mécanismes de coupe des scies à chaîne. Il a développé un modèle théorique, basé sur les valeurs réelles des forces de coupe, simulant le passage d'une scie à chaîne dans un échantillon de bois. La mesure des forces de coupe a indiqué que la valeur de la force horizontale est environ 5 à 8 fois supérieure à la valeur des forces latérale et verticale. Il a également confirmé, que la vitesse a peu d'effet sur les forces de coupe dans la plage de vitesse de 5 à 45 m/s et donc, peu d'effet de la vitesse pour une scie à chaîne en opération (plage d'utilisation de 10 à 20 m/s). Il a montré que le facteur le plus important pour les forces de coupe demeure la profondeur de coupe. Il a constaté l'importance de la condition des couteaux et particulièrement le tranchant du bord coupant. Cependant, les paramètres influents restent difficiles à définir et à contrôler. Pour ces essais, il a utilisé des chaînes aiguisées avec précision et pour un nombre limité d'essais seulement. Il a observé que la force de coupe tend généralement à augmenter avec la densité du bois.

## 1.3 ORIENTATION DES TRAVAUX

Les différences entre les méthodes d'essai existantes ainsi que les différentes variables utilisées pour la mesure de la performance rendent la comparaison des résultats difficile.

D'autant plus qu'il n'y a pas eu d'étude comparative ou d'essais comparatifs. La présente recherche a donc été orientée 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. Pour atteindre cet objectif, l'utilisation d'un volant d'inertie pour l'entraînement de la chaîne et d'un système de mesure permettant d'évaluer l'énergie dissipée pendant la coupure de l'échantillon évalué, a été retenu.

La méthode d'essai mise au point possède l'avantage de ne pas être dépendante du système d'entraînement de la chaîne. Cette méthode permet d'emmagasiner l'énergie dans un volant en rotation et de s'assurer que le niveau d'énergie initiale, pour une même vitesse d'essai, sera toujours identique. Le facteur qui pourrait influencer le niveau initial d'énergie est relié principalement au frottement dans les pièces mécaniques (roulements, chaîne et guide-lame). Les essais à vide ont cependant permis de vérifier le comportement du banc d'essai. De plus, le contrôle de la période de réchauffement du banc d'essai permet de diminuer la variation des paramètres d'essai liée au frottement dans les pièces mécaniques; ceci nous assure d'un contrôle supplémentaire avec la méthode d'essai proposée, comparativement aux méthodes d'essai existantes.

# CHAPITRE 2

# ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE

La méthode d'essai proposée pour mesurer la performance des équipements de protection consiste à évaluer l'énergie transmise par un volant d'acier en rotation à une scie à chaîne qui coupe un échantillon. Dans la première section, le calcul de l'énergie emmagasinée dans un volant et la mesure de l'énergie requise pour couper un échantillon avec une scie à chaîne sont abordés. Dans la deuxième section, les facteurs de correction à appliquer à la mesure de l'énergie pour prendre en compte la géométrie et la dureté des échantillons sont discutés.

## 2.1 CALCUL DE L'ÉNERGIE

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

Dans les essais, on a utilisé 3 volants de diamètres différents. L'énergie disponible pour entraîner la scie dépend du diamètre du volant utilisé et de sa vitesse initiale. Les caractéristiques des volants sont définies comme suit:

$D_o$: rayon extérieur

$\rho$: densité de l'acier

$\omega$: vitesse angulaire (rad/s) du volant

$b$: épaisseur du volant

L'inertie du volant est donnée par:

$$I = \frac{\rho \pi b}{2} \left( \frac{D_o}{2} \right)^4 \qquad (2.1)$$

et l'énergie du volant en rotation est obtenue par:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \qquad (2.2)$$

Cette dernière équation nous permet de calculer l'énergie qu'il est possible d'emmagasiner initialement pour chaque volant tournant à une vitesse donnée. Le banc d'essai permet, en changeant de volant, de varier la vitesse initiale d'essai dans une certaine mesure, tout en maintenant le niveau initial d'énergie constant. Ainsi, comme le montre le tableau 2.1 des vitesses équivalentes, en se basant sur les équations 2.1 et 2.2 précédentes, on peut déterminer quelles sont les vitesses de chaque volant, pour obtenir un même niveau initial d'énergie.

**Tableau 2.1** Rapport de vitesses entre les différents volants pour générer la même quantité d'énergie.

| Volant (diamètre) | Volant P (12,7 cm) | Volant M (15,2 cm) | Volant G (20,3 cm) |
|---|---|---|---|
| Volant P | 1,00 | 1,44 | 2,56 |
| Volant M | 0,69 | 1,00 | 1,78 |
| Volant G | 0,39 | 0,56 | 1,00 |

Ainsi le volant G (20,3 cm) tournant à une basse vitesse peut fournir la même énergie initiale que le volant M (15,2 cm) tournant à une vitesse 1,78 fois plus élevée ou le volant P (12,7 cm) tournant à une vitesse 2,56 fois plus élevée.

Dans le montage utilisé, l'énergie est emmagasinée dans le volant ainsi que dans les pièces mécaniques utilisées pour joindre le volant à la scie à chaîne. La valeur de l'inertie pour ces pièces peut être calculée à partir des données des fabricants de ces pièces, lorsque les valeurs sont disponibles.

Dans les essais réalisés, l'énergie est calculée à partir du couple et de la vitesse instantanée. Ces deux variables sont enregistrées en temps réel. L'énergie absorbée par le matériau coupé par la scie à chaîne est donnée par l'équation suivante:

$$E_m = \int_0^{t_c} T \cdot \omega \, dt \qquad (2.3)$$

où $T$ est le couple enregistré pendant la coupure du matériau, $\omega$ est la vitesse angulaire et $E_m$ représente l'énergie cumulée pendant le temps considéré $t_c$. L'énergie est exprimée en joules (J). Un calcul similaire s'applique pour l'évaluation de l'énergie initiale mesurée lors d'un essai de freinage, $E_f$ (éq. 2.4), i.e. lors d'essais où la chaîne ne coupe aucun échantillon et où un frein est appliqué sur l'arbre d'entraînement :

$$E_f = \int_0^{t_f} T \cdot \omega \; dt \qquad (2.4)$$

Dans cette dernière équation, $t_f$ représente le temps de freinage, soit le temps requis pour que le frein puisse immobiliser complètement la chaîne et le volant.

Les valeurs d'énergie calculées en prenant le couple et la vitesse enregistrés (éq. 2.3 et 2.4), correspondent à l'énergie emmagasinée dans le volant (éq. 2.2) et dans les pièces mécaniques pour joindre le volant à la scie, incluant les pertes par frottement dans le système.

## 2.2 ÉNERGIE SPÉCIFIQUE DE COUPURE

Comme il a été mentionné précédemment, des matériaux plus homogènes que ceux des équipements de protection ont été utilisés pour valider la méthode d'essai. A cette fin, des éprouvettes de différentes essences de bois ayant une forme demi-cylindrique ont été retenues (figure 2.1). Pour l'utilisation de ces matériaux, deux facteurs de correction pouvant s'appliquer à la mesure de l'énergie de coupure ont été considérés, 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.

### 2.2.1 FACTEUR DE CORRECTION POUR LA GÉOMÉTRIE DES ÉPROUVETTES

Pour tenir compte de l'effet de la géométrie des éprouvettes, l'énergie de coupure ($E_m$) a été évaluée de façon unitaire, par rapport à la surface de la section droite coupée ($A_d$).

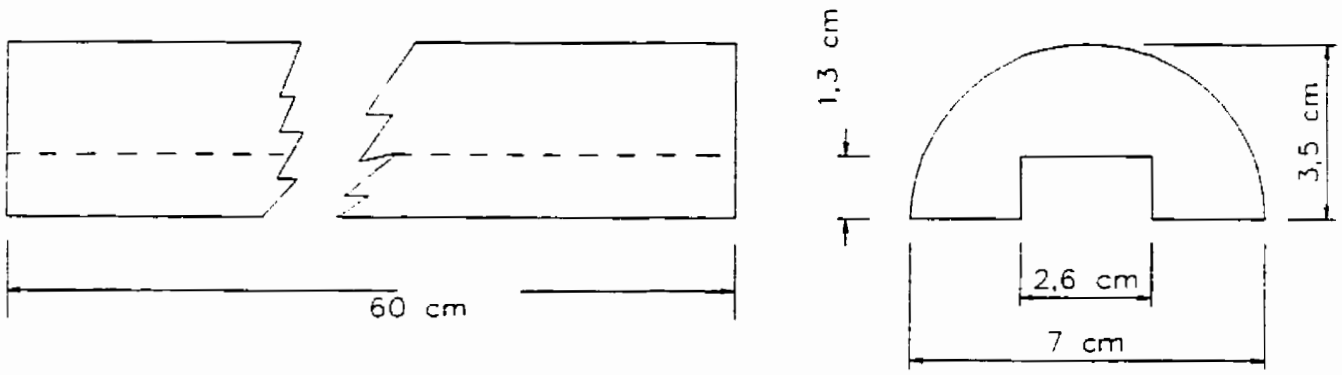



**Figure 2.1** Géométrie des éprouvettes

Les unités utilisées dans ce cas-ci sont les J/cm$^2$. Les éprouvettes évaluées dans les essais sont fabriquées à partir d'un cylindre de bois coupé en deux, suivant l'axe longitudinal. Lors de la coupe, il est possible qu'il y ait une légère excentricité $e$ par rapport au centre du cylindre (figure 2.2). 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 2.2. L'annexe A 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. L'énergie par unité de surface coupée, $E_s$, s'exprime comme suit:

$$E_s = \frac{E_m}{A_d} \tag{2.5}$$

2.2.2 FACTEUR DE CORRECTION POUR LA DURETÉ DES ÉPROUVETTES

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

Pour cela, une dizaine d'essais de pénétration ont été réalisés 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 2.3). Un appareil d'essai de traction-compression 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 lbf) avec une précision de 0,1%. Le critère de dureté retenu correspond à 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 de l'éprouvette $k$, soit $ep_k$, par rapport à l'ensemble des $n$ éprouvettes d'un même type de bois, la valeur de l'énergie $E_m$, mesurée pendant l'essai de coupure de l'éprouvette $k$ a été multipliée par un facteur adimensionnel $f_k$, caractérisant la dureté de l'éprouvette considérée par rapport à la moyenne échantillonale. Ainsi, l'énergie corrigée pour la dureté de l'éprouvette $k$, est:

$$E_d = E_m \times f_k$$

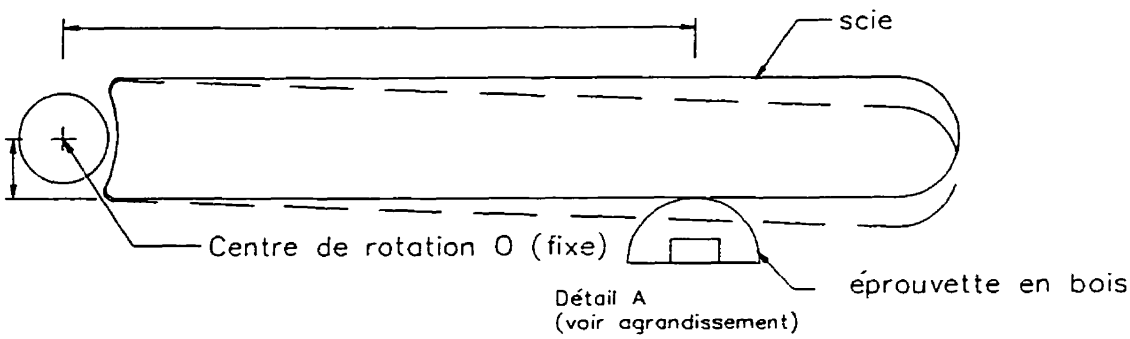
$$E_d = E_m \times \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ F_{3mm} \right]_{ep_i}}{\left[ F_{3mm} \right]_{ep_k}} \qquad (2.6)$$

Le terme du numérateur représente la moyenne de l'échantillonnage des éprouvettes de même type de bois. Le terme du dénominateur représente la force moyenne évaluée à 3 mm de pénétration dans l'éprouvette de bois $k$ considérée. Finalement, l'énergie spécifique corrigée pour la dureté et la géométrie, $E_{d,s}$, est:

$$E_{d,s} = E_s \times f_k$$

$$E_{d,s} = \frac{E_m}{A_d} \times \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ F_{3mm} \right]_{ep_i}}{\left[ F_{3mm} \right]_{ep_k}} \qquad (2.7)$$

La valeur de $E_{d,s}$ est exprimée en J/cm$^2$.



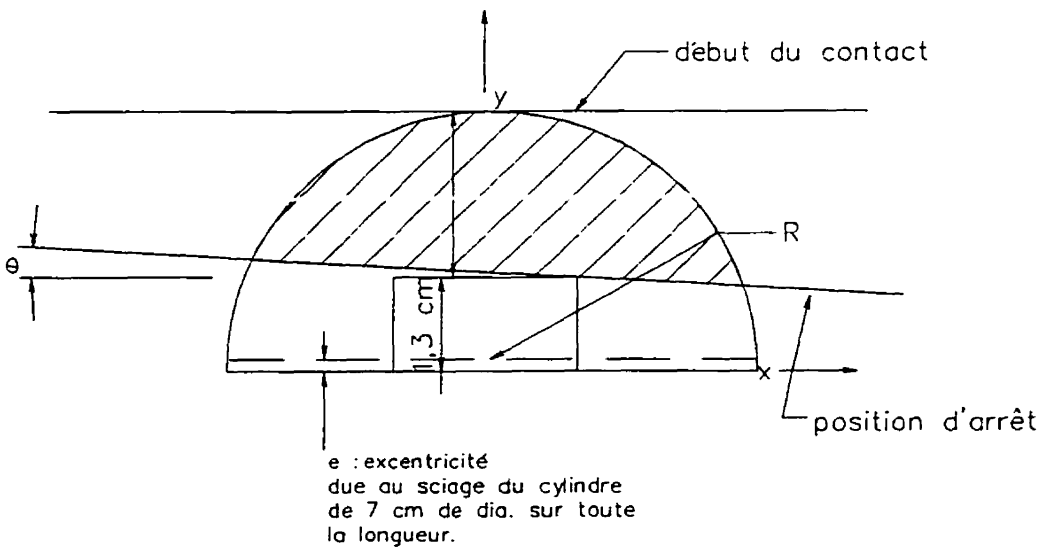




**Figure 2.2** Coupe d'un échantillon a) position de l'échantillon par rapport à la scie b) aire de la section coupée

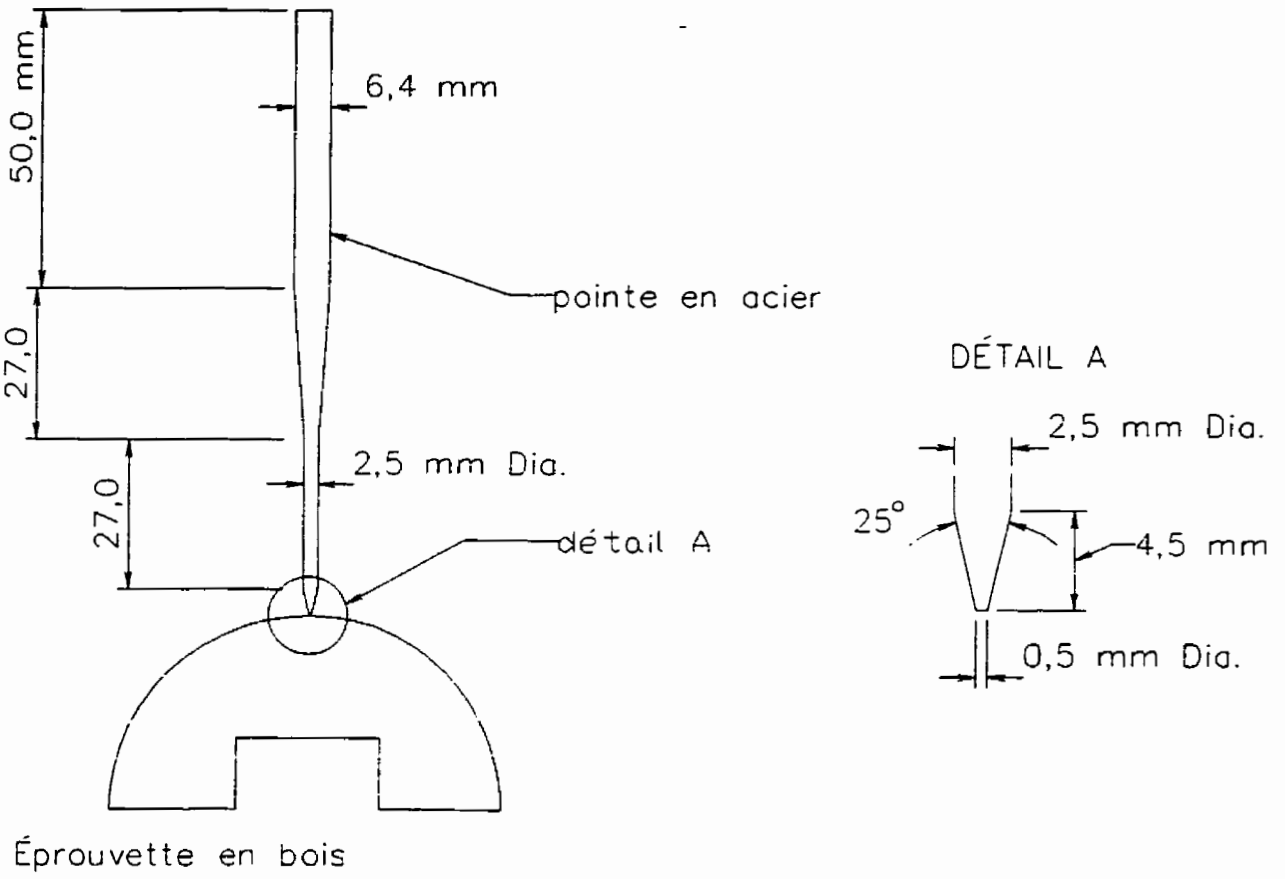



**Figure 2.3** Géométrie de l'indenteur pour l'essai de dureté a) vue d'ensemble b) détail de la pointe de l'indenteur

# CHAPITRE 3

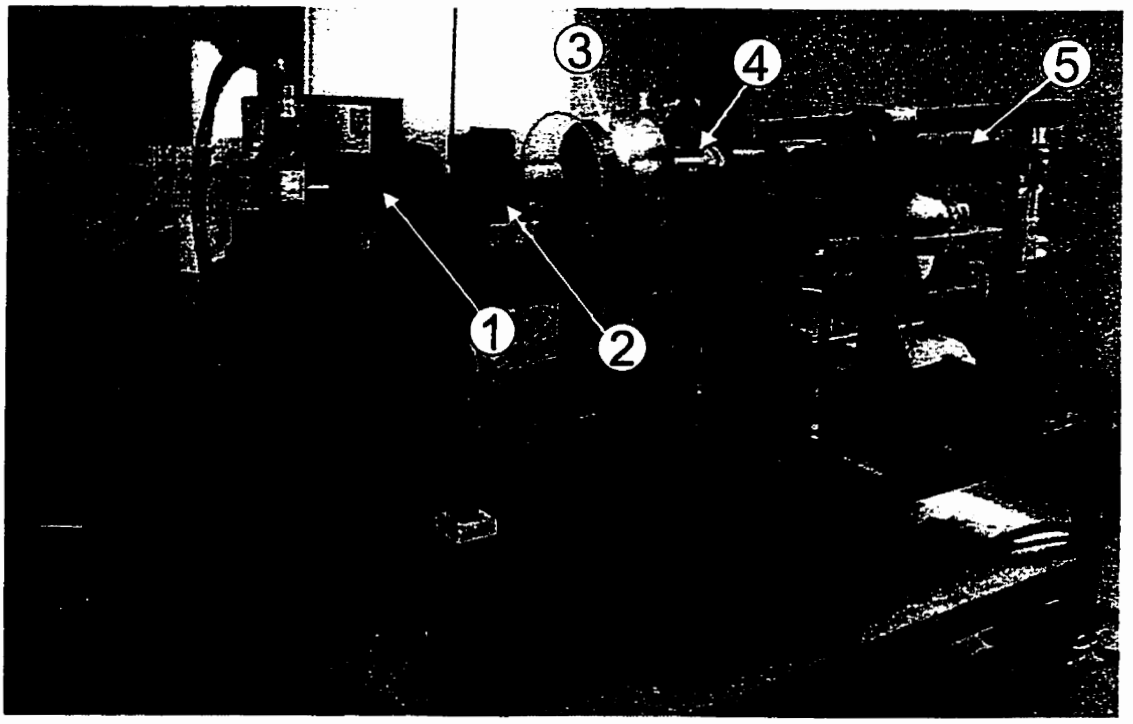
# PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Le banc d'essai est composé essentiellement de 4 parties qui sont détaillées dans les quatre premières sections de ce chapitre; ce sont 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. Dans la cinquième section, nous verrons quels sont les paramètres d'essais contrôlés. Finalement, la dernière section montre comment la mesure du temps d'arrêt à vide ($t_v$) permet de s'assurer du bon fonctionnement du banc d'essai.

## 3.1 SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT DE LA CHAÎNE

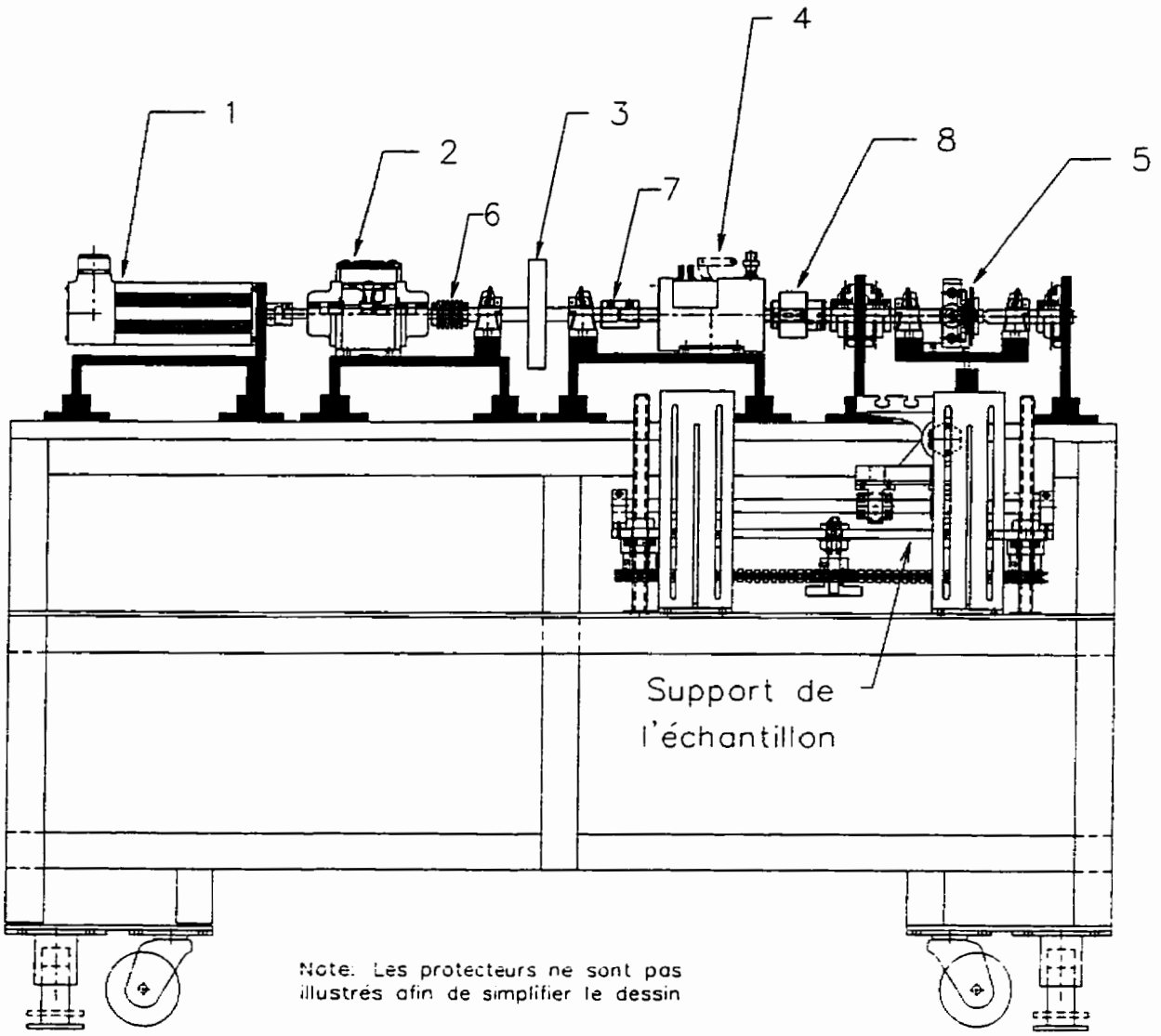
La photographie du montage (figure 3.1), de même que le schéma du banc d'essai représenté à la figure 3.2, montre les différentes composantes du système d'entraînement. Ces figures illustrent, de gauche à droite, le moteur (*1*) à vitesse variable (moteur DC de type servo), l'unité frein et embrayage (*2*), le volant d'inertie (*3*), l'appareil de mesure du couple (*4*), et finalement la scie à chaîne (*5*). La précision de montage de ces pièces est essentielle pour obtenir des vitesses de rotation de plus de 840 rad/s 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, laissant le volant agir comme réservoir




1. moteur
2. unité frein et embrayage
3. volant
4. mesureur de couple
5. scie à chaîne

**Figure 3.1** Vue d'ensemble du montage expérimental




1. moteur
2. unité frein et embrayage
3. volant
4. mesureur de couple
5. scie à chaîne (vue de face)
6. joint d'accouplement
7. joint d'accouplement
8. accouplement de protection

**Figure 3.2** Banc d'essai

d'énergie.

Le volant d'inertie consiste en un disque d'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 en acier de 12,7 cm, 15,2 cm et 20,3 cm de diamètre (2,54 cm d'épaisseur) ont été fabriqués pour pouvoir varier le niveau d'énergie disponible initialement pour une même vitesse initiale d'essai. Ces volants sont identifiés par P, M et G, respectivement à leur diamètre (Petit, Moyen et Grand). L'arrangement mécanique permet d'interchanger facilement les volants grâce à deux joints d'accouplements amovibles (pièces *6* et *7*, figure 3.2). Les volants ont tous été balancés à la fabrication pour minimiser les effets des vibrations.

L'utilisation d'un accouplement de protection (pièce *8*, figure 3.2) entre le mesureur de couple et le pignon d'entraînement permet le débrayage mécanique lorsque le couple agissant sur l'arbre dépasse une valeur prédéterminée, prévenant ainsi tout dommage à l'appareil de mesure.

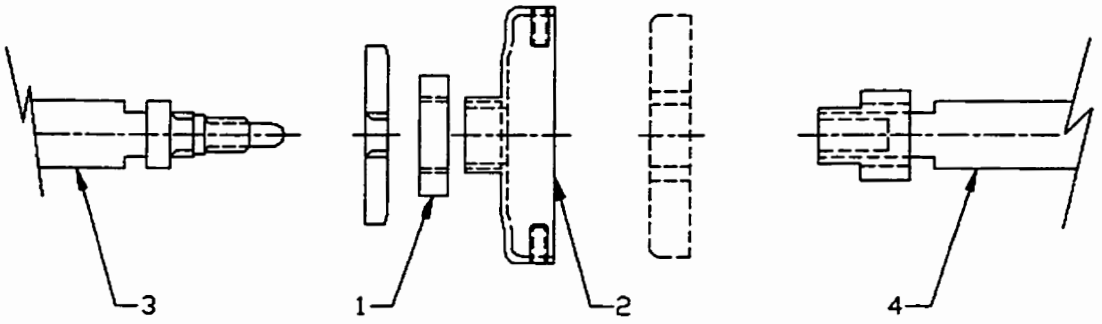
Le pignon d'entraînement (pièce *1*, figure 3.3a) de la chaîne (modèle 7T Oregon) est glissé librement sur la partie mâle de la coupole d'embrayage centrifuge (pièce 2, figure 3.3a), comme sur une vraie scie à chaîne. La partie femelle de la coupole de l'embrayage centrifuge est fixée sur l'arbre d'entraînement. On a donc un système à entraînement direct de la chaîne. Cet arrangement permet l'auto-alignement continuel

de la chaîne à toutes les vitesses. Ce système 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; l'une des sections a une partie qui se visse dans l'autre (pièces *3* et *4*, figure 3.3a). Cet arrangement permet l'entretien et le changement de la chaîne et du guide-lame. La figure 3.3b illustre comment les deux roulements à billes (pièce *5*) permettent la rotation du plateau (pièce *6*) 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 en entraînant la scie vers l'échantillon à couper et à évaluer.

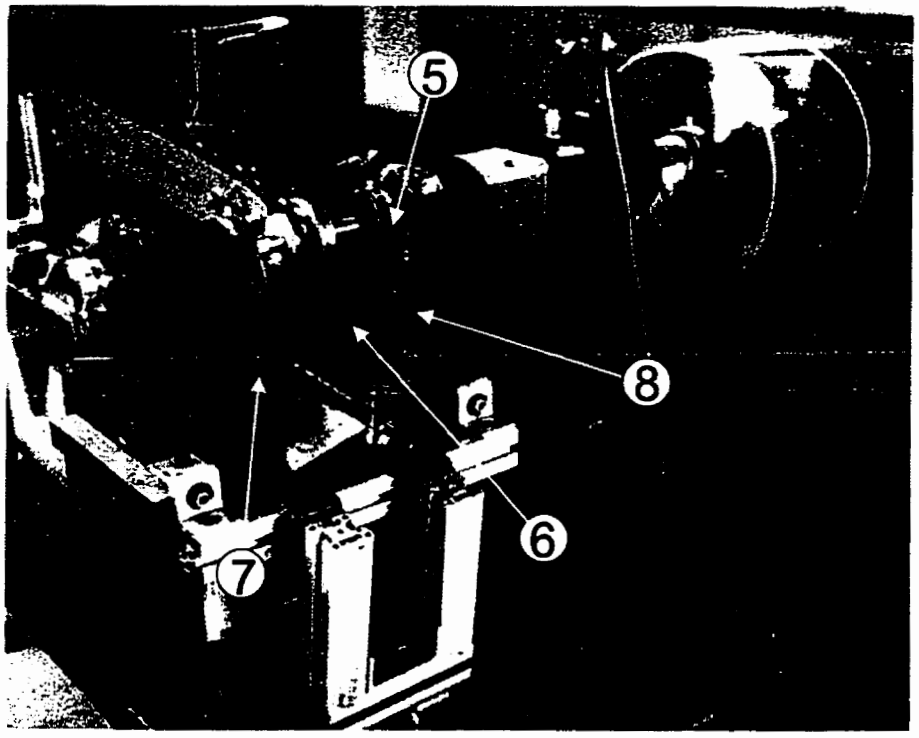
Le déplacement d'un poids (pièce *7*, figure 3.3b) fixé sous ce plateau permet d'ajuster la charge que le guide-lame applique sur l'échantillon. De plus, un mécanisme à gâchette (pièce *8*, figure 3.3b) permet de maintenir le plateau légèrement incliné (6° par rapport à l'horizontale) pour assurer une chute de 3,2 cm entre la chaîne et l'échantillon, à l'endroit spécifié. La gâchette qui libère le plateau est actionnée par un solénoïde lorsque la vitesse d'essai désirée est atteinte.

Le type de chaîne utilisée 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




a) Schéma d'assemblage des pièces

1. pignon d'entraînement
2. coupole d'embrayage centrifuge
3. arbre d'entraînement (partie mâle)
4. arbre d'entraînement (partie femelle)




b) vue d'ensemble

5. roulements à billes
6. plateau
7. poids
8. gâchette

**Figure 3.3** Système d'entraînement de la chaîne a)schéma d'assemblage des pièces b)vue d'ensemble

lame Oregon de 40,6 cm.

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 très exigeants.

Le guide-lame est maintenu par deux supports, fixés sur un plateau (pièce *1*, figure 3.4). Intégré à même ces supports, un mécanisme à vis (*2*) permet d'ajuster la tension dans la chaîne en éloignant ou en rapprochant 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 par deux boulons, comme sur une scie à chaîne à essence.

## 3.2 SYSTÈME DE CONTRÔLE

Le système de contrôle permet de régler la vitesse du moteur pour l'essai, d'enclencher ou non le mécanisme d'embrayage et de relâcher la gâchette de retenue du plateau de support du guide-lame. Il règle également le débit 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.

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 durée totale de réchauffement, les différentes vitesses de fonctionnement et leur temps d'application respectif, l'accélération pour passer d'une vitesse à l'autre et les périodes de huilage de la chaîne. Cela permet de répéter le même processus de réchauffement d'une fois à l'autre.

Le système de contrôle assure aussi la sécurité par un mécanisme d'inter-verrouillage de la garde mobile située au-dessus du guide-lame. Ce mécanisme empêche le démarrage du système d'entraînement de la chaîne, si la garde n'est pas en position au-dessus du guide-lame.

## 3.3 SYSTÈME D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES

Ce système est composé d'une unité de conditionnement des signaux (Vishay Measurement 2000), d'un ordinateur compatible IBM et d'une carte d'acquisition TEAM490. La fréquence d'échantillonnage est de 5 kHz (5000 enregistrements/s pour chaque variable). Cependant, lors des essais à vide, la fréquence d'échantillonnage est fixée à 1 kHz. Les données suivantes sont enregistrées en continu pendant l'essai:

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

La figure 3.5 présente un exemple d'enregistrement de ces données réalisé pendant un

essai typique et l'annexe B apporte quelques précisions sur le couple enregistré.

La durée de l'essai, ou temps de traversée lorsqu'il y a lieu, correspond au temps écoulé pour couper l'échantillon de part en part. Deux bandes de papier d'aluminium, l'une collée sur le dessus de l'échantillon et l'autre en dessous, permettent de détecter le contact de la scie par le passage du potentiel électrique de 0 à 5 V et de nouveau à zéro. Le chronomètre est déclenché par le contact de la scie à chaîne avec l'échantillon à évaluer, et il est arrêté par le contact de la scie à chaîne avec la face inférieure du matériau à évaluer. La précision du système de détection de contact est de $\pm$ 2 $\mu$s.

Un capteur de rotation, pour mesurer la vitesse angulaire, est intégré au mesureur de couple; il possède une résolution de 6°(0,1 rad).

Les données pour le couple sont enregistrées par un capteur de couple à bague tournante (Lebow 1104-200), opérant dans la plage de mesure de 0 à 20 N·m (0 à 200 lbf·po) pour des vitesses de 0 à 950 rad/s (0 à 9000 tours/min), avec une sensibilité de $\pm$0,1%.

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

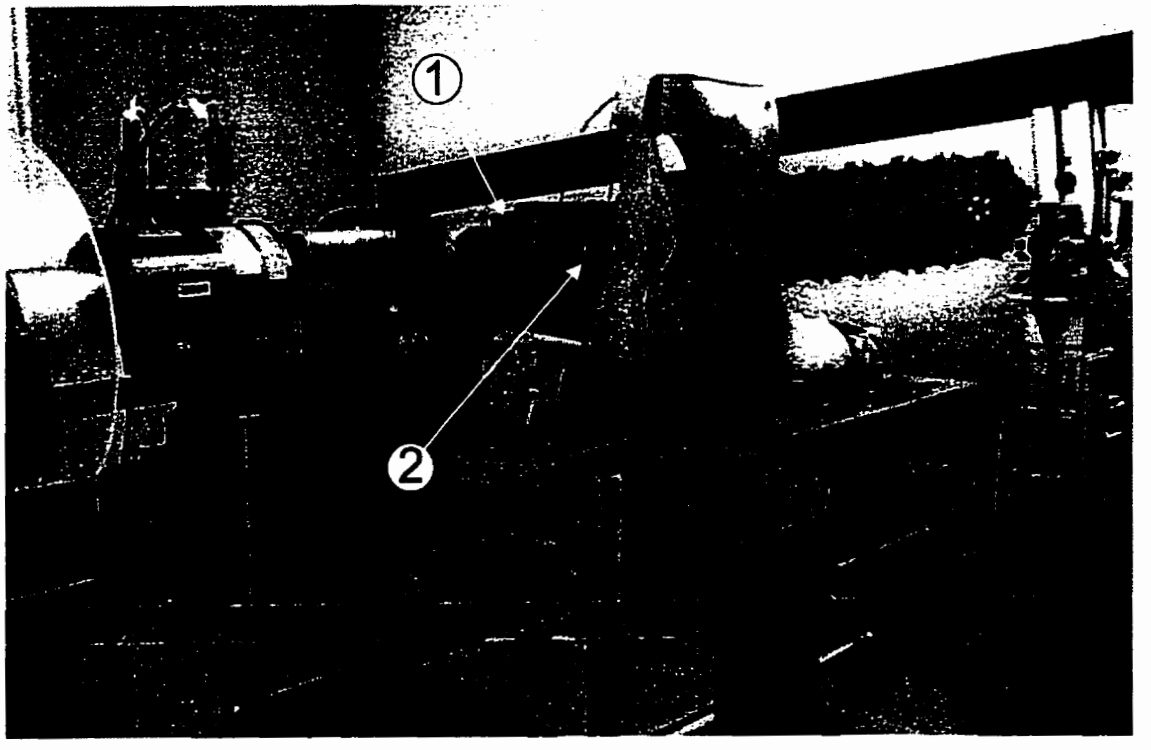
- le temps de traversée;
- la vitesse au moment du contact entre la scie à chaîne et l'échantillon;
- la vitesse finale de la chaîne à l'instant où l'échantillon est coupé;

- la puissance instantanée;
- l'énergie cumulée pendant la durée de la coupure;
- la valeur maximum du couple pendant la coupure.

## 3.4 SUPPORT D'ÉCHANTILLON

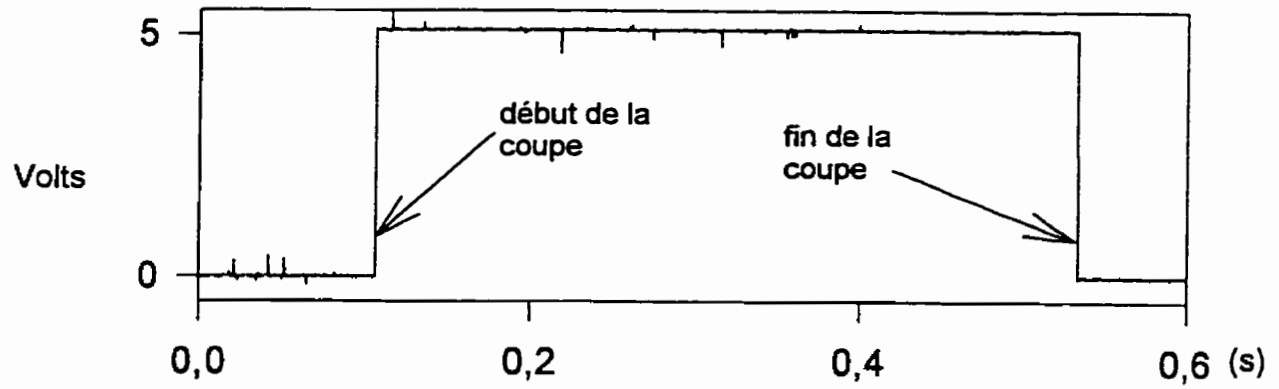
Le support d'échantillon sert à maintenir en place l'échantillon à évaluer lors de l'essai. Sa flexibilité permet de placer l'échantillon selon différentes positions de façon à pouvoir le couper à différents endroits. Des éprouvettes de bois de forme demi-cylindrique, des échantillons en caoutchouc, ainsi que des bottes ont été testés. Deux plateaux ont été conçus pour maintenir solidement chaque type d'éprouvette. Les éprouvettes de bois sont retenues par deux blocs en forme de "U" inversé, placés de part et d'autre de la scie à chaîne (figure 3.6). Le même système permet de maintenir les échantillons de caoutchouc qui, en plus, sont collés sur les éprouvettes de bois avec du ruban gommé.

Dans le cas des bottes 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 (figure 3.4). Il est possible d'évaluer des bottes de pointure 8 à 13 et de pied gauche ou droit. Dans la présente série d'essais, deux endroits sont retenus, à savoir, sur le pied de la botte, à 1 cm de l'embout de protection, et sur la tige de la botte, à 15 cm de la semelle du talon (figure 3.7). La botte est maintenue en place par une fixation de bottine de ski.

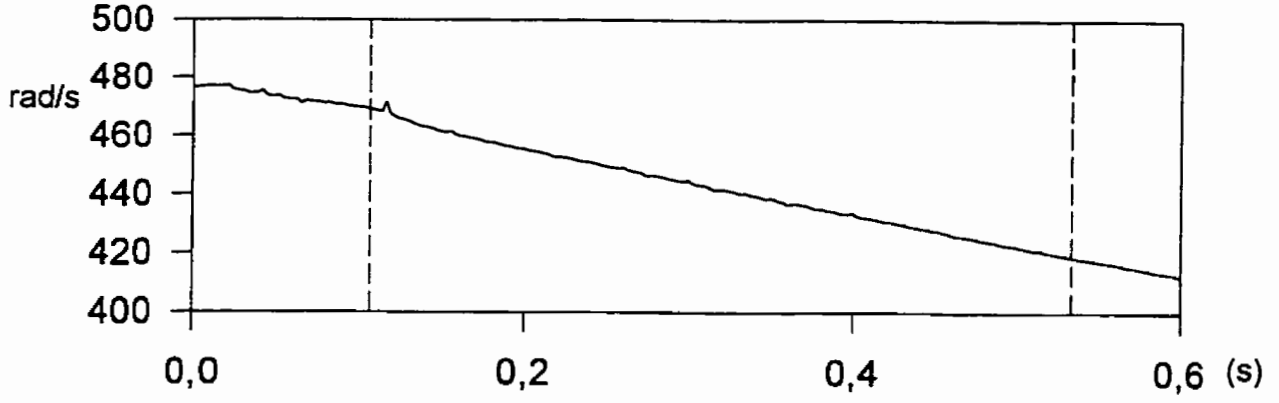



1. supports de retenue du guide-lame
2. mécanisme d'ajustement de la tension

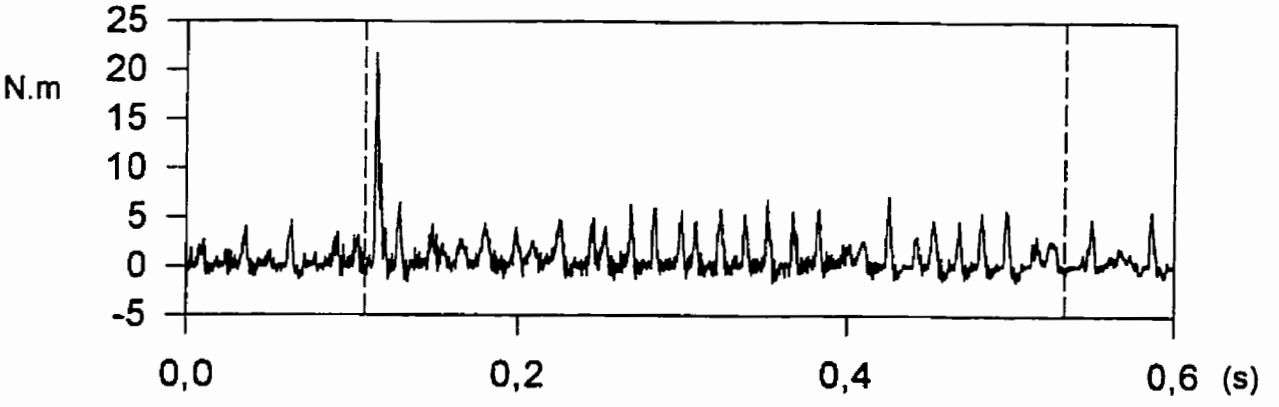
**Figure 3.4** Vue rapprochée du support de l'échantillon




a) Durée de l'essai




b) Vitesse




c) Couple

**Figure 3.5** Exemple des données enregistrées pendant un essai a) durée de l'essai b) vitesse c) couple

## 3.5 CONDITIONS D'ESSAIS

Les conditions suivantes sont contrôlées:

- la vitesse de rotation du moteur (0-8000 tours/min);
- la hauteur de chute du guide-lame (3,2 cm);
- la tension initiale dans la chaîne (170 $\pm$ 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 l'échantillon (90°);
- le temps de fonctionnement à vide avant chaque essai (voir l'annexe C).

La conception du banc d'essai permet de changer de volant, en gardant la même précision de montage. De même, lors de l'entretien du banc d'essai, il est possible de retirer certaines pièces et de les réinstaller sur l'axe d'entraînement tout en conservant la précision de montage initiale.

Il est possible d'utiliser différents modèles de chaînes 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 sur des bottes sont présentées à l'annexe D.

## 3.6 FONCTIONNEMENT À VIDE

Pour s'assurer que le banc d'essai présente les mêmes caractéristiques de fonctionnement d'une fois à l'autre, son comportement à vide, i.e. sans contact de la scie à chaîne et des

matériaux, a été étudié. La détermination du temps d'arrêt à vide nous a permis de bien contrôler le banc d'essai, sur une période de mise au point de presqu'un an.

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, soit le temps d'arrêt à vide ($t_v$) est noté. 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.

### 3.6.1 TEMPS D'ARRÊT À VIDE ($t_v$)

Pour les trois volants utilisés (P, M et G), la figure 3.8 montre la variation du temps d'arrêt à vide ($t_v$) en fonction de la vitesse initiale. La dispersion des résultats peut être attribuée principalement à l'état d'échauffement du banc (graisse dans les roulements) et à la tension dans la chaîne.

Afin de quantifier cette dispersion, le coefficient de variation (C.V.) est calculé; ce dernier est défini comme le rapport entre l'écart-type ($\sigma$) et la moyenne ($\mu$) pour l'échantillon considéré. Comme l'indique le tableau 3.1, la valeur maximale du coefficient de variation est de 10% pour les $t_v$ moyens mesurés aux vitesses choisies. Les coefficients de variation du temps d'arrêt à vide, pour les volants G et P, indiquent une

**Figure 3.6** Système de retenue pour les éprouvettes de bois

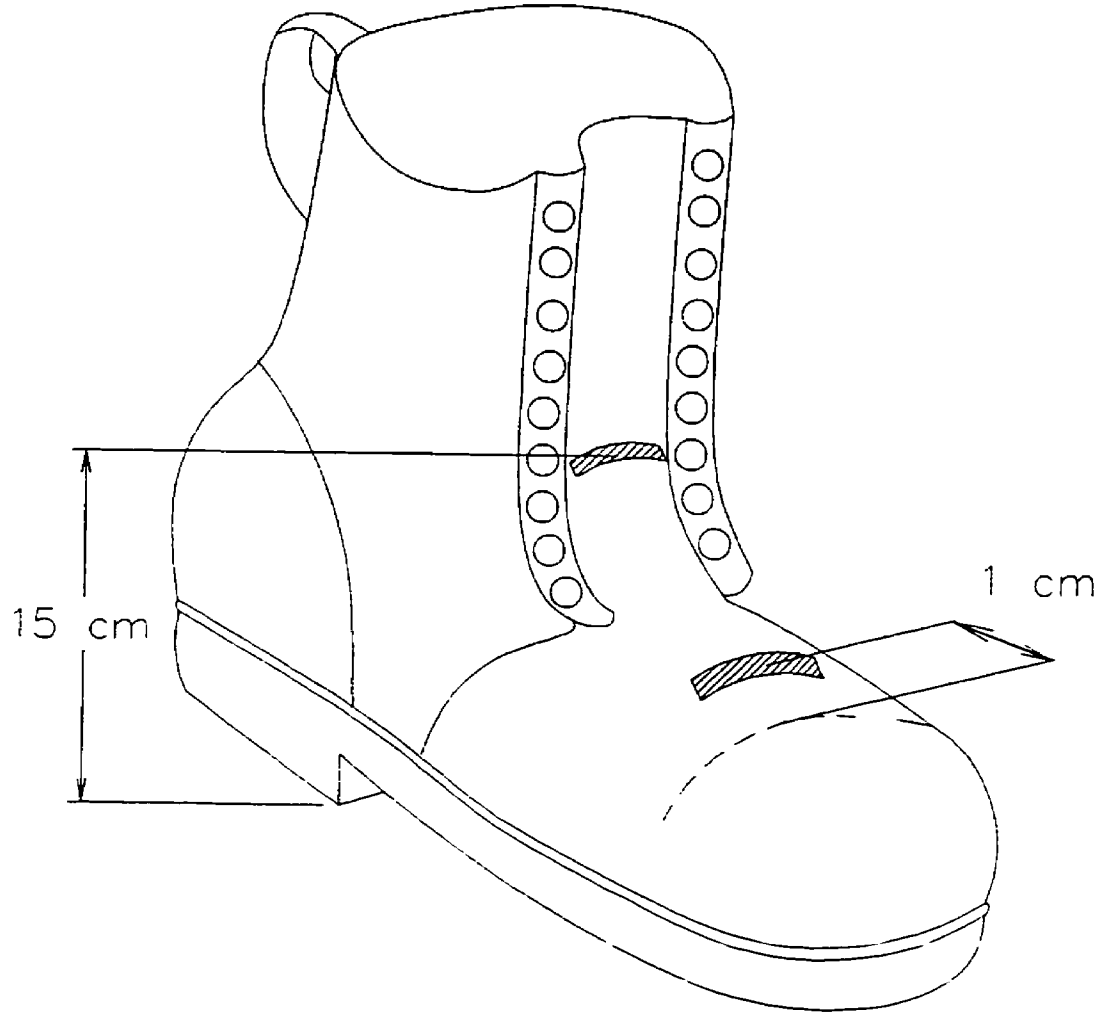



**Figure 3.7** Positions des coupures pour l'évaluation des bottes

plus grande dispersion à faible vitesse (209 rad/s). Toutefois cette dispersion est très acceptable car elle est égale ou inférieure à 10%. Les coefficients de variation du $t_v$ pour le volant M sont identiques ( $\leq$ 2,6%) peu importe la vitesse initiale. En effet, une première série d'essais a amené une modification de l'arbre sur lequel était fixé le volant M, afin d'obtenir une tolérance plus serrée entre l'arbre et les roulements, ce qui a permis de réduire les variations sur les temps d'arrêt à vide. Le faible coefficient de variation (< 10%) du temps d'arrêt à vide indique que les composantes mécaniques du banc d'essai ont un comportement stable dans le temps; les résultats des essais ne seront donc pas influencés par la performance du banc d'essai.

Comme l'indique la figure 3.8, le temps d'arrêt à vide, $t_v$, pour un volant donné, est une fonction linéaire de sa vitesse initiale; donc la pente augmente avec l'inertie du volant utilisé. Pour vérifier s'il est possible d'obtenir une relation indépendante du volant utilisé, le temps d'arrêt à vide est divisé par l'inertie respective de toutes les pièces en rotation, $I_T$ où $I_T = I_v + I_S$; $I_v$ est l'inertie du volant et $I_S$ l'inertie des pièces en rotation, autres que le volant. Le calcul détaillé de ces valeurs est présenté à l'annexe E. Comme le montre la figure 3.9, les droites résultantes de $t_v/I_T$, obtenues par régression linéaire (annexe F) pour chacun des trois volants, ont des pentes différentes et montrent qu'il n'est pas possible de corriger les temps d'arrêt à vide mesurés par l'inertie respective de chacun des volants. Ces différences sont causées par le frottement des pièces en mouvement. Le frottement étant proportionnel à la vitesse, l'effet sera plus important pour le petit volant. Car pour avoir la même énergie initiale que le volant G, le volant

P doit avoir une vitesse 2,56 fois plus élevée (tableau 2.1), il en résulte donc un frottement plus élevé et conséquemment des pertes plus grandes pour le volant P. Le temps d'arrêt à vide, $t_v$, ne peut être normalisé par l'inertie ($t_v/I$) des volants respectifs. Il convient alors d'utiliser le $t_v$ respectif de chaque volant en fonction de la vitesse.

**Tableau 3.1** Coefficient de variation des temps d'arrêt à vide ($t_v$)

| Volant | Vitesse (rad/s) | $t_v$ (s) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $\mu$ (s) | $\sigma$ (s) | C.V. (%) |
| G (20,3 cm) | 209 | 12,6 | 1,3 | 10,7 |
| | 367 | 19,9 | 1,0 | 5,1 |
| | 524 | 27,2 | 1,9 | 7,0 |
| M (15,2 cm) | 209 | 5,3 | 0,1 | 1,8 |
| | 314 | 7,6 | 0,2 | 2,6 |
| | 524 | 11,6 | 0,2 | 1,8 |
| P (12,7 cm) | 209 | 2,8 | 0,2 | 7,1 |
| | 419 | 4,8 | 0,2 | 4,2 |
| | 628 | 6,4 | 0,2 | 3,1 |

Finalement, la figure 3.10 montre que la mesure du temps d'arrêt à vide permet d'évaluer rapidement la condition d'échauffement du banc d'essai. Il suffit de comparer le temps d'arrêt à vide obtenu à une vitesse donnée, avec la valeur correspondante du $t_v$ à cette même vitesse (figure 3.10), et de vérifier que le $t_v$ est compris dans l'intervalle des valeurs prévues, 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. 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.

### 3.6.2 ÉNERGIE INITIALE POUR LES ESSAIS DE COUPURE

Avant de mesurer l'énergie nécessaire pour couper un échantillon, une vérification de la méthode de mesure s'impose. L'évaluation de l'énergie de coupure ($E_m$), est basée sur la mesure du couple agissant sur l'arbre d'entraînement de la chaîne, tel que mentionné à la section 2.1. La vérification du principe de mesure est effectuée en comparant le niveau d'énergie initiale, à une vitesse donnée, calculé théoriquement d'après la vitesse et l'inertie du système (éq. 2.2), et l'énergie mesurée en appliquant un système de freinage sur l'arbre d'entraînement. Le système de freinage utilisé dans ces essais permet un taux de réduction constant de la vitesse (figure 3.11a), de même qu'un couple de freinage assez constant (figure 3.11b) jusqu'à l'arrêt du volant. Le système de freinage agit uniquement sur l'arbre d'entraînement. Le tableau 3.2 présente les valeurs théoriques de l'énergie initiale ($E_i$), calculées d'après l'équation 2.2, et les valeurs mesurées de l'énergie nécessaire au freinage du volant ($E_f$).

Les résultats présentés au tableau 3.2 montrent que la méthode basée sur le couple et la vitesse pour mesurer l'énergie dissipée fonctionne bien. En effet, les valeurs mesurées de l'énergie de freinage se rapprochent des valeurs calculées de l'énergie initiale. Les

différences entre ces deux variables augmentent avec la vitesse et cela est attribuable au système de freinage utilisé. Il a été observé qu'à grande vitesse, le système de freinage est moins stable. La vitesse d'essai recommandée pour réaliser les essais de freinage avec le système utilisé doit être comprise dans la plage de 200 à 400 rad/s. La différence entre $E_i$ et $E_f$ est alors inférieure à 8%.

**Tableau 3.2** Comparaison de l'énergie initiale théorique et de l'énergie de freinage mesurée avec les différents volants

| Volant | Vitesse initiale ($\omega_i$) (rad/s) | Énergie initiale $E_i = \frac{1}{2} I \omega_i^2$ (J) | Énergie de freinage ($E_f$) (J) | différence (%) |
|---|---|---|---|---|
| P | 210 | 140 | 133 | 5,0 |
| | 314 | 314 | 286 | 8,9 |
| | 418 | 558 | 513 | 8,1 |
| | 514 | 842 | 752 | 10,7 |
| | 626 | 1251 | 1110 | 11,3 |
| M | 314 | 583 | 541 | 7,2 |
| | 419 | 1038 | 960 | 7,5 |
| | 524 | 1622 | 1482 | 8,6 |
| | 629 | 2338 | 2113 | 9,6 |
| G | 206 | 707 | 706 | 0,1 |
| | 359 | 2144 | 2074 | 3,3 |
| | 525 | 4588 | 4340 | 8,0 |

En plus de la méthode précédente pour évaluer l'énergie initiale disponible pour la

coupure d'un échantillon, des essais ont montré que la méthode consistant à laisser tourner librement la scie à chaîne jusqu'à l'arrêt ne peut être recommandée pour la mesure de l'énergie initiale. Le tableau 3.3 présente les résultats obtenus avec cette méthode. Les écarts de 50% entre la valeur théorique de l'énergie initiale et la valeur mesurée de l'énergie, confirme l'inconvénient de cette approche pour le calcul de l'énergie. Cet écart important est dû à la sensibilité du mesureur de couple. Dans ce type d'essai à vide, seul le frottement agit et le couple induit par le frottement est faible. La sensibilité du mesureur de couple étant proportionnelle à sa plage de mesure, il faut retenir une plage acceptable pour les essais de coupure sur les différents échantillons, et donc diminuer sa sensibilité par le fait même. La sensibilité de l'appareil sera cependant suffisante dans les essais effectués sur les différents matériaux, car les valeurs de couple mesurées sont importantes (jusqu'à 98% de la plage de mesure de l'appareil).

**Tableau 3.3** Écart entre l'énergie initiale évaluée théoriquement et l'énergie à vide mesurée

| Volant | Vitesse (rad/s) | $E_v$ (J) | $E_i$ (J) | $(E_i-E_v)/E_i$ (%) |
|---|---|---|---|---|
| G (20,3 cm) | 209 | 391 | 724 | 46 |
| | 367 | 1 190 | 2242 | 47 |
| | 524 | 2 380 | 4570 | 48 |

Le système de freinage utilisé a confirmé la validité de la méthode basée sur le couple et la vitesse pour mesurer l'énergie transmise du volant au à la chaîne.

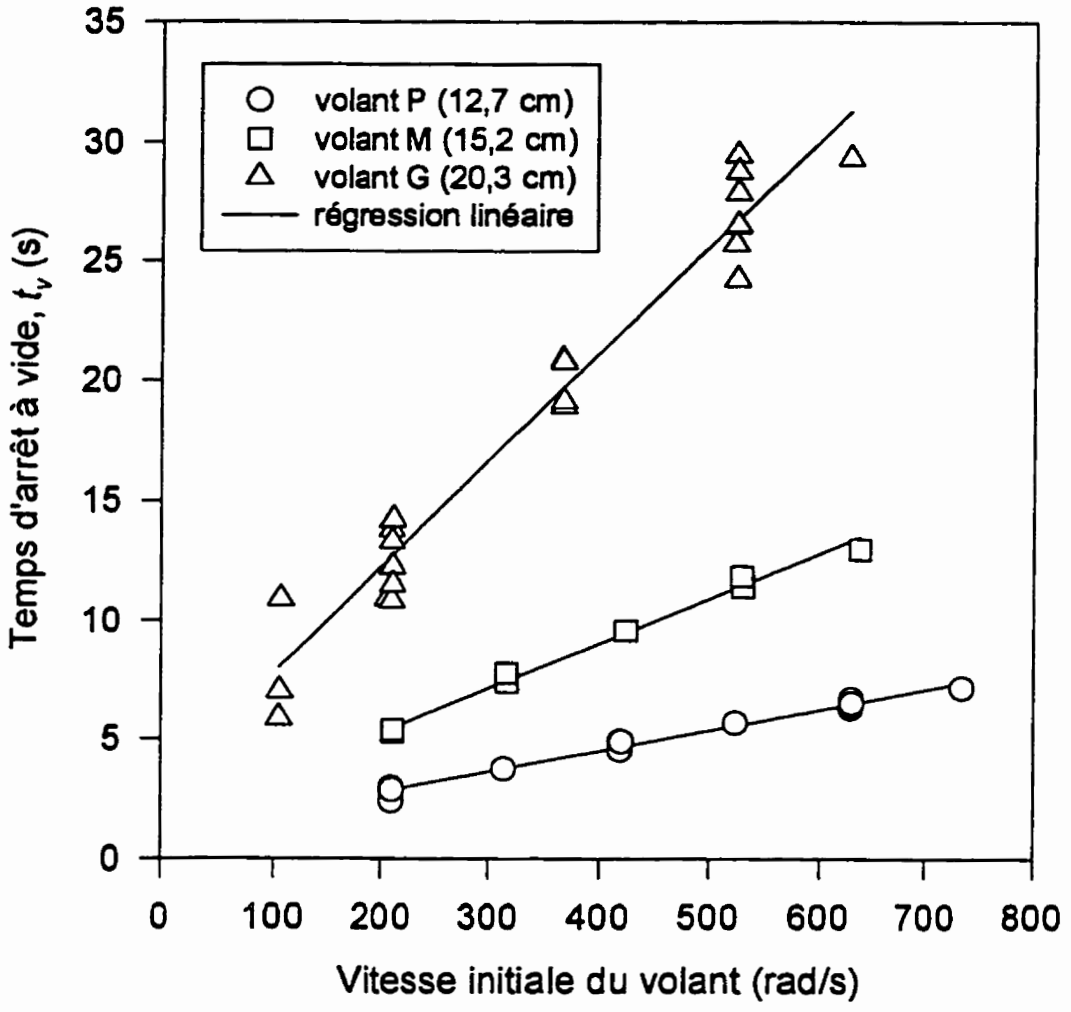



**Figure 3.8** Temps d'arrêt à vide en fonction de la vitesse initiale d'essai pour les trois volants considérés

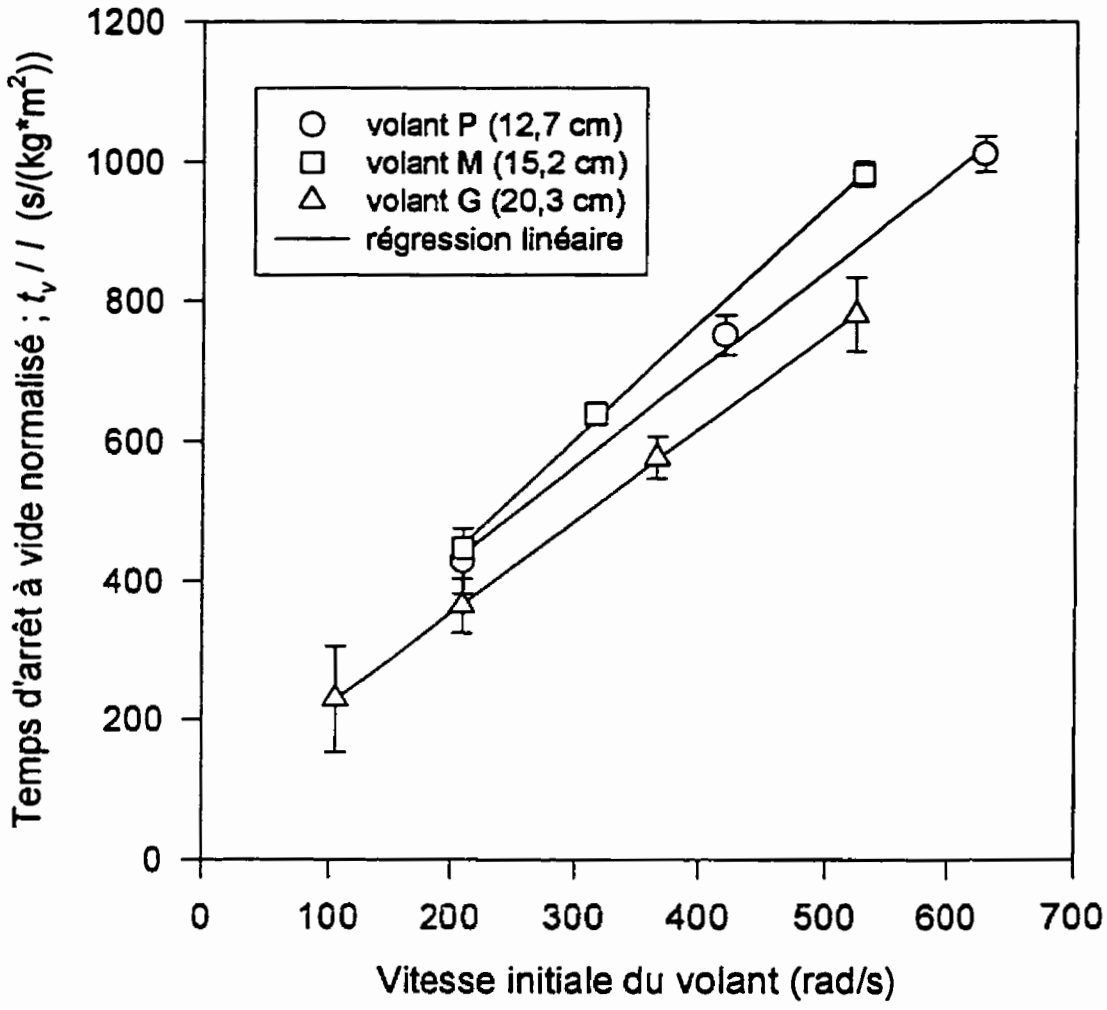



**Figure 3.9** Variation du temps d'arrêt à vide normalisé en fonction de la vitesse initiale du volant

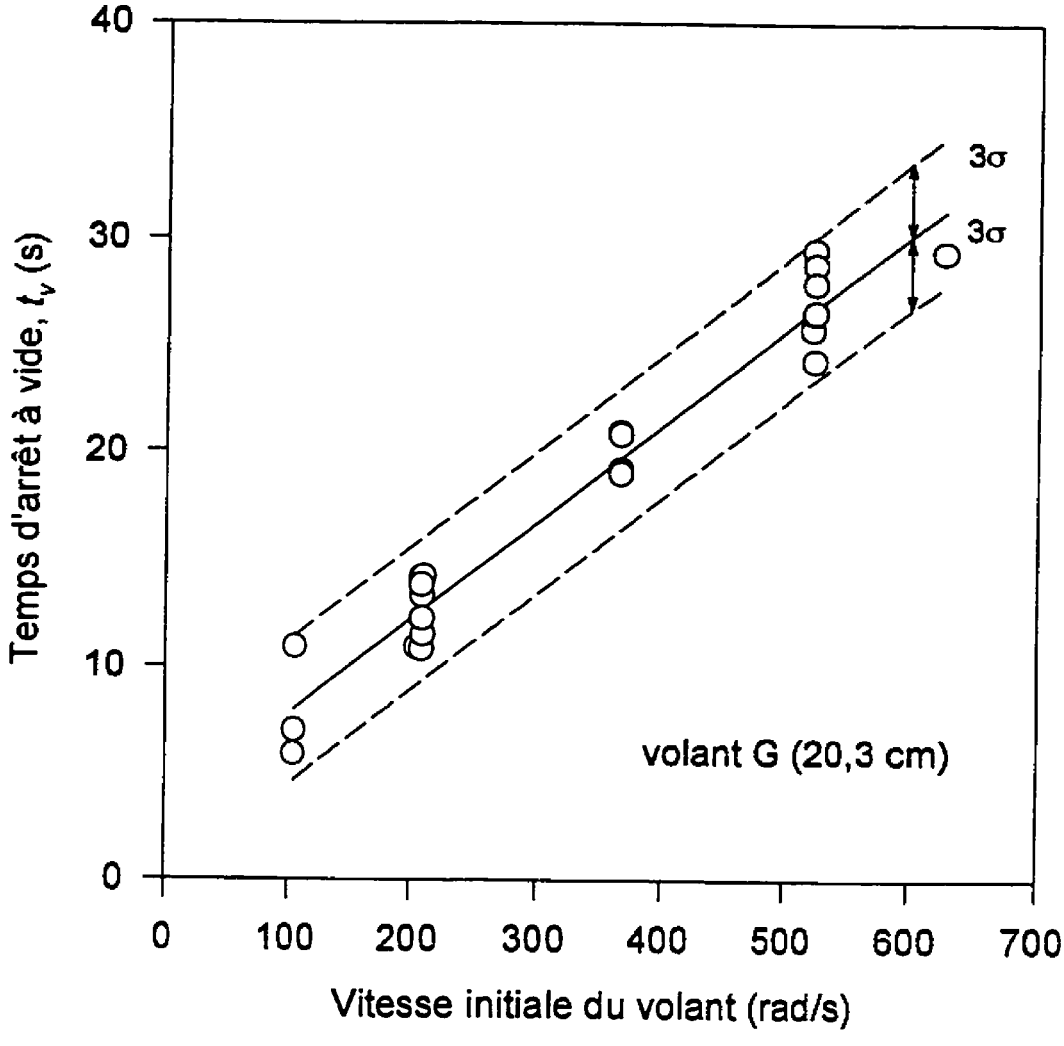



**Figure 3.10** Dispersion du temps d'arrêt à vide en fonction de la vitesse initiale de l'essai

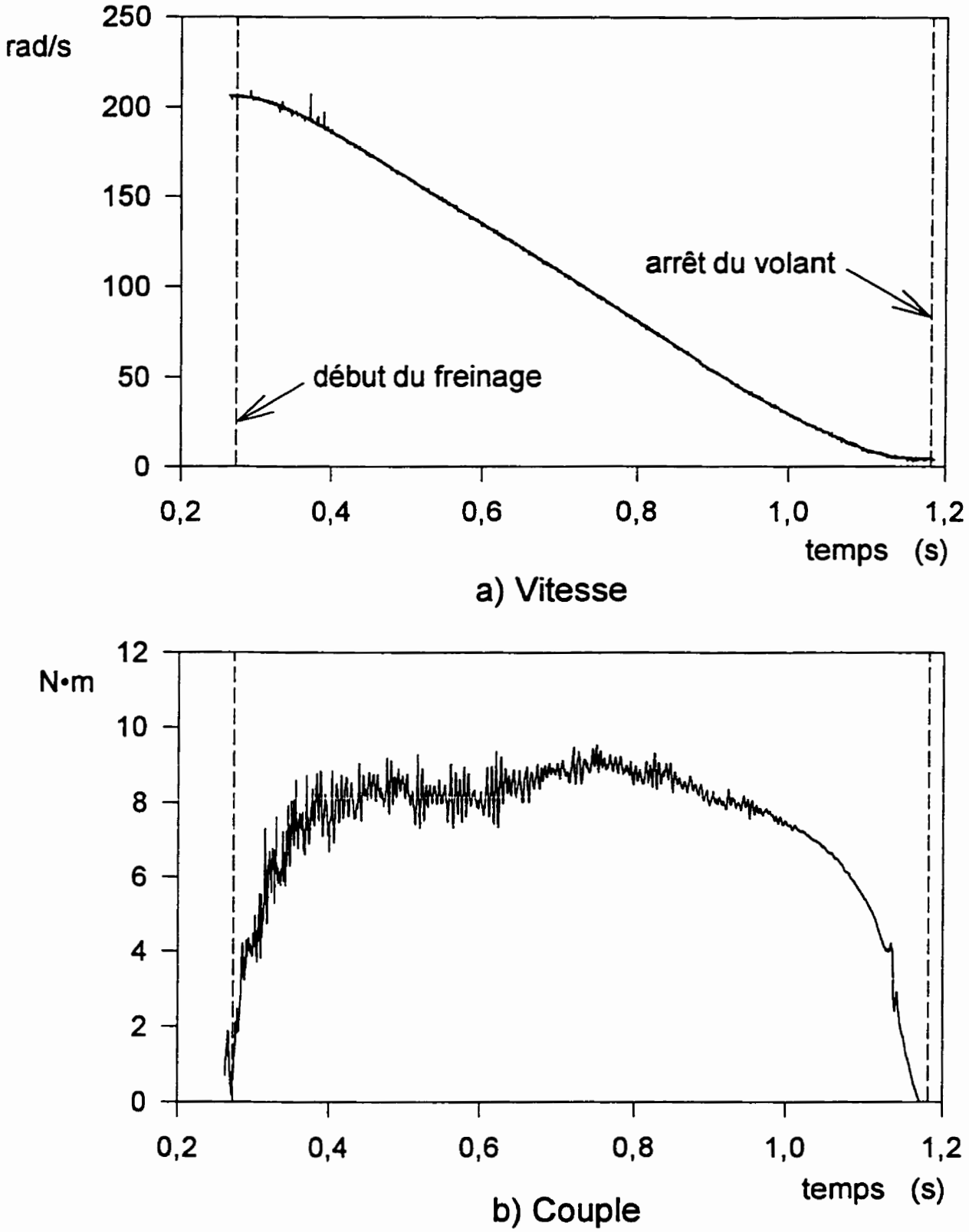



**Figure 3.11** Application d'un frein au système d'entraînement de la chaîne a) vitesse b) couple

# CHAPITRE 4

# RÉSULTATS ET ANALYSE

Les résultats obtenus avec la méthode développée dans ce projet de recherche devront permettre de classer les échantillons évalués en termes de performance contre une scie à chaîne. Pour en arriver à ce constat, les résultats expérimentaux doivent être répétitifs. C'est pourquoi la dispersion des valeurs mesurées sera évaluée statistiquement.

Dans la première section, le temps de traversée ($t_c$) et l'énergie nécessaire ($E_m$) pour couper des éprouvettes de bois seront analysés en fonction de la vitesse initiale de l'essai. Dans la deuxième section, des essais réalisés sur des caoutchoucs permettront également d'étudier le comportement des paramètres $t_c$ et $E_m$ et de comparer l'énergie par unité de surface de section droite coupée, $E_s$ (énergie spécifique de coupure), avec celle calculée pour le bois. Finalement, les résultats de quelques essais sur des bottes de protection seront présentés pour illustrer l'application pratique de la méthode. L'analyse des données enregistrées permettra en premier lieu de valider la méthode d'essai, i.e. de démontrer que les résultats obtenus sont répétitifs et représentatifs du phénomène étudié, pour des conditions d'essai identiques (matériau, vitesse, volant).

Pour la phase de validation, les matériaux ont été choisis et les conditions d'essai ont été fixées pour établir le comportement du banc en fonction de différentes variables d'essai. Trois volants d'inertie, de diamètres différents (G, M et P), ont été utilisés comme

source de transfert d'énergie en imposant au moins trois vitesses d'essai différentes pour chaque volant. Les essais sur l'érable et les bottines de protection ont été réalisés suivant une gamme plus restreinte des conditions d'essai. Pour chaque condition d'essai ainsi établie, une série de plus de 7 essais identiques a été effectuée. Le tableau 4.1 résume la séquence d'essais réalisée.

**Tableau 4.1** Matériaux et conditions d'essais

| Volant | Matériau | | Vitesse initiale d'essai ( × 100 rad/s) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 2,6 | 3,7 | 4,2 | 4,7 | 5,2 | 5,8 | 6,3 |
| G | Bois | pin | X | X | | | X | | X |
| | | érable | | | | | X | | |
| | Caoutchouc | SBR 60 Duro | | X | | X | | X | |
| | | Néoprène | | X | | X | | X | |
| | Bottes | différentes fabrications | | | | | X | | |
| M | Bois | pin | | X | | | X | | X |
| | | érable | | | | | X | | |
| P | Bois | pin | | X | X | | X | | X |
| | | érable | | | | | | | X |

Avec les éprouvettes de pin, des essais supplémentaires ont également été réalisés avec les volants G et M ; dans le cas du volant G, la vitesse initiale d'essai a varié entre 150

rad/s et 650 rad/s, par incrément de 50 rad/s; dans le cas du volant M, la gamme de vitesse s'est étendue entre 250 rad/s et 700 rad/s avec le même incrément que le volant G. Pour chacune de ces vitesses, deux essais ont été effectués.

## 4.1 ESSAIS AVEC LE BOIS

Des essais réalisés sur des éprouvettes de forme identique et prélevés d'un matériau homogène, permettent de valider la mesure de la quantité d'énergie nécessaire pour couper au travers de ce matériau. Dans une première phase, des essais réalisés sur un bois mou (le pin) et un bois dur (l'érable) permettent d'évaluer la performance du banc d'essai pour ces matériaux dans différentes conditions d'essai.

Plusieurs facteurs peuvent affecter les caractéristiques physiques et mécaniques du bois. En effet, le bois est un matériau anisotrope avec une structure fibreuse et l'humidité emmagasinée peut modifier ses caractéristiques. Les éprouvettes utilisées dans les essais ont donc été fabriquées à partir de planches déjà sèches et sont conservées dans des conditions identiques de laboratoire où l'humidité relative se situe autour de 40%.

Dans le présent travail, l'éprouvette est une pièce longue de 60 cm (figure 2.1) sur laquelle une quinzaine d'essais de coupure peuvent être effectués. Une attention toute particulière a été apportée pour éviter de procéder à la coupe près de noeuds qu'on retrouve habituellement dans les éprouvettes de bois. En effet, des essais réalisés dans le voisinage immédiat d'un noeud ont démontré que l'énergie mesurée pouvait doubler

dans cette région comparativement à des mesures en l'absence de noeud. Pour éliminer cet effet de noeud, une zone de 5 cm est dégagée de chaque côté du noeud et les essais sont effectués en dehors de cette zone.

### 4.1.1 INFLUENCE DE LA VITESSE INITIALE D'ESSAI SUR LE TEMPS DE TRAVERSÉE D'UNE ÉPROUVETTE EN PIN

Les résultats rapportés au tableau 4.2 ont confirmé que le temps de traversée ($t_c$) est dépendant de la vitesse initiale d'essai. Ainsi, pour les essais effectués sur les éprouvettes de pin 16 et 17 avec le volant M (15,2 cm), totalisant 33 essais, la figure 4.1 montre la variation du temps de traversée, $t_c$ , en fonction de la vitesse angulaire initiale du volant M, i.e. la vitesse angulaire juste avant le contact entre la scie et l'échantillon. La figure 4.1 montre des résultats similaires avec le volant G (20,3 cm) et pour une plage de vitesses allant de 150 à 700 rad/s (1500 à 6500 tours/min). Pour les vitesses considérées, le temps de traversée est inversement proportionnel à la vitesse angulaire initiale; la forme générale de la relation est une courbe asymptotique du type:

$$t_c = a/(\omega - b) \qquad (4.1)$$

où $a$ et $b$ sont des constantes. Les valeurs obtenues de $a$ et $b$ avec le volant M, sont 126 et 131 respectivement ($r^2 = 0,95$). De même, celles obtenues avec le volant G sont; $a = 146$ et $b = 96$ ($r^2 = 0,98$). De façon générale, les mesures répétées de $t_c$, à des vitesses initiales identiques, effectuées sur une même éprouvette, sont égales. Par contre, deux valeurs de $t_c$ mesurées avec le volant G à la vitesse de 365 rad/s diffèrent d'environ 30%; ces résultats obtenus de la même éprouvette de bois, illustrent bien le caractère

organique (matière fibreuse) et anisotrope du bois. La représentation des valeurs expérimentales de $t_c$ par une courbe asymptotique (éq. 4.1), présente un coefficient d'explication $r^2$ égal ou supérieur à 0,95, ce qui indique que le modèle choisi s'applique bien aux données enregistrées.

Les figures 4.1 et 4.2 montrent que pour de faibles vitesses du volant, le temps $t_c$ devient très grand; cependant, en deçà d'une valeur limite de vitesse, la scie ne peut couper de part en part l'échantillon et le temps de traversée est alors infini; cette condition est prise en considération dans l'équation 4.1 (i.e. pour $\omega < b$).

D'un autre côté, le temps de traversée diminue au fur et à mesure que la vitesse initiale d'essai augmente; cependant il n'y a pas de problème pour mesurer avec précision le temps de traversée, car le système de détection permettrait d'aller à des vitesses de beaucoup supérieures à celles permises avec le système.

L'examen des résultats présentés au tableau 4.2 montre que le coefficient de variation du temps de traversée varie peu, quel que soit le diamètre du volant ou la vitesse initiale d'essai. Dans ce tableau, $N$ indique le nombre d'essais réalisés sur l'éprouvette identifiée dans la deuxième colonne. Dans chacune de ces séries d'essais, la variation de la vitesse initiale de l'essai était inférieure à 5%. Pour l'ensemble des éprouvettes de pin évaluées, le coefficient de variation (C.V.) de $t_c$ s'étend de 3,4% à 16,3%, selon les plages de vitesses et le diamètre du volant. En général, pour une population ayant une distribution

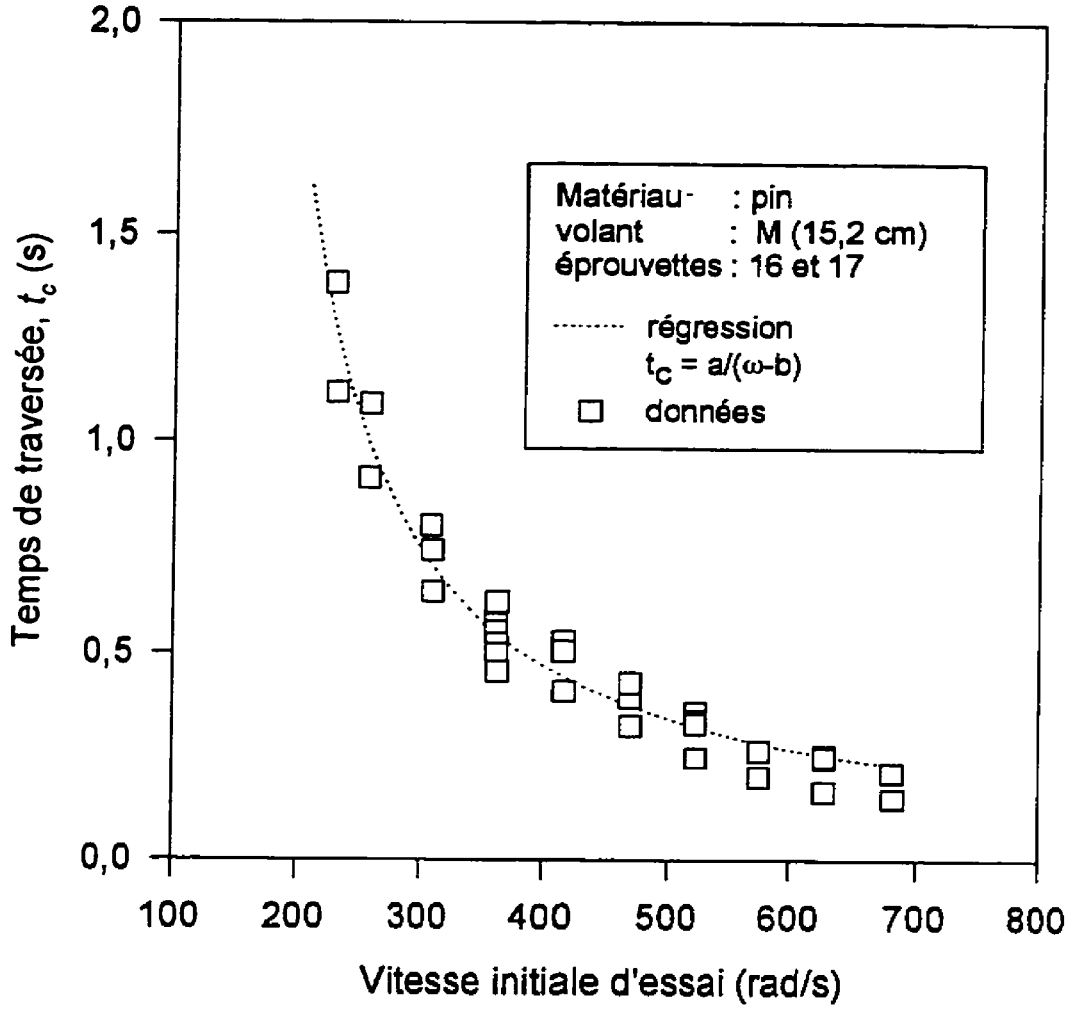



**Figure 4.1** Variation du temps de traversée des éprouvettes en pin en fonction de la vitesse initiale d'essai avec le volant M

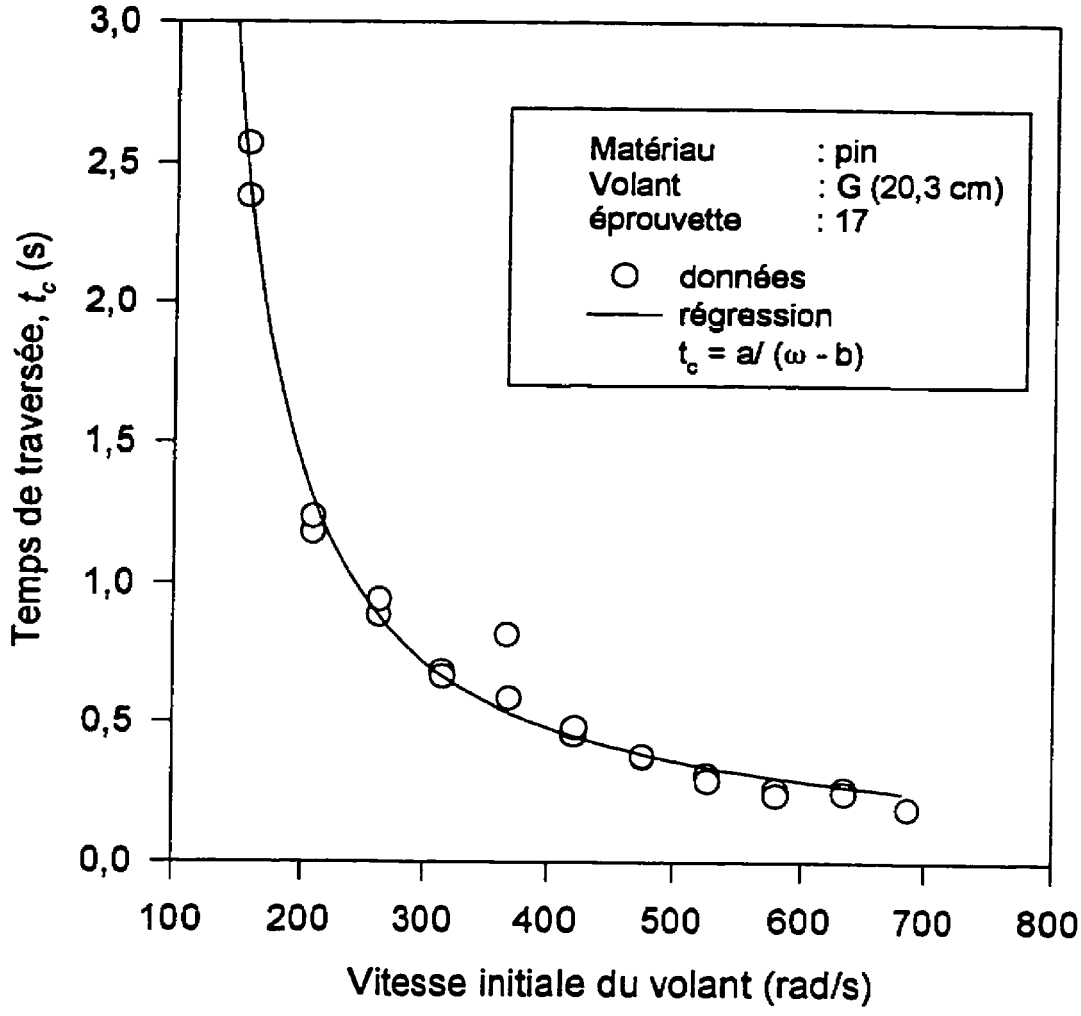



**Figure 4.2** Variation du temps de traversée des éprouvettes en pin en fonction de la vitesse initiale d'essai, avec le volant G

normale, la dispersion des données par rapport à la moyenne est jugée homogène lorsque le coefficient de variation est inférieur à 15% (BAILLARGEON). Les valeurs de dispersion du temps de traversée se situent à l'intérieur de cette limite (sauf un cas).

**Tableau 4.2** Dispersion du temps de traversée ($t_c$) pour le pin

| Volant | éprouvette No | N (essais) | Vitesse (rad/s) | Temps de traversée ($t_c$) (s) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $\mu$ | $\sigma$ | C.V.(%) |
| P | 11 | 5 | 340 | 0,550 | 0,035 | 6,4 |
| | 10 | 5 | 392 | 0,499 | 0,067 | 13,5 |
| | 11 | 7 | 503 | 0,272 | 0,009 | 3,4 |
| M | 16 | 4 | 362 | 0,595 | 0,032 | 5,4 |
| | 17 | 4 | 363 | 0,496 | 0,029 | 5,8 |
| | 16 | 3 | 522 | 0,342 | 0,014 | 4,2 |
| G | 8 | 5 | 250 | 0,787 | 0,077 | 9,7 |
| | 7 | 6 | 357 | 0,402 | 0,019 | 4,7 |
| | 7 | 5 | 519 | 0,233 | 0,038 | 16,3 |

### 4.1.2 ÉNERGIE DE COUPURE DU PIN

Pour chaque essai, l'évaluation de l'énergie nécessaire pour couper un échantillon en pin s'est effectuée en se basant sur un paramètre : $E_m$. Cette valeur de l'énergie est associée à la résistance de coupure du matériau pendant l'intervalle de temps $t_c$. Aussi, deux autres valeurs sont utilisées pour comparer les résultats et sont dérivées de l'énergie de coupure, $E_m$. Il s'agit de l'énergie spécifique de coupure, $E_s$, et de l'énergie spécifique

corrigée pour la dureté, $E_{d,s}$. Toutes ces quantités incluent également l'énergie dispersée dans tout le système d'entraînement de la scie sous forme de frottement.

Rappelons que l'énergie spécifique de coupure, $E_s$, est obtenue en divisant l'énergie de coupure, $E_m$, par la surface de la section droite coupée. Cette mesure du niveau énergie spécifique est très utile pour comparer différents types de matériaux, qui présentent parfois des sections différentes, et ainsi déterminer la capacité de chacun à absorber l'énergie de la scie à chaîne.

Vu que l'énergie spécifique corrigée, $E_{d,s}$, tient compte de la surface de la section droite coupée et de la dureté des éprouvettes, ce paramètre serait plus approprié dans la caractérisation de la résistance à la coupure des éprouvettes de bois de dimension et dureté différentes.

Le tableau 4.3 présente les valeurs moyennes obtenues pour $E_m$, $E_s$ (énergie/aire coupée) et $E_{d,s}$, pour plusieurs séries d'essais à différentes vitesses initiales et avec différents volants. Le coefficient de variation dans chacune de ces conditions d'essai, indiqué à la dernière colonne, est le même pour $E_m$, $E_s$ et $E_{d,s}$, car les résultats ont été obtenus à partir d'une même éprouvette (colonne 2). Ce coefficient est effectivement relié à la valeur de $E_m$ et indique que la dispersion des valeurs de $E_m$ est très faible, i.e. inférieure à 8% dans tous les cas, sauf un (13%).

En comparant les valeurs moyennes de $E_m$ obtenues pour des essais avec le même volant, mais à des vitesses différentes, il sera possible de déterminer l'effet de la vitesse initiale d'essai sur l'énergie. De plus, l'analyse de la dureté des éprouvettes mettra en évidence l'importance d'utiliser un facteur de correction pour cette propriété dans l'interprétation des valeurs de $E_m$. L'influence de ces deux paramètres (vitesse et dureté) sur $E_m$ sera discutée dans les sections suivantes.

**Tableau 4.3** Énergie moyenne pour couper les éprouvettes de pin

| Volant | éprouvette No | N | Vitesse (rad/s) | $E_m$ (J) | $E_s$ (J/cm$^2$) | $E_{d.s}$ (J/cm$^2$) | C.V. (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 11 | 5 | 340 | 141,2 | 23,5 | 25,9 | 4,6 |
| | 10 | 5 | 392 | 156,5 | 25,7 | 22,9 | 4,6 |
| | 11 | 7 | 503 | 140,0 | 23,3 | 25,7 | 6,8 |
| M | 16 | 4 | 362 | 198,1 | 32,6 | 29,1 | 4,1 |
| | 17 | 4 | 363 | 169,1 | 28,2 | 30,6 | 7,6 |
| | 16 | 3 | 522 | 202,5 | 33,3 | 29,8 | 2,0 |
| G | 8 | 5 | 250 | 217,6 | 35,9 | 36,5 | 7,3 |
| | 7 | 6 | 357 | 176,3 | 29,0 | 36,4 | 4,5 |
| | 7 | 5 | 519 | 181,8 | 29,9 | 37,5 | 13,0 |

### 4.1.3 INFLUENCE DE LA VITESSE INITIALE D'ESSAI SUR L'ÉNERGIE DE COUPURE DU PIN

Pour les trois diamètres de volant choisis, les quantités de l'énergie de coupure d'une

éprouvette en pin ont été obtenues en fonction d'une dizaine de vitesses initiales d'essai différentes. Les trois séries d'essais effectuées avec les volants P, M et G se résument comme suit:

- volant P: 5 vitesses initiales d'essai, de 320 rad/s à 600 rad/s, au total 23 essais;
- volant M:10 vitesses initiales d'essai, de 230 rad/s à 680 rad/s, au total 33 essais;
- volant G:11 vitesses initiales d'essai, de 155 rad/s à 680 rad/s, au total 35 essais.

Chaque série d'essai a nécessité deux éprouvettes en pin. Les résultats obtenus sont illustrés aux figures 4.3 à 4.5. Ces figures montrent que pour un volant spécifié, l'énergie de coupure d'une même éprouvette ne dépend pas de la vitesse initiale d'essai.

Le tableau 4.4 est extrait du tableau précédent et montre que l'énergie moyenne de coupure, $E_m$, ne varie pas de façon significative pour une même éprouvette de pin, pour les vitesses initiales considérées, pour chacun des volants choisis. Cependant, comme l'illustre la figure 4.4, deux éprouvettes de pin peuvent amener deux valeurs différentes pour l'énergie de coupure, $E_m$; en effet les valeurs moyennes de $E_m$ sont 202,5 J et 169,1 J pour les éprouvettes 16 et 17 respectivement. Cette différence est attribuée principalement à la dureté inhérente de chacune des éprouvettes de pin et sera discutée à la section suivante.

Pour chacun des trois volants, les résultas d'essais réalisés à différentes vitesses sur une même éprouvette ont été analysés à l'aide d'une méthode statistique de régression linéaire. Un test paramétrique permettant d'évaluer le degré d'association entre les paires

de variables, énergie de coupure et vitesse initiale d'essai, a également été effectué. Les résultats de cette analyse sont présentés au tableau 4.5. Dans les deux cas, il est supposé que les données proviennent d'une population normale. Les éprouvettes testées sont identifiées à la deuxième colonne du tableau et le nombre d'essais effectués par éprouvette, à la troisième colonne. A l'avant-dernière colonne, le résultat du test paramétrique, identifié $p$, représente la probabilité que les variables ne soient pas corrélées. Lorsque la valeur de $p$ est supérieure à 0,05, qui est le seuil de signification, il n'y a pas de lien entre les variables étudiées. Le coefficient d'explication, $r^2$, indique le pourcentage de variation des données expérimentales qui sont expliquées par la droite de régression. Le coefficient d'explication peut varier entre 0 et 1. Si il est nul, aucune liaison linéaire n'existe entre les deux variables.

**Tableau 4.4** Énergie de coupure du pin et vitesse initiale d'essai pour une même éprouvette

| Volant | Éprouvette No | N | Vitesse (rad/s) | $E_m$ (J) |
|---|---|---|---|---|
| | | | | $\mu$ |
| P | 11 | 5 | 340 | 141,2 |
| | 11 | 7 | 503 | 140,0 |
| M | 16 | 4 | 362 | 198,1 |
| | 16 | 3 | 522 | 202,5 |
| G | 7 | 6 | 357 | 176,3 |
| | 7 | 5 | 519 | 181,8 |

Les résultats ont montré que, pour un volant donné, la variation de l'énergie de coupure n'est pas relié à la vitesse de façon significative, à un seuil de 5% ($p>0,05$); autrement dit, l'énergie de coupure est indépendante de la vitesse initiale d'essai.

**Tableau 4.5** Dépendance de l'énergie et de la vitesse d'essai pour le pin

| Volant | Ep. no. | N | Plage de vitesse (rad/s) | Régression linéaire coefficient $r^2$ | $p$ | Association significative (entre $E$ et $V$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 11 | 14 | 330 à 605 | 0,05 | 0,42 | non |
| M | 16 | 20 | 230 à 680 | 0,09 | 0,17 | non |
| | 17 | 13 | 230 à 680 | 0,29 | 0,06 | non |
| G | 14 | 21 | 155 à 680 | 0,07 | 0,40 | non |
| | 7 | 14 | 245 à 525 | 0,04 | 0,52 | non |

Les résultats obtenus dans le présent travail sont en bon accord avec ceux cités dans la littérature; en effet, GAMBRELL (1966) et STACKE (1989) ont rapporté que les forces de coupe obtenues avec le bois, sont indépendantes de la vitesse d'essai et que, par conséquent, l'énergie requise pour couper un échantillon de bois l'est aussi.

### 4.1.4 INFLUENCE DE LA DURETÉ DES ÉPROUVETTES DE PIN SUR L'ÉNERGIE DE COUPURE

*a) Mesure de la dureté*

Comme il a été mentionné au chapitre 3, la dureté de chacune des éprouvettes de bois

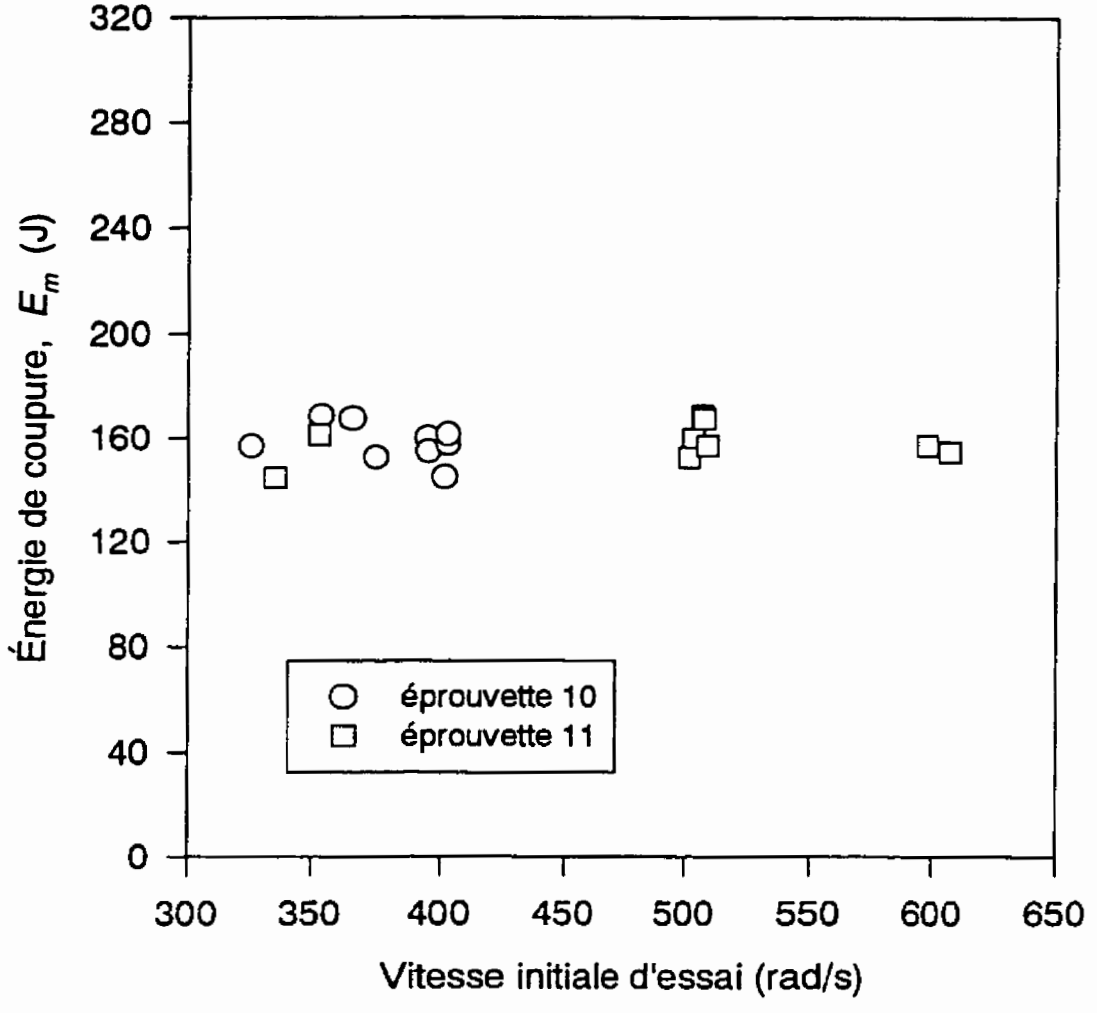



**Figure 4.3** Distribution de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le volant P et une éprouvette en pin

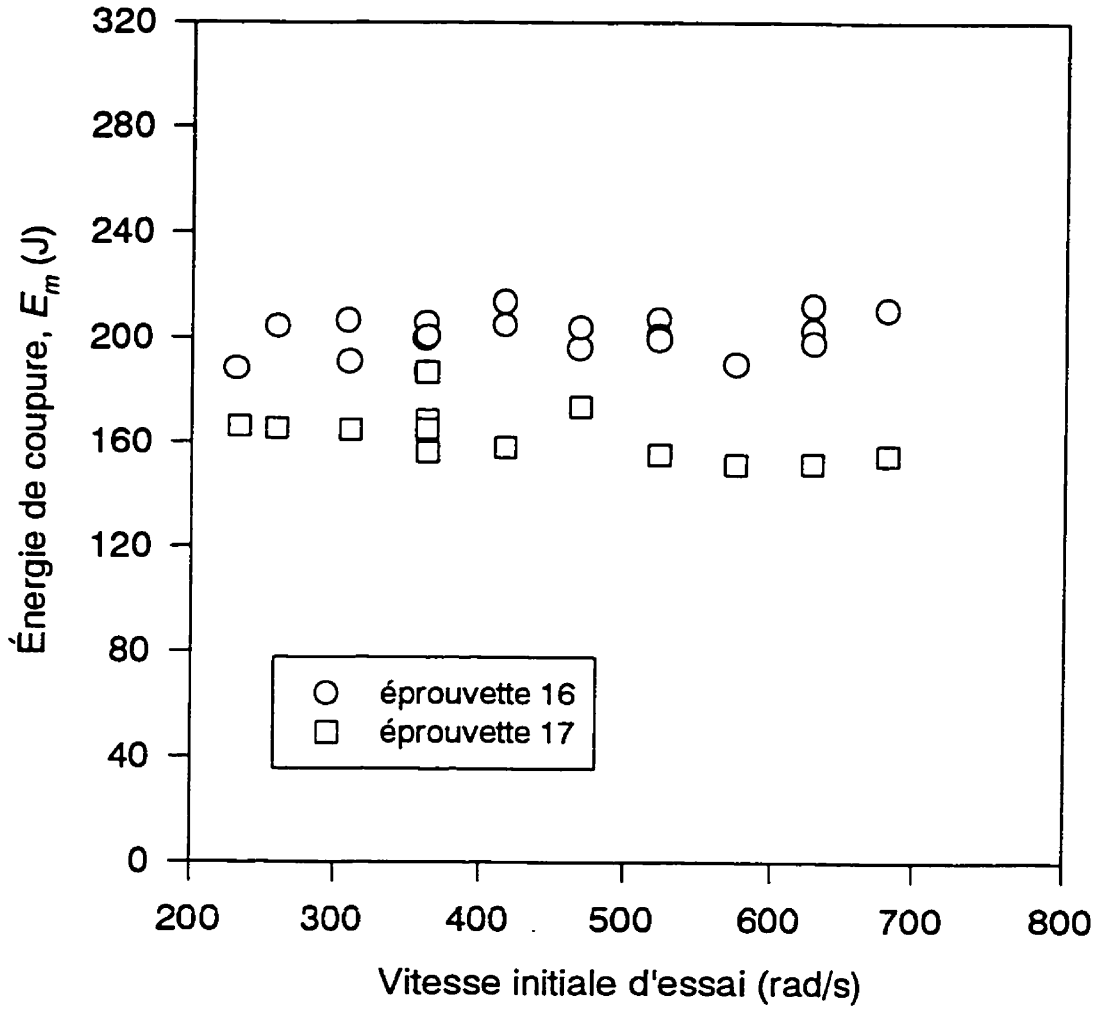



**Figure 4.4** Distribution de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le volant M et une éprouvette en pin

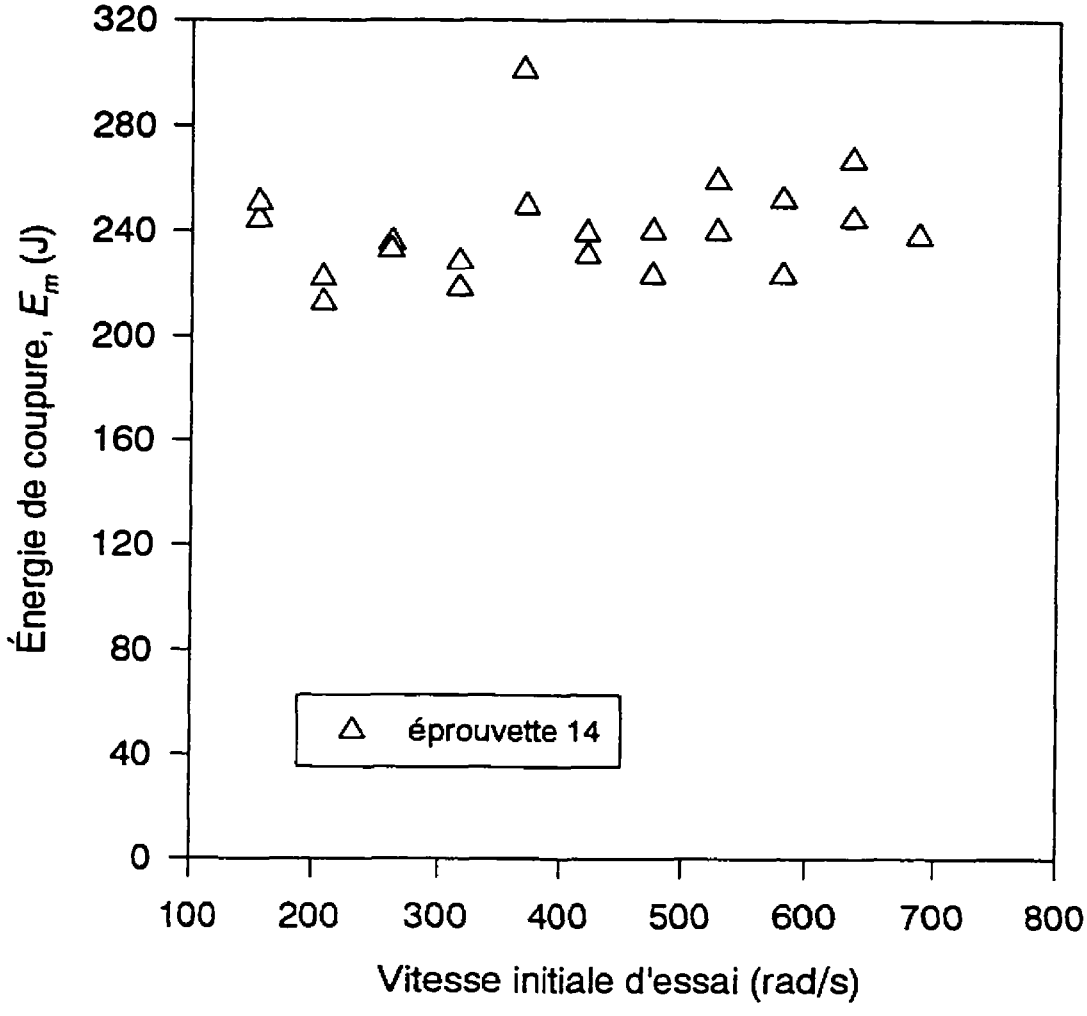



**Figure 4.5** Distribution de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le volant G et une éprouvette en pin

a été mesurée. Les essais de pénétration sont effectués en enfonçant un poinçon à une profondeur spécifiée dans l'éprouvette et la force correspondant à une pénétration de 3 mm, $F_{3mm}$, a été retenue pour caractériser la dureté, car pour cette pénétration, le plus faible coefficient de variation a été observé par rapport aux autres profondeurs de pénétration. Douze essais par éprouvettes ont permis de déterminer la force moyenne de pénétration. La figure 4.6 met en évidence la variation de la force moyenne de pénétration, $F_{3mm}$, sur les différentes éprouvettes utilisées dans cette étude. La figure 4.7 montre que le coefficient de variation de la force de pénétration pour une même éprouvette est compris entre 8 et 15%. Quant à la variation de la force moyenne de pénétration d'une éprouvette à l'autre, elle est du même ordre de grandeur (10%) que les variations individuelles (8 à 15%) de cette force.

L'application de traitements statistiques pour établir un contrôle de la qualité sur les valeurs obtenues pour la force moyenne de pénétration, au lot d'éprouvettes de pin évaluées dans le présent travail, sont présentées au tableau 4.6. La première colonne décrit les paramètres statistiques suivants: la variable à laquelle est appliqué le contrôle de qualité ($F_{3mm}$), l'écart-type de la variable évaluée et l'écart maximum de la variable pour chaque éprouvette. La deuxième colonne présente les moyennes des paramètres étudiés, i.e. la moyenne de toutes les forces moyennes de pénétration mesurées, la moyenne des écart-types et la moyenne des écarts ($F_{max}$ - $F_{min}$).

**Tableau 4.6** Dureté moyenne du lot d'éprouvettes de pin

| Paramètre étudié | Moyenne échantillonnale | Limite Inférieure de Contrôle (LIC) | Limite Supérieur de Contrôle (LSC) |
|---|---|---|---|
| Force moyenne de pénétration (évaluée à 3 mm) | 69,0 N | 61,2 N | 76,7 N |
| Écart-type | 6,7 N | 1,3 N | 12,1 N |
| Écart maximum ($F_{max}$ - $F_{min}$) | 20,8 N | 2,8 N | 38,7 N |

Ces données représentent l'estimation des paramètres de la population ($\mu$ et $\sigma$), calculée à partir de l'échantillonnage des éprouvettes de pin retenues pour l'analyse. Ainsi, la moyenne des forces de pénétration, $F_{3mm}$, représente une estimation non-biaisée de la moyenne $\mu$ de la population. L'estimation de la moyenne est présentée comme une ligne centrale avec de part et d'autre, les limites de contrôle supérieure et inférieure de $3\sigma$ (figure 4.8). L'écart-type de la population n'étant pas connu, les moyennes des écarts maximums sont utilisées comme estimé. La moyenne des écarts doit être multipliée par une constante ($A_2$) pour obtenir une estimation non-biaisée de $3\sigma/\sqrt{n}$. Ce multiplicateur $A_2$ est obtenu des tableaux des analyses statistiques (MILLER, 1977) et dépend du nombre de mesures (n) effectuées pour chacun des échantillons.

Ainsi, dans le diagramme de contrôle de qualité pour $F_{3mm}$ les valeurs sont;

$$\text{ligne centrale} = \overline{F_{3mm}}$$

et ;

$$LSC = \overline{F_{3mm}} + A_2 \overline{(F_{max} - F_{min})} \qquad (4.1)$$
$$= 69,0 + 0,373 \times 20,8 \quad = 76,7$$

$$LIC = \overline{F_{3mm}} - A_2 \overline{(F_{max} - F_{min})} \qquad (4.2)$$
$$= 69,0 - 0,373 \times 20,8 \quad = 61,2$$

Les valeurs de LIC et LSC pour l'écart-type et l'écart maximum sont obtenues de façon similaire, seul le multiplicateur statistique change. Pour l'écart-type, les valeurs limites de contrôle supérieure et inférieure sont:

$$LSC = B_3 \bar{s} \qquad (4.3)$$
$$LIC = B_4 \bar{s}$$

où $\bar{s}$ représente l'écart-type d'une série de mesure.

De même, pour l'écart maximum, les valeurs sont;

$$LSC = D_4 \overline{(F_{max} - F_{min})} \qquad (4.4)$$
$$LIC = D_3 \overline{(F_{max} - F_{min})}$$

Les valeurs $B_3$, $B_4$, $D_3$ et $D_4$ sont obtenues dans les mêmes tableaux statistiques. Les valeurs moyennes et les limites ainsi obtenues, permettent de tracer les diagrammes nécessaires au contrôle de la qualité sur la dureté ($F_{3mm}$) des éprouvettes de pin (figure 4.8). Un plus grand nombre d'éprouvettes de pin (25) permettrait de réduire la

différence entre les valeurs des limites de contrôle. L'avantage de cette approche, c'est qu'elle permet de déterminer à priori, si une éprouvette de pin doit être rejetée avant que les tests de coupure ne soient effectués. C'est un moyen avantageux si les éprouvettes de bois sont retenues comme matériau d'étalonnage.

*b) Énergie de coupure en fonction de la dureté globale*

Après avoir établi les caractéristiques statistiques du paramètre retenu pour évaluer la dureté, i.e. $F_{3mm}$, la variation de l'énergie de coupure sera étudié en relation avec ce paramètre. Le tableau 4.7 présente les valeurs moyennes de $F_{3mm}$, de $E_m$, $E_s$, du facteur de correction pour la dureté ($f_k$) et de $E_{d,s}$ pour chaque éprouvette testée. Dans l'évaluation de $E_{d,s}$, les facteurs de correction associés à la dureté ainsi qu'à la géométrie ont été pris en compte. Les résultats sont présentés indépendamment de la vitesse d'essai, car comme il a été montré dans la section précédente, l'énergie de coupure des éprouvettes de bois ne dépend pas de la vitesse d'essai.

Au tableau 4.7, les coefficients de variation pour chaque valeur de $E_m$ ne sont pas liés à ceux de $F_{3mm}$. En général, pour les mêmes éprouvettes, les coefficients de variation de l'énergie sont plus faibles que ceux obtenus pour la dureté. Il est plausible de penser que l'évaluation de la dureté à l'aide d'un poinçon est une mesure ponctuelle et qu'elle est plus influencée par le caractère anisotrope et non-homogène de la matière organique du bois que ne l'est la mesure de l'énergie. En effet, la mesure de l'énergie est basée sur la coupe d'une section d'environ 6 $cm^2$ et tient compte de toutes les variations

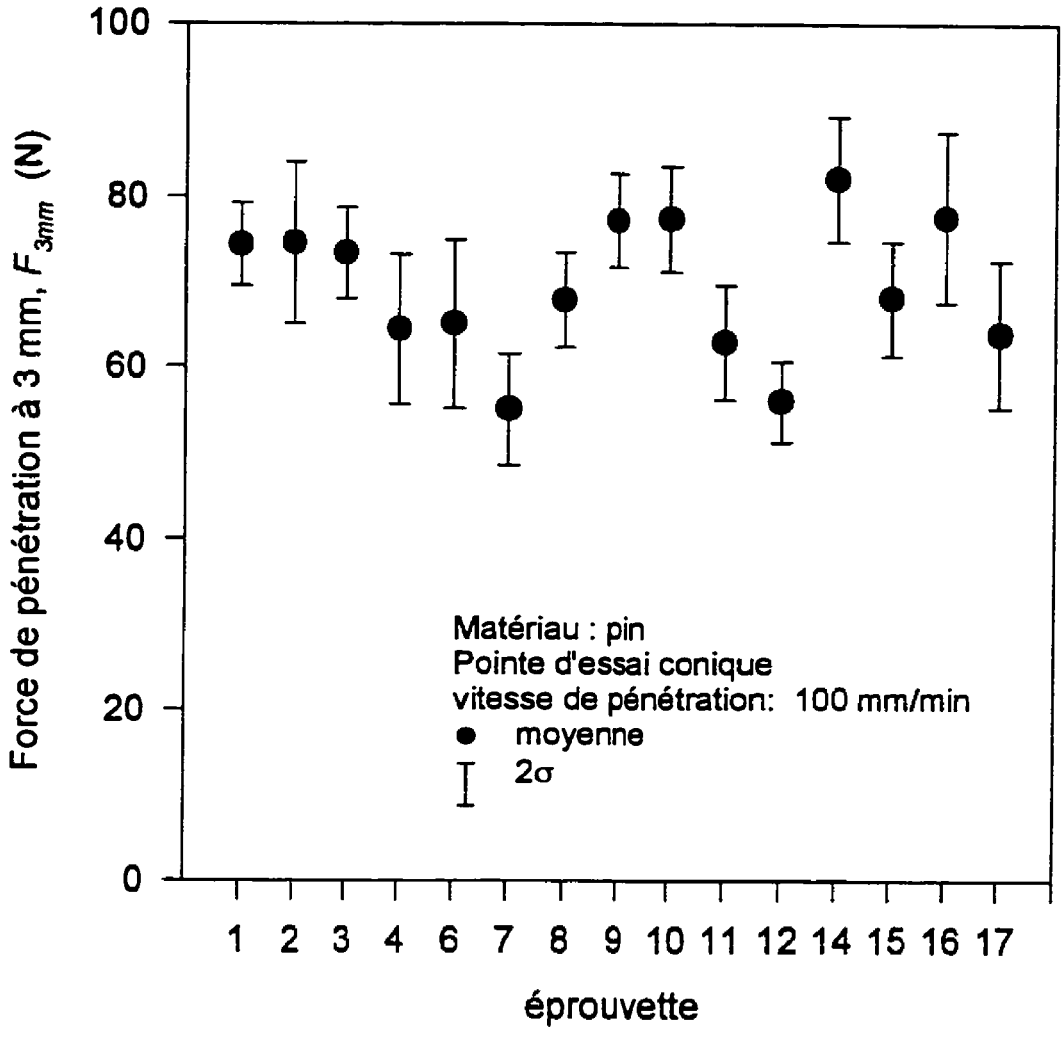



**Figure 4.6** Force de pénétration lors de la mesure de dureté des éprouvettes de pin

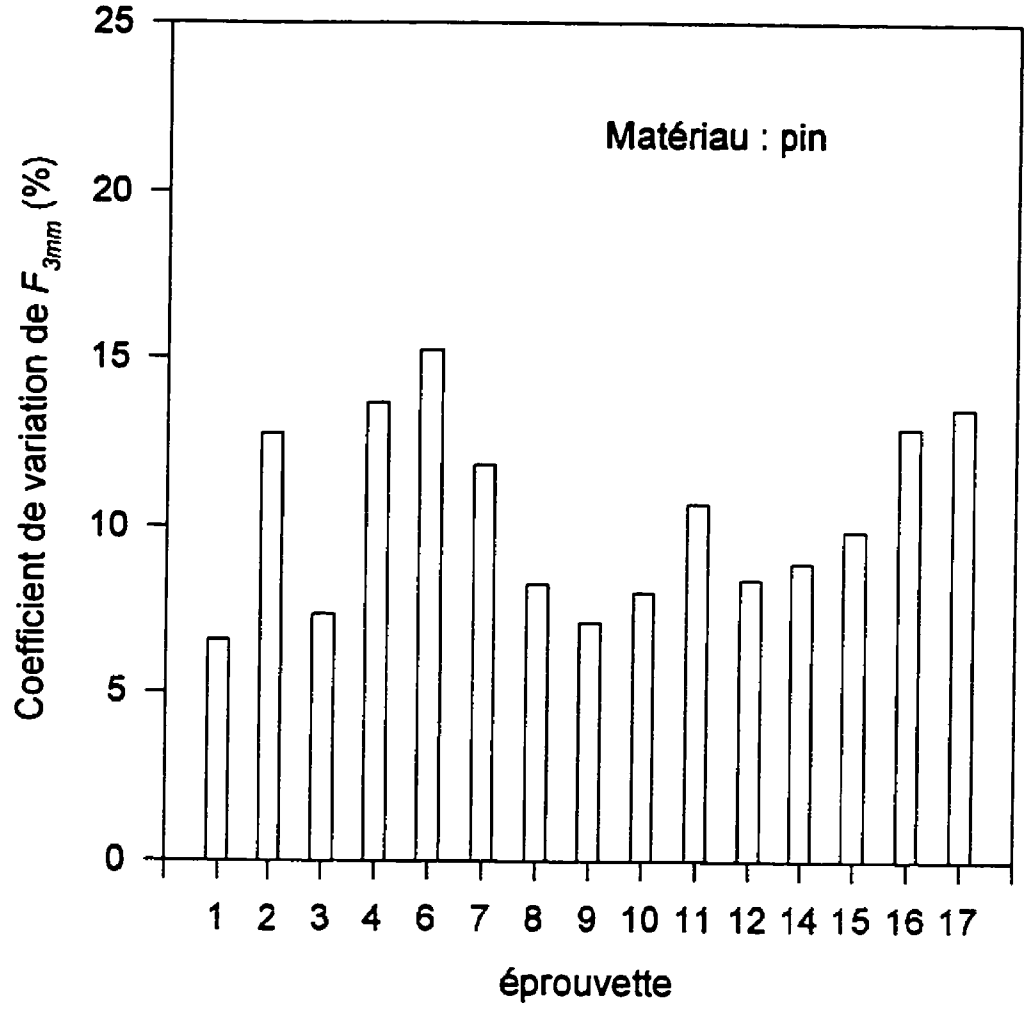
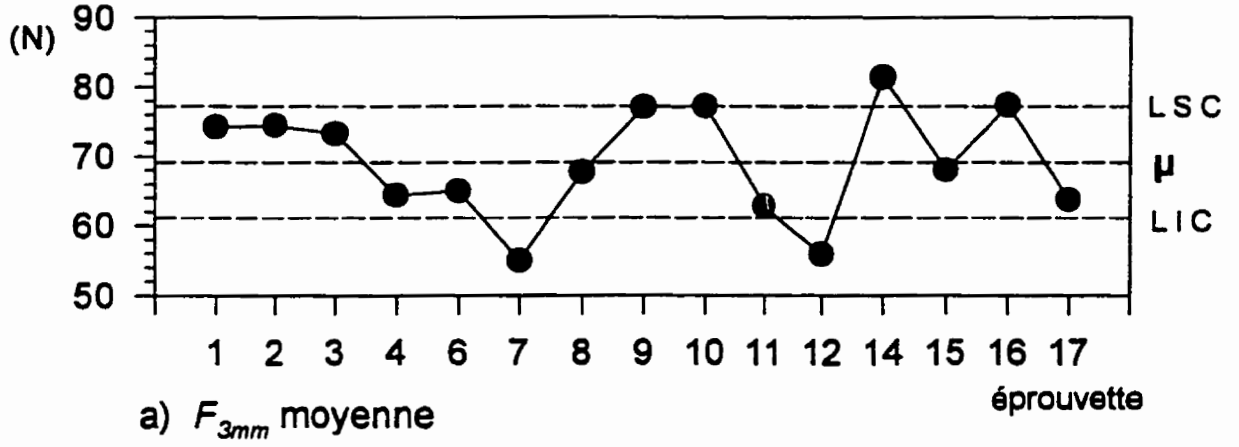
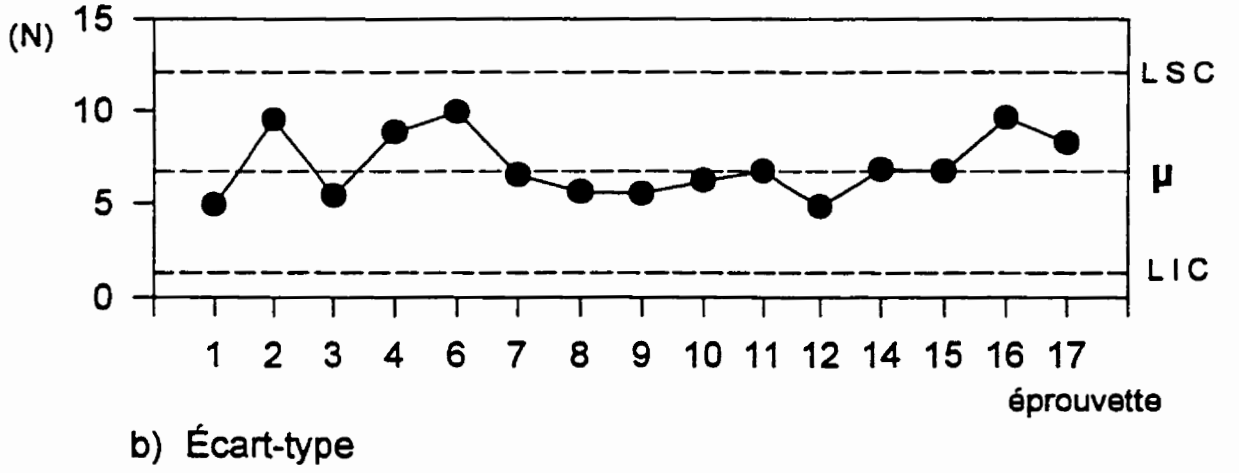



**Figure 4.7** Coefficient de variation de la force de pénétration à 3 mm ($F_{3mm}$) lors de la mesure de dureté des différentes éprouvettes de pin



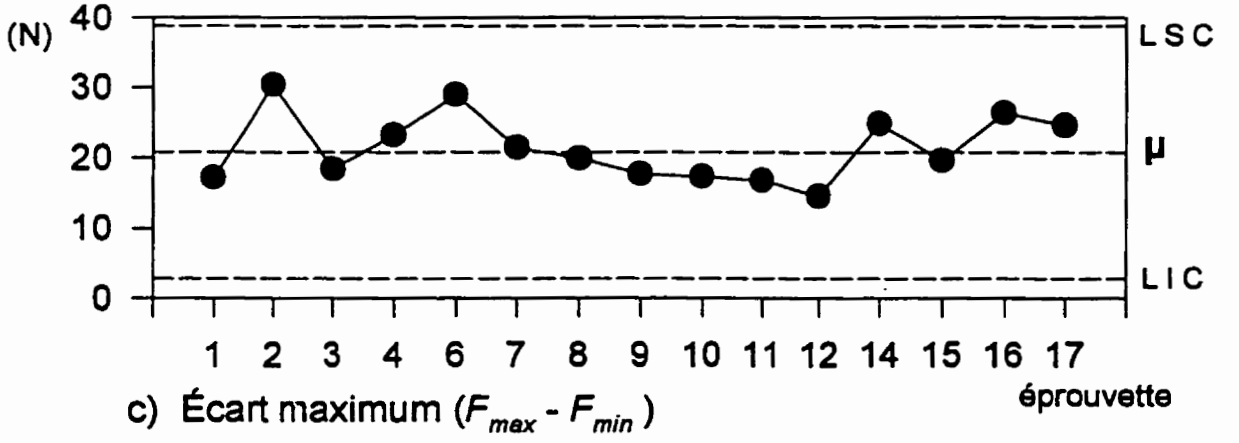




**Figure 4.8** Diagramme pour le contrôle de qualité des éprouvettes de pin
a)Force moyenne de pénétration, b)écart-type c)écart maximum ($F_{max}$ - $F_{min}$)

couple-vitesse angulaire pendant tout le temps de traversée. C'est donc une mesure plus globale. Suite à ces observations, il serait avantageux, d'essayer de réduire le coefficient de variation de la force moyenne de pénétration, en utilisant d'autres types de poinçons dans les essais de dureté.

**Tableau 4.7** Dureté et énergie pour les éprouvettes de pin

| Volant | Pièce no. | N | $F_{3mm}$ | | $E_m$ | | $E_s$ | $f_k$ | $E_{d,s}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | (N) | C.V. (%) | (J) | C.V. (%) | (J/cm²) | - | (J/cm²) |
| P | 10 | 9 | 77,3 | 8,0 | 157,7 | 4,7 | 25,9 | 0,89 | 23,2 |
| | 11 | 14 | 62,8 | 10,7 | 139,4 | 5,7 | 23,2 | 1,10 | 25,6 |
| M | 16 | 20 | 77,5 | 12,9 | 201,0 | 3,8 | 33,1 | 0,89 | 29,6 |
| | 17 | 13 | 63,8 | 13,5 | 162,9 | 6,1 | 27,2 | 1,08 | 29,5 |
| G | 2 | 10 | 74,5 | 12,8 | 200,4 | 6,1 | 32,5 | 0,93 | 30,2 |
| | 3 | 8 | 73,3 | 7,4 | 162,9 | 5,4 | 27,4 | 0,94 | 25,9 |
| | 4 | 13 | 64,4 | 13,7 | 153,4 | 12,2 | 24,8 | 1,07 | 26,7 |
| | 6 | 9 | 65,0 | 15,2 | 214,3 | 5,6 | 35,8 | 1,06 | 38,2 |
| | 7 | 16 | 55,0 | 11,8 | 181,0 | 9,0 | 29,8 | 1,25 | 37,5 |
| | 8 | 8 | 67,8 | 8,3 | 214,2 | 8,2 | 35,3 | 1,02 | 36,1 |
| | 11 | 5 | 62,8 | 10,7 | 188,7 | 12,9 | 31,4 | 1,10 | 34,6 |
| | 12 | 5 | 55,9 | 8,4 | 153,5 | 6,8 | 25,5 | 1,23 | 31,6 |
| | 14 | 21 | 82,0 | 8,9 | 240,6 | 8,1 | 39,6 | 0,84 | 33,4 |

Les nombreux résultats obtenus avec le volant G sur les éprouvettes de pin, 9 éprouvettes et 95 essais, rendent possible l'analyse entre l'énergie de coupure et la force moyenne

de pénétration. Dans un premier temps, le coefficient d'explication ($r^2$) obtenu dans l'analyse de régression linéaire entre $E_m$ et $F_{3mm}$ montre que les différences entre les niveaux moyens d'énergie mesurés pour les différentes éprouvettes, ne peuvent être expliquées par la variation de la force de pénétration. En effet, la corrélation calculée entre ces deux variables est de $r^2$=0,33. Autrement dit, seulement 33% de la variation de l'énergie de coupure peut être expliquée par la droite de régression empirique. Comme l'énergie de coupure varie peu ou pas avec la force de pénétration, pour les résultats obtenus avec le volant G sur le pin, il est intéressant de regarder les moyennes et l'écart-type de cet échantillon. La pondération relative au nombre d'essais réalisés pour chacune des éprouvettes, est appliquée dans le calcul de la moyenne de la façon suivante:

$$\overline{E_m} = \frac{\sum_{i}^{k} N_i \, (E_m)_i}{\sum_{i}^{k} N_i} \qquad (4.5)$$

où $N_i$ représente le nombre d'essais effectués sur l'éprouvette $i$ et $(E_m)_i$, l'énergie moyenne de coupure pour cette même éprouvette. Le calcul de l'écart-type est lui aussi pondéré pour tenir compte du nombre d'essais, $N_i$, différent d'une éprouvette à l'autre. Les valeurs statistiques, la moyenne et l'écart-type de $E_m$, pour l'échantillon analysé, sont:

$$\overline{E_m} = 195{,}8 \; J$$
$$\bar{s} = 31{,}5$$

Le coefficient de variation (C.V.) pour les valeurs moyennes de l'échantillon est alors

de 16%.

Par la suite, l'analyse de l'énergie spécifique de coupure, $E_s$, et de la force de pénétration, pour la même série d'éprouvettes que précédemment, montre le même comportement; les différences entre les niveaux moyens d'énergie spécifiques ne peuvent être expliquées par la variation de $F_{3mm}$ ($r^2$=0,30). Les statistiques obtenues pour $E_s$ avec le lot d'éprouvettes considérées sont les suivantes:

$$\overline{E_s} = 32{,}2 \ J/cm^2$$
$$\overline{s} = 5{,}19$$

Et dans ce cas-ci aussi, le coefficient de variation des valeurs moyennes de $E_s$ est de 16%. En effet, l'aire de la section droite coupée (environ 6 cm$^2$) présente très peu de variation d'une éprouvette à l'autre, ce qui explique que le C.V. pour $E_s$ soit le même que celui obtenu pour $E_m$.

Finalement, l'utilisation d'un facteur de correction ($f_t$) appliqué à $E_s$, basé sur la force moyenne de pénétration, nous permet de calculer les valeurs d'énergie corrigées pour la dureté et la géométrie (dernière colonne du tableau 4.7). Ces valeurs devraient permettre de réduire le coefficient de variation sur les valeurs moyennes d'énergie de coupure obtenues pour les différentes éprouvettes étudiées. Le calcul des variables statistiques pour le lot d'éprouvettes considérées, est le même que précédemment. Les valeurs moyennes obtenues sont alors:

$$\overline{E_{d,s}} = 32{,}86\ J/cm^2$$
$$\bar{s} = 4{,}18$$

Le coefficient de variation pour les valeurs moyennes de $E_{d,s}$ obtenues avec le volant G, est de 12,7%. L'utilisation de l'énergie de coupure corrigée pour la dureté et la géométrie, $E_{d,s}$, représente donc une diminution du C.V. de 4% par rapport à l'énergie spécifique de coupure ($E_s$) ou à l'énergie de coupure ($E_m$). Le calcul de $E_{d,s}$ facilite l'utilisation des éprouvettes de pin comme matériau d'étalonnage, car il diminue les variations observées entre les différentes éprouvettes de pin.

Les autres valeurs moyennes de l'énergie corrigées pour la dureté et la géométrie des éprouvettes, (dernière colonne du tableau 4.7), obtenues pendant les essais pour couper les éprouvettes de pin avec les volants P (12,7 cm) et M (15,2 cm) sont respectivement 25 J/cm$^2$ et 30 J/cm$^2$; Ces moyennes inter-éprouvette sont calculées en considérant le poids relatif au nombre d'essais respectifs réalisés sur chacune des éprouvettes. Ces valeurs feront l'objet d'une discussion à la section 5.2, traitant de l'influence du volant sur le niveau moyen d'énergie de coupure.

*c) Influence de la vitesse initiale sur l'énergie de coupure corrigée pour la dureté et la géométrie*

La figure 4.9 présente les valeurs d'énergie de coupure, corrigées pour la dureté et la géométrie des éprouvettes de pin, obtenues avec les trois volants. La valeur moyenne de $E_{d,s}$ obtenue pour chaque volant, est indiquée par une droite et le symbole du volant.

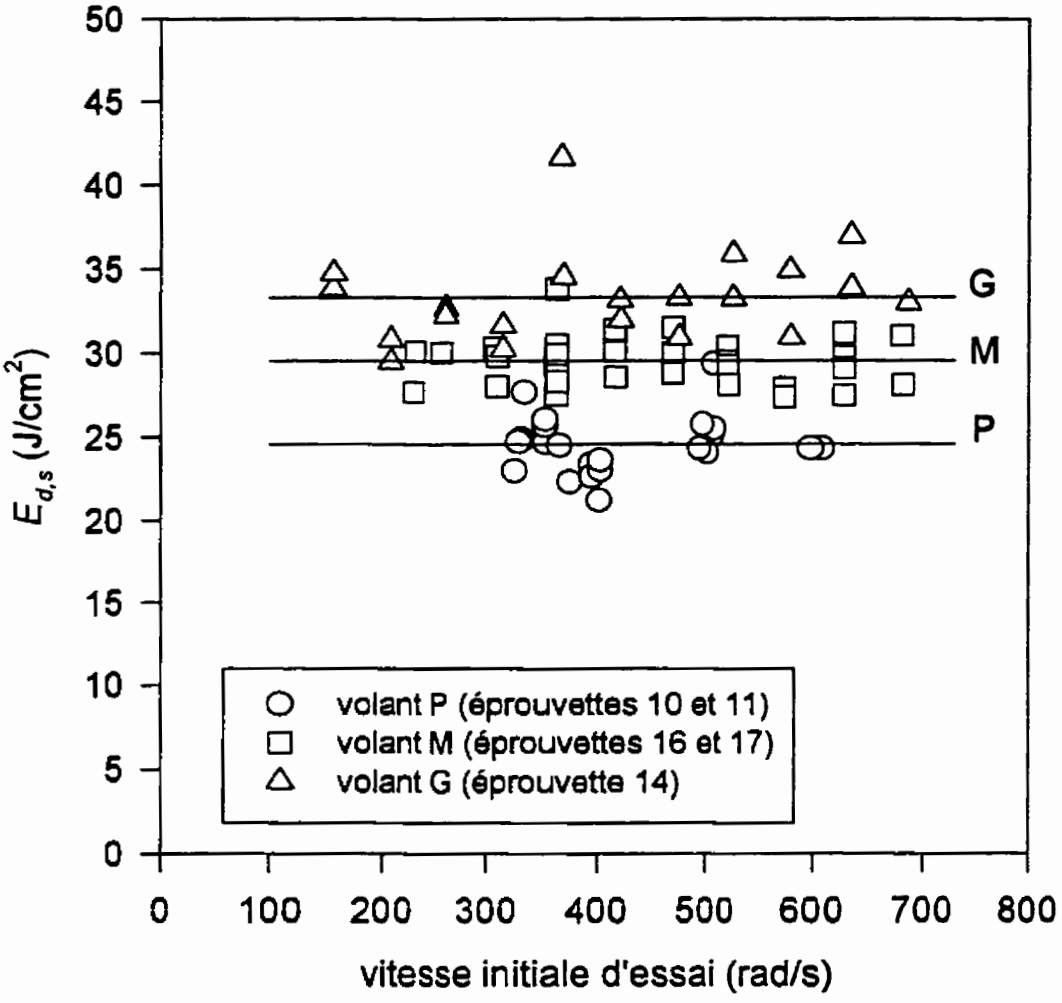



**Figure 4.9** Énergie de coupure, corrigée pour la dureté et la géométrie, du pin; volants P, M et G

### 4.1.5 ESSAIS SUR L'ÉRABLE

Plusieurs essais ont été réalisés sur des éprouvettes en érable, un bois plus dur que le pin. Ils ont été effectués avec le volant G, à une vitesse initiale de 520 rad/s. Les résultats d'une série d'essais typique, i.e. le temps de traversée, l'énergie spécifique de coupure, $E_s$, et l'énergie de coupure corrigée pour la dureté et la géométrie, $E_{d,s}$, sont présentés au tableau 4.8.

**Tableau 4.8** Temps de traversée et $E_{d,s}$ pour l'érable; volant G et vitesse initiale d'essai de 520 rad/s

| Éprouvette | N | Temps de traversée, $t_c$ (s) | | | $E_s$ (J/cm$^2$) | $E_{d,s}$ (J/cm$^2$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\mu$ | $\sigma$ | C.V. | $\mu$ | $\mu$ | C.V. (%) |
| 5 | 3 | 0,956 | 0,030 | 3,1 | 86,1 | 86,5 | 3,9 |
| 5 (chaîne neuve) | 5 | 0,969 | 0,024 | 2,5 | 108,0 | 108,5 | 2,4 |
| 13 | 6 | 1,257 | 0,194 | 15,4 | 107,5 | 107,1 | 4,1 |

Les valeurs de l'énergie présentent une faible dispersion lorsqu'elles sont corrigées pour la dureté et la géométrie; cette dispersion est d'environ de 4% (dernière colonne du tableau 4.8). Les résultats sur l'éprouvette No 5 sont très consistants; cependant, quant à la série de 6 essais sur l'éprouvette No 13 le coefficient de variation, C.V., est de 15% pour $t_c$ et de 4% pour $E_{d,s}$. Ceci peut être attribuable au fait que la scie à chaîne rebondit occasionnellement lors des essais sur les éprouvettes en érable. Ces rebonds introduisent des variations sur le temps de traversée mesuré, alors que la mesure d'énergie y est

beaucoup moins sensible car la valeur du couple diminue, lorsque la chaîne n'est plus en contact avec l'éprouvette. Vu que l'énergie calculée est reliée au produit du couple à la vitesse, elle est alors peu affectée par les rebonds de la scie.

Le tableau 4.9 présente le temps de traversée et l'énergie de coupure, corrigée pour la dureté et la géométrie, obtenus sur les deux éprouvettes d'érable évaluées, pour les volants P, M et G. Les vitesses initiales d'essai moyennes sont de 515 rad/s ($\pm$ 1%) pour les volants M et G, et de 605 rad/s ($\pm$1%) pour le volant P. L'augmentation de la vitesse du volant P est due au fait que ce volant ne peut couper les éprouvettes en érable qu'avec une vitesse supérieure à 530 rad/s.

**Tableau 4.9** Temps de traversée et énergie de coupure corrigée (dureté et géométrie) pour l'érable; volants P, M et G

| Volant | éprouvette | N | $t_c$ (s) | $E_{d,s}$ (J/cm$^2$) |
|---|---|---|---|---|
| P | 13 | 3 | 1,247 | 92,7 |
| M | 5 | 3 | 1,106 | 98,5 |
| G | 5 | 8 | 0,964 | 99,9 |
| | 13 | 6 | 1,257 | 107,1 |

Comme le montrent ces résultats, l'énergie, $E_{d,s}$, est moins sensible aux conditions d'essai (volants utilisés) que celle du pin. En effet, l'écart entre les valeurs extrêmes de $E_{d,s}$ (entre 107,1 et 92,7 J), est de 16%, contrairement aux cas des éprouvettes de pin, où cette variation est de l'ordre de 40%. Il faut reconnaître que le nombre d'éprouvettes

d'érable est beaucoup plus restreint que celui des éprouvettes de pin. Des essais sur un plus grand nombre d'éprouvettes en érable permettraient de confirmer si les valeurs moyennes de l'énergie de coupure corrigée, $E_{d,s}$, sont moins dispersées que celles obtenues pour le pin.

La dureté moyenne des deux éprouvettes en érable utilisées dans cette étude est montrée dans le tableau 4.10. Les valeurs moyennes de la force de pénétration évaluées sur douze essais pour chacune des éprouvettes en érable sont de 314,6 N et 316,1 N. Le coefficient de variation de la force de pénétration, pour chacune des éprouvettes, est inférieur à 10%, comparativement au coefficient de variation obtenu pour les éprouvettes de pin (de 7 à 15%). Les forces de pénétration moyenne indiquent que le facteur de correction ($f_k$) pour la dureté des éprouvettes d'érable est très près de la valeur unitaire. En effet, comme le montrent les résultats du tableau 4.8, il y a très peu de différences entre l'énergie spécifique de coupure ($E_s$) et l'énergie corrigée pour la dureté et la géométrie des éprouvettes ($E_{d,s}$).

**Tableau 4.10** Dureté moyenne de l'érable

| Éprouvette no. | $F_{3mm}$ (N) | | |
|---|---|---|---|
| | $\mu$ | $\sigma$ | C.V. (%) |
| 5 | 314,6 | 22,8 | 7 |
| 13 | 316,1 | 31,8 | 10 |

### 4.1.6 COMPARAISON ENTRE LES RÉSULTATS OBTENUS SUR LE PIN ET SUR L'ÉRABLE

*a) Énergie spécifique de coupure et temps de traversée*

Pour l'érable, la force de pénétration moyenne, $F_{3mm}$, est de 315 N, soit environ 4,6 fois celle obtenue avec les éprouvettes de pin. Quant à l'énergie de coupure de l'érable, corrigée pour la géométrie et la surface, elle est plus élevée que celle requise pour couper les éprouvettes de pin (tableau 4.11). Ce rapport de l'énergie de coupure entre les deux matériaux est à peu près constant et est d'environ 3,4. En effet, l'énergie ne dépendant pas de la vitesse initiale d'essai, ce rapport devrait être constant, si on utilise les mêmes éprouvettes d'érable et de pin pour les essais réalisés avec chacun des volants. Ce rapport pourrait alors être utilisé comme point de vérification supplémentaire, lors de l'utilisation de deux matériaux d'étalonnage, comme le pin et l'érable.

Quant au rapport entre le temps de traversée de l'érable et celui du pin, il diminue lorsque l'inertie du volant augmente (de P à M, puis de M à G) et ne présente donc pas grand intérêt, puisqu'il n'est pas constant.

*b) Influence de la dureté sur l'énergie de coupure*

Les valeurs mesurées de l'énergie spécifique de coupure, $E_s$, et de la force de pénétration ont permis de déterminer l'influence de la dureté sur l'énergie. Comme le montre la figure 4.10, l'énergie de coupure augmente lorsque la force de pénétration, $F_{3mm}$, augmente suffisamment, comme c'est le cas en passant du pin (bois mou) à l'érable (bois

dur).

**Tableau 4.11** Comparaison des valeurs de $t_c$ et de $E_m$ pour l'érable et le pin

| Volant | Vitesse (rad/s) | Érable | | Pin | | $\frac{[t_c]_{érable}}{[t_c]_{pin}}$ | $\frac{[E_{d,s}]_{érable}}{[E_{d,s}]_{pin}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $t_c$ (s) | $E_{d,s}$ (J/cm$^2$) | $t_c$ (s) | $E_{d,s}$ (J/cm$^2$) | | |
| P | 603 | 1,247 | 93 | 0,185 | 25,0 | 6,7 | 3,8 |
| M | 513 | 1,235 | 100 | 0,342 | 29,0 | 3,6 | 3,4 |
| G | 519 | 0,950 | 103 | 0,233 | 33,0 | 4,1 | 2,7 |

Maintenant que le comportement des paramètres caractéristiques de coupure, temps de traversée et énergie, a été déterminé pour le bois, l'étude sera concentrée sur le caoutchouc qui est un matériau utilisé dans la confection des bottes de protection pour les travailleurs forestiers.

## 4.2 ESSAIS SUR LES CAOUTCHOUCS

*a) Types de caoutchouc*

Deux types de caoutchouc synthétique ont été évalués, soient le caoutchouc styrène-butadiène (SBR) avec une dureté de 60 DURO, et le néoprène de dureté 70 DURO. Ces caoutchoucs sont fabriqués en feuilles de différentes épaisseurs; dans cette étude, des feuilles de 6,4 mm ont été choisies. Pour effectuer la coupe, l'échantillon de caoutchouc, sous forme de bande d'environ 5 cm de largeur, était maintenu fermement sur une éprouvette de pin qui servait de support au matériau, tel que

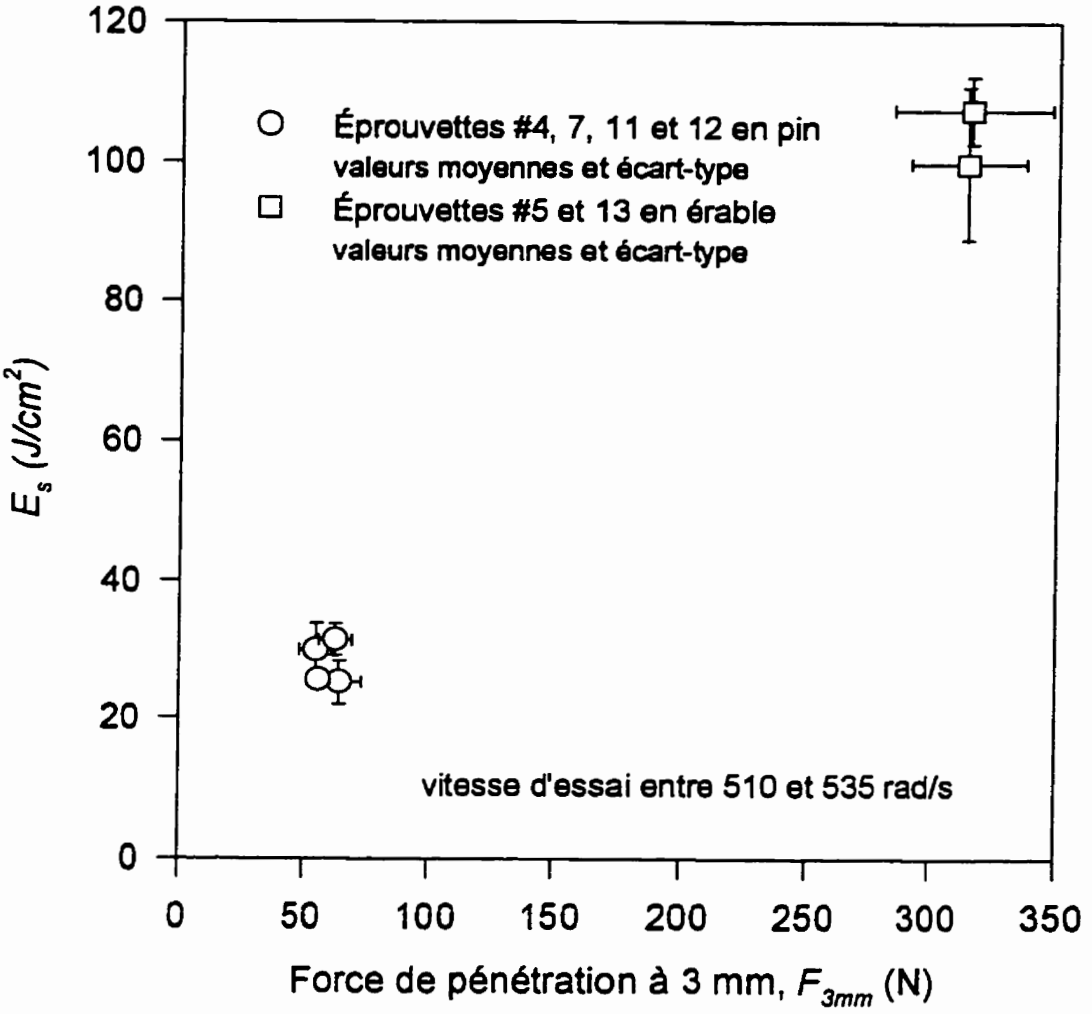



**Figure 4.10** Variation de l'énergie spécifique de coupure en fonction de la dureté des éprouvettes

décrit à la section 3.4. Tous les essais ont été réalisés avec le volant G (20,3 cm). Le calcul de la surface de la section droite coupée des caoutchoucs est de 1,89 $cm^2$.

*b) Résultats*

Les résultats des essais sont résumés au tableau 4.12 qui montre une très grande dispersion pour les paramètres $t_c$ et $E_m$. Pour le caoutchouc SBR, les valeurs de C.V. varient entre 25 et 60%, et ce pour les deux variables $t_c$ et $E_m$; cependant, pour le néoprène elles sont dans la plage de 11 à 27%. La dispersion des résultats diminue avec l'augmentation de la vitesse d'essai. L'énergie de coupure $E_m$ (ou $E_s$) pour le néoprène est nettement plus élevée que celle calculée pour le caoutchouc SBR, pour les vitesses supérieures à 460 rad/s. Cette différence est principalement due aux matériaux eux-mêmes. En effet, pour les caoutchoucs synthétiques des particules constituantes appelées de charges ou bien encore impuretés, sont ajoutées au polymère dans une proportion pouvant atteindre 40% comme c'est le cas pour le styrène-butadiène. Ces charges ont une influence sur les propriétés mécaniques des caoutchoucs. De plus, la dureté du néoprène utilisée est plus élevée que celle du caoutchouc SBR. Ces deux raisons, impuretés dans les matériaux et dureté, pourraient expliquer les résultats plus élevés pour l'énergie de coupure du néoprène.

De façon générale, pour une même série d'essais, le niveau de dispersion de l'énergie $E_m$ est le même que celui obtenu pour le temps de traversée ($t_c$). Malgré les niveaux élevés de dispersion, il apparaît clairement que le temps de traversée moyen diminue

avec l'augmentation de la vitesse. Vu l'ampleur de la dispersion des résultats expérimentaux, il est difficile d'établir s'il y a une relation ou non entre la quantité d'énergie absorbée et la vitesse d'essai (figure 4.11).

L'évaluation de l'énergie par unité de surface (énergie spécifique) de la section droite coupée, $E_s$, permet de comparer de façon rationnelle la quantité d'énergie absorbée (par unité de surface) entre les différents matériaux. D'après les résultats obtenus, 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. Ceci veut dire que la résistance à la coupure des caoutchoucs est la meilleure de tous les matériaux examinés.

**Tableau 4.12** Valeurs moyennes du temps de traversée et de l'énergie de coupure pour l'ensemble des essais sur les caoutchoucs

| Matériau | N | Vitesse (rad/s) | $t_c$ (s) | | $E_m$ (J) | | $E_s$ (J/cm$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\mu$ | C.V.(%) | $\mu$ | C.V.(%) | $\mu$ |
| Néoprène (70 DURO) | 7 | 361 | 0,492 | 27,4 | 269,1 | 26,8 | 142,3 |
| | 6 | 468 | 0,422 | 23,5 | 321,5 | 22,7 | 170,1 |
| | 4 | 571 | 0,328 | 11,4 | 292,7 | 16,0 | 154,9 |
| Caoutchouc (60 DURO) | 8 | 361 | 0,474 | 59,1 | 252,3 | 55,2 | 133,5 |
| | 5 | 464 | 0,212 | 43,2 | 168,5 | 31,9 | 89,2 |
| | 6 | 573 | 0,177 | 26,6 | 184,0 | 24,0 | 97,4 |

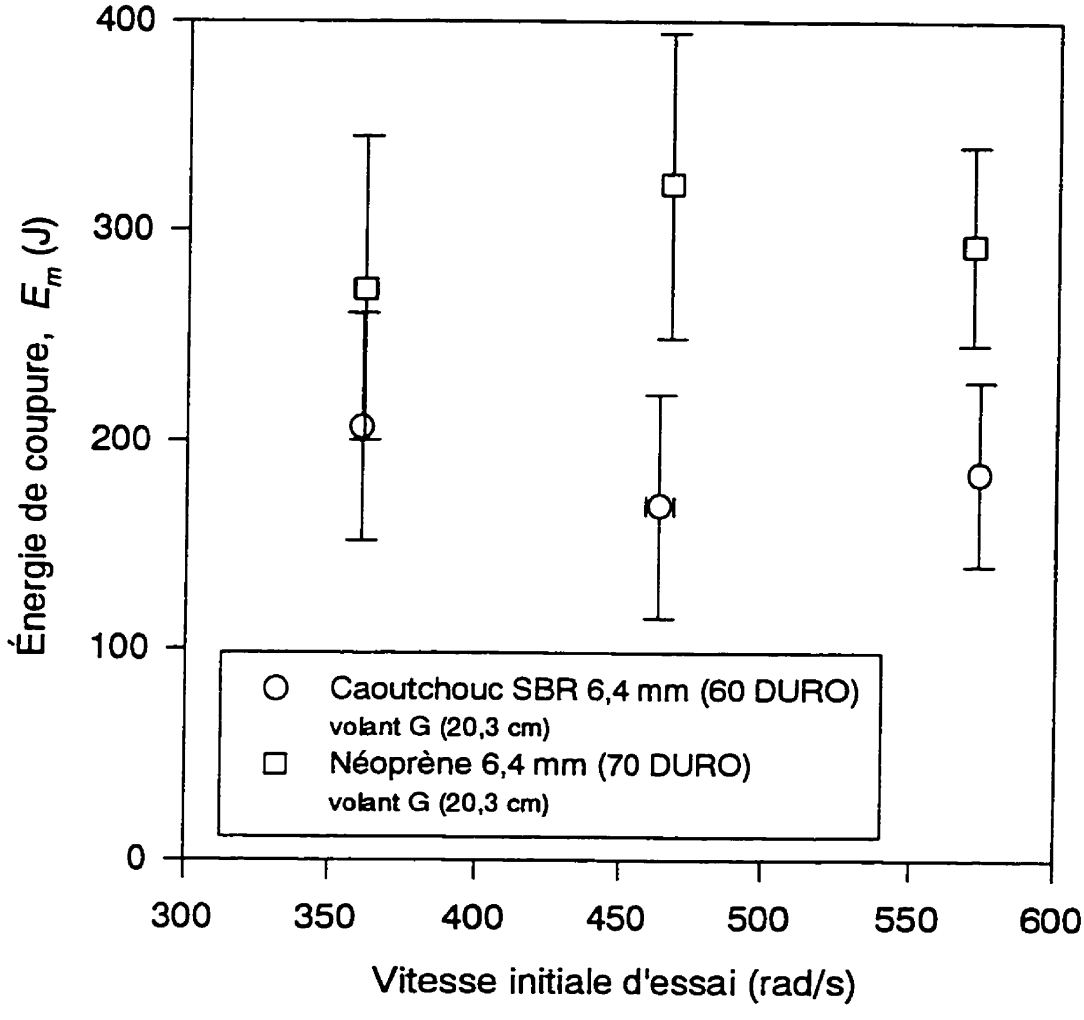



**Figure 4.11** Variation de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai pour le caoutchouc SBR et le néoprène

Les matériaux caoutchouteux évalués ne sont donc pas indiqués pour être utilisés comme matériaux d'étalonnage, mais ils reflètent bien la capacité du banc d'essai à discerner les variations du temps de traversée et de l'énergie liées aux matériaux eux-mêmes.

Les résultats obtenus avec les caoutchoucs indiquent qu'on doit s'attendre à une grande dispersion des résultats pour les bottes fabriquées en caoutchouc, et que pour maintenir la dispersion des résultats au minimum, il y a avantage à évaluer les bottes à une vitesse de 525 rad/s et plus, en utilisant le volant G (20,3 cm).

Il est également instructif de souligner ici que quelques essais ont été effectués sur un caoutchouc beaucoup plus souple, une mousse de silicone; ce matériau ne présente aucune résistance au passage de la chaîne. Le temps de traversée mesuré, 0,007 s, correspond au passage de deux dents consécutives de la chaîne : la première pour le contact sur la face supérieure du matériau et la seconde pour la face inférieure de la feuille de silicone. Ces essais permettent de constater la sensibilité de la méthode d'essai. En effet, si le matériau offre peu de résistance face à la scie à chaîne, le matériau se coupe facilement avec une paire de ciseau et la performance du matériau évaluée par la méthode d'essai proposée est presque nulle.

## 4.3 ESSAIS SUR LES BOTTES DE PROTECTION

*a) Énergie de coupure*

La première phase d'évaluation des bottes porte sur un nombre restreint d'échantillons. La résistance à la coupure de plusieurs types de bottes a été évaluée. Ces bottes peuvent

être décrites de la façon suivante:

- des bottes de cuir sans protection spécifique contre les scies à chaîne (bottes A et B);
- des bottes de cuir avec deux couches de nylon protecteur (botte C);
- des bottes tout en caoutchouc conçues pour la protection contre les scies à chaîne (botte D);
- des bottes avec la partie du pied en caoutchouc et la tige en cuir (botte E et F).

Pour toutes les bottes, la résistance à la coupure est évaluée près de l'embout protecteur en acier, et sur la tige de la botte (botte B seulement). Tous les essais ont été réalisés avec le volant G à une vitesse initiale d'environ 520 rad/s. Pour chaque condition d'essai, deux tests ont été effectués.

La figure 4.12 résume les résultats obtenus pour ces types de bottes. Les valeurs rapportées sont celles mesurées près de l'embout protecteur, sauf dans le cas de la botte B où l'énergie pour couper la tige de la botte est également indiquée. Pour les essais effectués près de l'embout de protection, le niveau d'énergie requis pour couper de part en part les bottes A et B, sans protection spécifique contre les scies à chaîne, est de 100 à 150 J. Ce niveau d'énergie correspond environ à celui mesuré avec des éprouvettes de pin, lors d'essais effectués avant et après les essais sur les bottes, et cela pour une même vitesse initiale.

De plus, l'énergie pour couper la botte C (550 J), botte de cuir avec un matériau textile

pour la protection, est près du niveau d'énergie de coupure des éprouvettes en érable. Cette énergie est 5 fois plus élevée que celle requise pour couper la botte A. Les bottes E (280 et 850 J) ont été coupées par la scie à chaîne mais, nécessite de 2 à 7 fois plus d'énergie que la coupure d'une éprouvette de pin. Cette comparaison des bottes avec les éprouvettes de bois, montre l'importance de l'étalonnage du banc d'essai, avec plus d'un matériau de référence.

Quant aux bottes de types D et F, elles n'ont pas été complètement traversées par la chaîne, malgré le niveau d'énergie initialement disponible de 2600 J.

La surface de la section droite des bottes coupée par la scie à chaîne a été mesurée pour deux bottes (D et F) ayant un embout de caoutchouc. Seule la section près de l'embout protecteur a été considérée. L'instrument utilisé pour ce faire permettait de rapporter le profil de la section, avant et après l'essai, sur du papier graphique millimétrique. La surface entre les deux courbes tracées correspond à la surface de la section droite coupée par la scie à chaîne. Le tableau 4.13 présente les niveaux d'énergie de coupure $E_m$ et $E_s$ pour ces bottes. Les mesures de section n'ont pas été effectuées sur les bottes de cuir (A, B et C) et sur la botte E, car ces bottes étaient déformées après l'essai et rendaient la mesure impossible. En se basant sur les valeurs de la surface coupée ($A_s$), l'énergie spécifique $E_s$ associée à la coupure près de l'embout de protection de chaque botte, est rapportée au tableau 4.13; elle met en évidence la capacité de résistance des matériaux utilisés dans la fabrication des bottes contre la coupure par la scie à chaîne.

**Tableau 4.13** Énergie de coupure pour différents types de bottes

| Description de la botte | modèle | traversée | $A_s$ ($cm^2$) | $E_m$ (J) | $E_s$ ($J/cm^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| tout en caoutchouc | D | non | 3,2 | > 2620 | 815 |
| embout de caoutchouc et de textile; tige de cuir | F | non | 3,9 | > 2580 | 655 |

*b) Comparaison avec les résultats déjà obtenus par une autre méthode*

Les valeurs obtenues avec cette méthode d'essai correspondent au classement établi en utilisant une scie à chaîne électrique, ARTEAU et TURCOT (1992), au lieu d'un volant d'inertie, comme le montre le tableau 4.14. Dans la méthode utilisant une scie électrique, l'évaluation de l'énergie est basée sur une mesure de la puissance électrique consommée, et dans la présente méthode le calcul de l'énergie est basé sur la mesure de la puissance mécanique transmise du volant à la scie. Par rapport à la méthode de volant d'inertie, la méthode utilisant un moteur électrique donne des valeurs d'énergie plus basses pour les bottes identifiées sans protection (A) et avec une protection moyenne (C) alors que les résultats de mesure montrent une plage de chevauchement pour les bottes dont le pied est en caoutchouc (E). Quant au modèle de botte tout en caoutchouc (D), la scie à chaîne n'a pu le traverser et ce, avec les deux méthodes d'essais. Il y a un bon accord sur le classement des bottes quand une seule méthode de mesure est considérée. Cependant, vu que les méthodes de l'énergie de coupure ne sont pas identique dans les deux cas, une utilisation mixte de ces deux méthodes n'est pas indiquée. Il est à noter que la méthode avec le volant d'inertie est une mesure plus

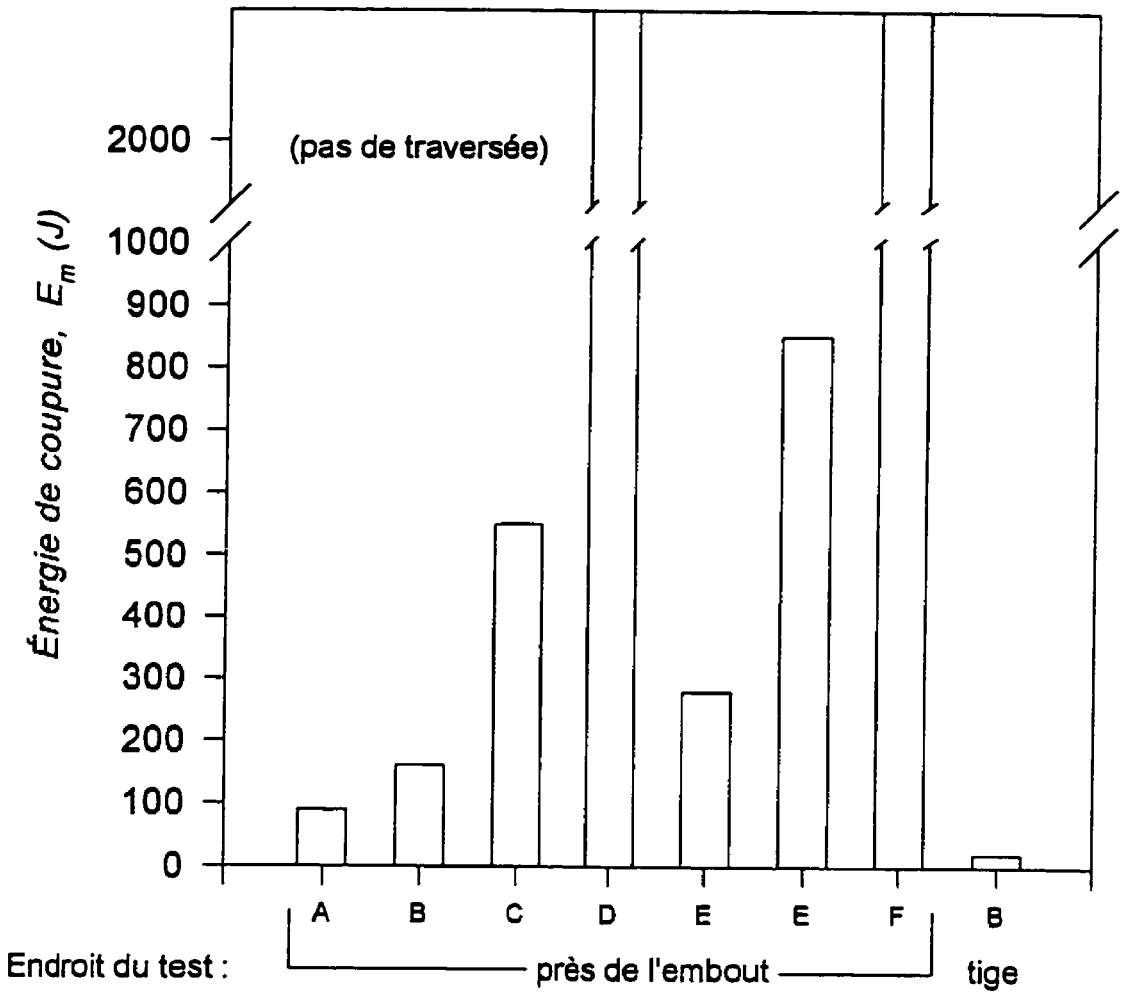
directe de l'énergie pour couper un échantillon et elle n'est pas affectée par les pertes internes dans un moteur comme c'est le cas avec la scie à chaîne électrique. En effet, pour le dernier cas, ces pertes sont incluses dans la quantité d'énergie mesurée et le pourcentage de ces pertes augmente de façon significative pour les essais sur les matériaux très résistants ; ce pourcentage peut atteindre 50% dans certains cas. Pour cette raison, les valeurs de l'énergie de coupure seront plus élevées lors des essais avec des matériaux très résistants et tenaces.

**Tableau 4.14** Comparaison des niveaux d'énergie de coupure $E_m$ des bottes de protection à partir de deux méthodes d'essai

| BOTTE | id. | MÉTHODE D'ESSAI | |
|---|---|---|---|
| | | **VOLANT D'INERTIE** [présent travail] | **SCIE À CHAÎNE ÉLECTRIQUE** [2] |
| cuir sans protection | A | 100 J | 30 J |
| cuir + 2 couches de nylon | C | 550 J | 200 J |
| embout en caoutchouc et tige en cuir | E | 280 à 850 J | 480 à 1 200 J |
| tout en caoutchouc | D | pas de traversée (2 600 J après 6 s) | pas de traversée (1 600 J après 2 s) |

Une comparaison entre les résistances à la coupure des matériaux examinés dans ce travail montre que l'énergie de coupure par unité de surface des bottes est plus grande que celles des échantillons en néoprène, et très supérieure à celles obtenues avec les éprouvettes de bois. En particulier, pour les bottes les plus résistantes, le rapport de

l'énergie est de l'ordre de 5 pour le rapport bottes/néoprène et de 25 pour le rapport bottes/pin.




Type d'échantillon

botte A: botte 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
botte E: embout de caoutchouc et tige de cuir
botte F: embout de caoutchouc + textile et tige de cuir

**Figure 4.12** Énergie de coupure, $E_m$, pour différents types de bottes

# CHAPITRE 5

# DISCUSSION

Pour la mise au point de la méthode d'essai avec volant d'inertie, deux paramètres principaux ont été considérés pour l'évaluation de la résistance des matériaux à la coupure, soit le temps de traversée et l'énergie de coupure (incluant le frottement). Dans ce chapitre, le choix du paramètre pour définir le critère de performance sera discuté et justifié. Par la suite, l'influence du volant sur le niveau moyen d'énergie de coupure des échantillons sera analysée. Cela amènera à considérer la mesure du niveau d'énergie de coupure (incluant le frottement) en se basant sur les vitesses initiale et finale du volant d'inertie. Les avantages à utiliser les mesures d'énergie par unité de surface coupée ainsi que les possibilités offertes par les matériaux d'étalonnage seront mises en évidence. Finalement, la reproductibilité de la méthode qui joue un rôle important dans le contrôle de qualité du produit sera discutée.

## 5.1 CHOIX DU PARAMÈTRE POUR LE CRITÈRE DE PERFORMANCE

Le niveau de performance d'un matériau doit être évalué suivant un critère basé sur un paramètre dont la propriété physique est facilement mesurable et ne dépend pas de facteurs géométriques. De plus, la fiabilité de la méthode de mesure assure la répétitivité des résultats. L'énergie de coupure répond à la première caractéristique énumérée et l'énergie spécifique de coupure, $E_s$, possède les deux caractéristiques recherchées. Par contre, le temps de traversée ne peut être retenu, vu que le classement est plus difficile

à obtenir, car les résultats dépendent de la vitesse initiale d'essai contrairement à l'énergie. En se référant à l'énergie, la résistance à la coupure des matériaux étudiés a été établi comme suit, par ordre croissant: le pin, l'érable et le caoutchouc (SBR et néoprène).

Les essais réalisés sur les éprouvettes de pin et d'érable sont répétitifs. Pour ces matériaux, les coefficients de variation de $E_s$ (ou $E_m$) et $t_c$ sont très acceptables ($< 15\%$), les coefficients de variation de l'énergie étant la plupart du temps inférieurs à ceux des temps de coupure correspondants.

L'énergie de coupure d'un matériau est un paramètre relativement facile à quantifier pour évaluer le degré de résistance, et par extension est un indice du degré de protection contre une scie à chaîne; cette énergie est presque nulle pour un temps de traversée instantané et prend une grande valeur (supérieure à 3 000 J) lorsque l'échantillon N,est pas complètement coupé. Ainsi, plus cette énergie grande, plus le degré de protection du matériau est grand.

Il s'avère donc qu'un critère de performance basé sur l'énergie ou bien sur l'énergie spécifique de coupure est plus fiable que celui basé sur le temps de traversée pour l'évaluation des matériaux de protection.

## 5.2 INFLUENCE DU CHOIX DU VOLANT

Comme il a été rapporté précédemment, le niveau d'énergie moyen, $E_m$, pour couper des éprouvettes de pin dépendait du volant utilisé. Au début du programme d'essais, il était escompté que l'énergie nécessaire pour couper un matériau soit constante, peu importe le volant utilisé. En effet, comme l'énergie de coupure ne dépend pas de la vitesse initiale du volant, le niveau d'énergie initiale de chacun des volants ne doit pas avoir une influence sur la mesure de $E_m$. Mais dépendant du volant d'inertie utilisé (P, M ou G), les caractéristiques dynamiques du système seront différentes.

De plus, dans tout système en rotation, la somme de tous les couples externes agissant sur le système est égale au produit de l'inertie et de l'accélération angulaire (MERIAM, 1975). Pour le système étudié, cela se traduit par:

$$T_r = I_T \alpha \qquad (5.1)$$

où

$T_r$ : couple résistant dû à la coupe du bois par la chaîne (incluant le frottement)

$I_T$ : inertie de toutes les pièces en rotation (annexe E)

$\alpha$ : accélération angulaire.

Lors des essais, l'appareil de mesure du couple permet d'enregistrer $T_r$, et l'énergie de coupure (incluant le frottement) est calculée en se basant sur cette valeur.

Le remplacement d'un volant par un autre modifie l'inertie totale ($I_T$) du système et change donc le terme de droite de l'équation 5.1. Ce terme est obtenu à partir des

valeurs globales de chaque essai. Ainsi, la valeur de $\alpha$ est déterminée par $[(\omega_f - \omega_i)/t_c]$. Quant au couple $T_r$, dans l'équation 5.1, il est mesuré de façon continue. Comme le signal du couple est constitué de beaucoup de crêtes dues aux chocs provoqués par les dents de la scie en contact avec le bois, et est parfois négatif (voir annexe B), il convient alors de quantifier l'énergie de coupure (incluant le frottement) à l'aide du terme de droite de l'équation 5.1. En effet, l'énergie totale de coupure (incluant les pertes) est égale à l'énergie cinétique initiale moins l'énergie cinétique finale du système en rotation. L'équation est alors:

$$E_T = \frac{1}{2} I_T \left( \omega_i^2 - \omega_f^2 \right) \qquad (5.2)$$

Le tableau 5.1 présente les valeurs calculées de l'énergie obtenue à partir du couple, $E_m$, ainsi que l'énergie totale, $E_T$, provenant des données enregistrées pendant les essais. Pour fin de comparaison de l'énergie mesurée avec chacun des volants, seuls les échantillons ayant des duretés similaires sont retenus. Ainsi, la deuxième colonne du tableau montre que le groupe d'éprouvettes Nos 10 et 11 ont une dureté similaire à celles du groupe d'éprouvettes No. 16 et 17, de même qu'à celles du groupe 14 et 4. Les valeurs de $E_m$ et les valeurs de l'énergie totale, $E_T$, ainsi que leurs valeurs respectives d'énergie corrigée pour la dureté et la géométrie des éprouvettes, $(E_m)_{d,s}$ et $(E_T)_{d,s}$, correspondent aux valeurs médianes. En effet, les variances ($\sigma^2$) de l'énergie totale, de même que celles de l'énergie corrigée, ne sont pas les mêmes pour les différents groupes de volant (P, M et G), ce qui indique que les éprouvettes utilisées pourraient ne pas

provenir d'une même population. Il convient alors, d'utiliser un test statistique d'analyse de la variance sur les rangs (Kruskal-Wallis) et les valeurs médianes sont alors utilisées dans ce test.

Les résultats de ce test statistique montrent que seules les différences observées entre les valeurs médianes de l'énergie totale corrigée pour la dureté et la géométrie, $(E_T)_{d,s}$, ne sont pas suffisamment grandes pour exclure la possibilité que ces différences soient dues uniquement à la variation aléatoire de l'échantillonnage ; il n'y a pas de différence statistiquement significative. Autrement dit, il y a 5% de chance de se tromper en affirmant que le volant choisi (P, M ou G) n'a pas d'influence sur le niveau total d'énergie corrigée.

**Tableau 5.1** Comparaison de l'énergie totale de coupure mesurée avec les différents volants pour des lots d'éprouvettes identiques

| Volant | Éprouvettes No. | N | $E_m$ (J) | $(E_m)_{d,s}$ (J/cm$^2$) | $E_T$ (J) | $(E_T)_{d,s}$ (J/cm$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| P | 10; ($F_{3mm}$=77,3 N )<br>11; ($F_{3mm}$=62,8 N ) | 23 | 146,6 | 24,9 | 224,7 | 38,2 |
| M | 16; ($F_{3mm}$=77,5 N )<br>17; ($F_{3mm}$=63,8 N ) | 32 | 186,0 | 28,6 | 249,4 | 38,4 |
| G | 14; ($F_{3mm}$=82,0 N )<br>4 ; ($F_{3mm}$=64,4 N ) | 32 | 207,0 | 31,1 | 260,1 | 39,1 |

L'énergie $E_T$ corrigée pour la dureté et la géométrie, n'est donc pas influencée par le choix du volant. Quant à la différence entre $E_m$ et $E_T$, elle pourrait provenir du fait que

le couple enregistré par le mesureur de couple ne représente pas le couple résistif associé à la coupure du matériau (incluant le frottement) et est possiblement relié au comportement dynamique du système ou à la réponse dynamique du mesureur de couple en régime dynamique. Par contre, si des essais étaient effectués avec le moteur maintenu en marche pendant l'essai, le couple mesuré par le capteur correspondraient au couple résistif qui serait égal au couple moteur et l'accélération angulaire serait nulle. Dans ce type d'essai, il ne serait plus possible d'évaluer l'énergie totale à partir de la variation de l'énergie cinétique du système, car il y a continuellement un apport externe d'énergie au système. Par contre, des essais avec le moteur maintenu engagé nécessiterait l'utilisation du mesureur de couple. D'autre part, le couple étant un signal enregistré en continu, il pourrait servir à évaluer le comportement des matériaux multicouches composant les équipements de protection lors d'essais avec le moteur désengagé.

## 5.3 ÉNERGIE PAR UNITÉ DE SURFACE

Comme il a été vu dans les sections précédentes, la valeur de l'énergie de coupure par unité de surface dépend du matériau évalué. Ainsi, pour couper certaines bottes de protection tout en caoutchouc, une grande quantité d'énergie par unité de surface était nécessaire, comparativement à d'autres types de caoutchouc ou à des éprouvettes de bois (plus de 25 fois $E_s$ du pin).

Les valeurs de $E_s$ mesurées pour le pin (30 J/cm$^2$ avec le volant M) correspondent aux valeurs publiées par Stacke [16] (27,3 J/cm$^2$). L'évaluation effectuée par cet auteur est

basée sur la mesure des forces réelles de coupe pour une bûche d'épinette Douglas, dans des conditions d'essais similaires à celles que nous avons pratiquées.

L'énergie par unité de surface permet d'établir un classement entre les différents matériaux, même si les échantillons sont de forme différente. Du point de vue du fabricant d'équipement de protection qui désire développer un nouveau produit ou améliorer un produit existant, la mesure de $E_s$ permet d'évaluer la capacité du matériau à dissiper l'énergie de la scie à chaîne. Il est alors plus facile de choisir les matériaux ou combinaisons de matériaux.

## 5.4 MATÉRIAUX D'ÉTALONNAGE

Le développement futur de la méthode d'essai en vue d'établir une norme pour évaluer la performance des équipements de protection contre une scie à chaîne requiert l'utilisation de matériaux d'étalonnage. Les résultats des tests sur ces matériaux permettent de s'assurer que tous les paramètres de la méthode d'essai sont bien contrôlés. Il faut évidemment que ces matériaux possèdent des propriétés physiques et mécaniques bien définies et constantes dans le temps. Les caoutchoucs évalués dans cette étude ne sont pas indiqués comme matériau de référence car il y a trop de variation dans leurs propriétés; ceci est dû principalement aux proportions des constituants (charges), aux propriétés des constituants eux-mêmes, et aux procédés de fabrication.

Pour la méthode d'essai décrite, il est avantageux d'utiliser au moins deux matériaux de

référence avec des valeurs de $E_s$ petite et grande, comme le pin ($E_s$ = 30 J/cm$^2$) et l'érable ($E_s$ = 100 J/cm$^2$). Afin de justifier le choix des matériaux de référence, il est nécessaire d'effectuer des essais sur différents matériaux ayant des caractéristiques physiques bien contrôlées. Cela permet de vérifier la répétitivité des résultats obtenus avec la méthode d'essai pour des matériaux de référence et ensuite valider les données compilées lors des essais effectués sur d'autres types d'échantillons, comme les équipements de protection.

## 5.5 REPRODUCTIBILITÉ DE LA MÉTHODE

La conception du banc d'essai proposé ici permet l'utilisation de tout type de moteur avec un contrôle pour vitesse variable; puisque le moteur n'est pas embrayé pendant la coupure, il n'influence donc pas la mesure des paramètres de coupure. Ainsi, la quantité d'énergie disponible associée à une vitesse initiale donnée ne dépend pas des caractéristiques du moteur.

Les volants utilisés comme réservoir d'énergie peuvent être facilement reproduits et ainsi fournir la même quantité d'énergie d'un montage à l'autre.

La mesure des temps d'arrêt à vide ($t_v$) permet de s'assurer de la condition de performance du banc d'essai. Ce temps indique si la période de réchauffement a été suffisante, si certaines pièces nécessitent un entretien (par exemple, le huilage des roulements à billes). L'inclusion du schéma de réchauffement dans un programme du

système de contrôle permet de minimiser les irrégularités associées au fonctionnement de différentes composantes. Tous ces contrôles permettent de réduire les coefficients de variation des variables évaluées.

Des essais préliminaires avec un volant M ont montré qu'une légère imprécision (diamètre de 18,97 mm) sur l'arbre de montage du volant va engendrer une variation de l'énergie de coupure en fonction de la vitesse initiale d'essai ($E_m = 172 + 0{,}15\omega$). Ainsi, pour s'assurer que la méthode soit reproductible, il faut bien contrôler la précision sur la fabrication de l'arbre de montage de chaque volant. Cet arbre ne doit pas être excentrique et doit avoir une tolérance dimensionnelle très faible sur le diamètre de 19,05 mm (0,750 po.), avec une limite inférieure nulle et une limite supérieure de +0,013 mm (0,0005 po).

# CHAPITRE 6

# CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

## 6.1 CONCLUSIONS

L'énergie dissipée au cours du processus de coupure a été considérée dans la mise au point d'une nouvelle méthode d'essai pour évaluer la performance des équipements de protection, contre les scies à chaîne, utilisés par les travailleurs forestiers. Cette énergie est fournie par un volant d'inertie tournant à haute vitesse. En utilisant le concept de mesure d'énergie, le couple pour entraîner la chaîne, la vitesse du volant et la période de temps pour couper l'équipement à évaluer sont pris en compte.

Les conclusions qui peuvent être tirées de cette étude sont les suivantes:

Pour une configuration spécifiée des échantillons, la méthode d'essai mise au point, basée sur l'énergie absorbée durant la coupure, permet de comparer la performance de différents matériaux de protection contre une scie à chaîne. La méthode est fiable car les résultats obtenus sont répétitifs.

Pour un volant donné, l'énergie spécifique requise pour couper un matériau, évaluée à partir de la mesure du couple, ne dépend pas de la vitesse initiale du volant. Cependant, il est apparu que cette énergie dépendait des caractéristiques du volant: sa valeur augmente avec la taille de ce dernier. D'autre part, si l'énergie de coupure est évaluée

à partir des mesures de vitesse, $(E_T)_{d,s}$, elle ne dépend ni de la taille du volant, ni de la vitesse initiale.

Puisque l'énergie requise pour la coupure (incluant le frottement) d'un échantillon en bois est proportionnelle à la dureté de ce dernier, l'utilisation d'un facteur de correction pour tenir compte de la dureté des éprouvettes provenant de différents lots permet de comparer la résistance à la coupure des éprouvettes entre elles. Cela s'avère important dans le cas où le bois est utilisé comme matériau de référence.

La mesure de l'énergie spécifique de coupure permet de comparer les performances de différents matériaux contre une scie à chaîne. L'utilisation de cette énergie faciliterait le choix des matériaux pour les fabricants de vêtements de protection.

La méthode proposée pour évaluer la performance d'un échantillon des produits finis (bottes) a été appliquée sommairement à quelques échantillons. Quoique la méthode permette de comparer la qualité de ces produits, des raffinements doivent être apportés pour en faciliter une utilisation étendue.

## 6.2 RECOMMANDATIONS

Il faudra mettre en place un plan d'études afin d'expliquer l'écart entre l'énergie spécifique de coupure évaluée à partir de la mesure du couple et celle évaluée à partir de la mesure des vitesses. Par exemple, cet écart pourrait provenir du comportement

dynamique du système ou de la réponse dynamique du mesureur de couple en régime dynamique. Pour vérifier le comportement du mesureur de couple, il est recommandé de compléter une série d'essais sur des éprouvettes de bois avec le moteur maintenu en marche durant tout le temps de la coupure.

Il est recommandé de compléter des essais avec un bois de dureté moyenne, comprise entre celle du pin et de l'érable, pour vérifier si la relation entre la dureté et l'énergie de coupure est linéaire. De plus, des essais pour évaluer la dureté devraient être effectués selon une norme précise, afin que la dureté soit incorporée dans la méthode d'évaluation de la performance des matériaux.

Des essais effectués sur d'autres caoutchoucs permettraient de vérifier si certains d'entre eux peuvent éventuellement servir de matériau de référence. L'usage d'un matériau caoutchouteux synthétique serait avantageux. En effet, lorsque les méthodes de production sont contrôlées, les propriétés physiques et mécaniques sont peu modifiées dans le temps.

Des essais supplémentaires permettraient de déterminer l'influence du type de chaîne utilisée, l'effet de l'usure des dents de la chaîne ainsi que l'effet de l'affûtage de la chaîne sur le niveau d'énergie nécessaire pour couper différents échantillons.

Des essais réalisés sur les équipements de protection utilisés par les travailleurs forestiers

permettraient de comparer la pertinence de la méthode par rapport aux méthodes d'essai existantes et d'évaluer les performances relatives des équipements. Pour faciliter la comparaison entre les équipements de protection, il est recommandé d'utiliser la mesure de l'énergie spécifique de coupure.

**Liste des références**

American Pulpwood Association, (1993), *Foot Protection for Chain Saw Users*, Voluntary standard, Washington D.C., Revised version.

ARTEAU, J. ET TURCOT, D., (1992), 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, Philadelphia.

ASTM F 1414-92a, (1992), Standard Test Method for Measurement of Cut Resistance to Chain Saw in Lower Body (Legs) Protective Clothing. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

ASTM F 1458-94, (1994), Standard Test Method for Measurement of Cut Resistance to Chain Saw of Foot Protective Device. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

BAILLARGEON, G., RAINVILLE, J., (1978), *Statistique appliquée, Tome 1 Calcul des probabilités et statistique descriptive.* Université du Québes à Trois-Rivière, Les éditions SMG, Trois-Rivières, Qué., Canada.

Bureau de normalistion du Québec, CAN/BNQ 1923-095-M90, (1990), *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.

EN 381-1 : 1993, *Vêtements de protection pour utilisateurs de scies à chaîne tenues à la main - Partie 1: Banc d'essai pour les essais de résistance à la coupure par une scie à chaîne*. Comité Européen de normalistion, Bruxelles.

EN 381-2 : 1995, *Vêtements de protection pour utilisateurs de scies à chaîne tenues à la main - Partie 2: Méthode d'essai pour les protèges-jambes*. Comité Européen de normalistion, Bruxelles.

EN 381-3 : 1996, *Vêtements de protection pour utilisateurs de scies à chaîne tenues à la main - Partie 3: Méthode d'essai pour les chaussures*. Comité Européen de normalistion, Bruxelles.

EN 381-1 : 1995, *Vêtements de protection pour utilisateurs de scies à chaîne tenues à la main - Partie 5: Exigences pour les protèges-jambes*. Comité Européen de normalistion, Bruxelles.

prEN 381-6 : 1996, *Vêtements de protection pour utilisateurs de scies à chaîne tenues à la main - Partie 6: Exigences pour les chaussures.* Comité Européen de normalistion, Bruxelles.

DOI, OSAMU ET YOKOYAMA, MASAO, (1975), Cutting Force Analysis of Wood, 1st Report, *Bulletin of the JSME*, Vol.18, No.122, 905-912.

GAMBRELL, S.C., (1966), Cutting Characteristics of Chain Saw Teeth, *Forest Products Journal*, 62-71.

MCKENZIE, W.M., (1962), The Relationship Between The Cutting Properties of Wood and Its Physical and Mechanical Properties, *Forest Products Journal*, 287-294.

MCKENZIE, W.M., (1960), Wood Cutting Process, *Forest Products Journal*, 447-456.

MILLER,I., FREUND, J.E., (1977), *Probability and Statistics for Engineers*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 2nd edition, 1977.

MONROE, G., (1980), *Test Device and Procedure for Testing Protective Pads for Chain Saw Operators*, Agricultural Engineering Department, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA..

MERIAM, J.L., (1975), *Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2nd edition, 1975.

PUTNAM, T., JACKSON, G. ET DAVIS, J., (1982), Chain Saw Chaps Redesign, EDT Report 9102, *U.S. Department of Agriculture, Forest Service*, Missoula, MT, 23p.

REYNOLDS, D.D. ET SOEDEL, W., (1972), Matching of Chain Saw Power Requirements With Engine Characteristics, *Forest Products Journal*, 56-60.

REYNOLDS, D.D., SOEDEL, W. ET ECKELMAN, C., (1970), Cutting Characteristics and Power Requirements of Chain Saws, *Forest Products Journal*, 28-34.

STACKE, L.-E., (1989), *Cutting Action of Saw Chains*, Department of Mechanical Engineering, Chalmers University of Technology, Goteberg, Sweden, 150p.

Statens Maskin-Provingar, (1990), *Testing of Protective Clothing for Users of Chain Saws*, Meddelande 3240, Umeä.

TURCOT, D., ARTEAU, J., DAIGLE, R., ET DROUIN, P., (1990), *Study Report Evaluation of the Performance of Protective Boots*, presented to Ontario Hydro, IRSST, Montréal.

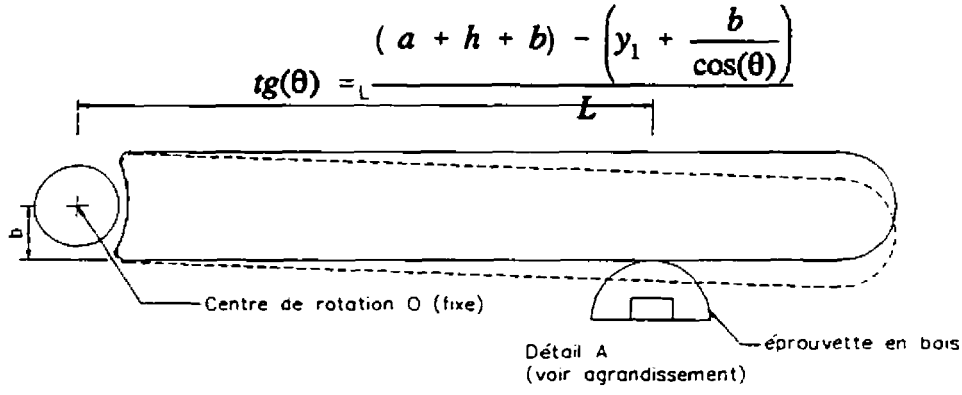
TURTIAINEN, K., (1979), *Comparaison of Test Methods Used for Durability Testing of Leg Shields for Chain Saw Users*, Vakola, Finnish Research Institute of Engineering in Agriculture and Forestry, Helsinki.

# ANNEXES

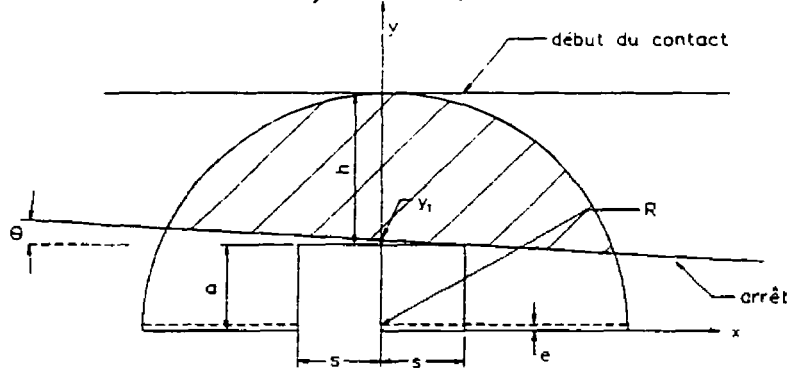
# ANNEXE A : CALCUL DE LA SURFACE DE LA SECTION DROITE COUPÉE DES ÉPROUVETTES

Selon les figures A.1a et A.1b, l'équation de la pente de la droite représentant le front de coupe lorsque la scie a complètement traversé l'éprouvette est :

$$tg(\theta) = \frac{(a + h + b) - \left(y_1 + \frac{b}{\cos(\theta)}\right)}{L} \qquad \text{(A.1)}$$




a) vue d'ensemble




b) section droite coupée de l'éprouvette

**Figure A.1** Géométrie de l'ensemble scie à chaîne et éprouvette pour le calcul de la section droite a)vue d'ensemble b)section droite coupée de l'éprouvette

où $y_1$ est l'ordonnée à l'origine de la droite inférieure, soit lorsque la scie a traversé l'éprouvette de part en part. Cette valeur peut s'exprimer en terme de $\theta$ de la façon suivante:

$$y_1 = s\ tg(\theta) + a \tag{A.2}$$

L'équation de la pente de la droite inférieure devient donc:

$$tg(\theta) = \left[\frac{h + b - \left(s\,tg(\theta) + \frac{b}{\cos(\theta)}\right)}{L}\right] \tag{A.3}$$

et en solutionnant pour $\theta$ (par substitution) on trouve:

$$\theta = 2tg^{-1}\left[\frac{1}{(h + 2b)}\left(-L - s + \sqrt{L^2 + 2Ls + s^2 + h^2 + 2hb}\right)\right] \tag{A.4}$$

Donc on obtient $\theta$, qui est complètement défini par la géométrie du banc d'essai.

L'équation de la droite inférieure à la position d'arrêt devient:

$$y = \frac{\left[s\,tg(\theta) + a + \frac{b}{\cos(\theta)}\right] - (a + h + b)}{L}\, x + (s\,tg(\theta) + a) \tag{A.5}$$

et l'équation de la partie circulaire du demi-cylindre, soit le moment du début du contact, prend la forme :

$$y = \sqrt{R^2 - x^2} - e \tag{A.6}$$

Les valeurs de $y$ sont obtenues en remplaçant les valeurs des constantes $h$, $b$, $L$ dans les équations A.5 A.6 et en solutionnant numériquement. Les racines de l'équation ($x_1$, $x_2$)

ainsi obtenues permettent de trouver l'aire comprise entre les deux courbes (cercle et droite).Ainsi la surface de la section droite coupée est égale à:

$$\int \left\{ \sqrt{R^2 - x^2} - e - \left[ \frac{\left( s \cdot tg(\theta) + a + \frac{b}{\cos(\theta)} \right) - (a + h + b)}{L} x + s \cdot tg(\theta) + a \right] \right\} dx \qquad \textbf{(A.7)}$$

Les bornes d'intégration sont données par les racines obtenues précédemment.

# ANNEXE B : OBSERVATIONS SUR LE SIGNAL DU COUPLE

La figure B.1 présente un agrandissement d'une portion du signal du couple enregistré pendant un essai de coupure dans une éprouvette de bois (pin). Il s'agit d'un signal typique observée pendant la coupure. Cet enregistrement met en évidence le caractère des chocs ("pics") perçut par le capteur et provenant de l'interaction entre les dents de la chaîne et l'éprouvette de bois évaluée. Un autre auteur, STACKE, obtient un graphique similaire pour la force de la chaîne, mesurée indirectement avec le guide-lame, qu'il enregistre lors d'un essai de coupure dans du bois (pin). A la différence près que le couple enregistre des valeurs négatives. Cela pourrait être du à deux choses principalement; soit le manque de rigidité torsionnel du système (mobilité des maillons de la chaîne) et/ou à une déflexion permanente de l'arbre d'entraînement. Cette déflexion pourrait être causée par les chocs répétés sur l'arbre d'entraînement ou par une tolérance moins serrée lors de la fabrication des deux sections de l'arbre d'entraînement.. Cette déflexion ou excentricité de l'arbre peut-être très faible (moins de 0,001 po.) et engendrée des valeurs négatives telles qu'observées sur le graphique.

Néanmoins, l'effet des parties négatives du signal du couple ne changent pas l'interprétation des résultats. Tout au plus il s'agit d'un biais qui est le même pour tous les essais effectués et qui pourrait être corrigé, dans une étape subséquente.

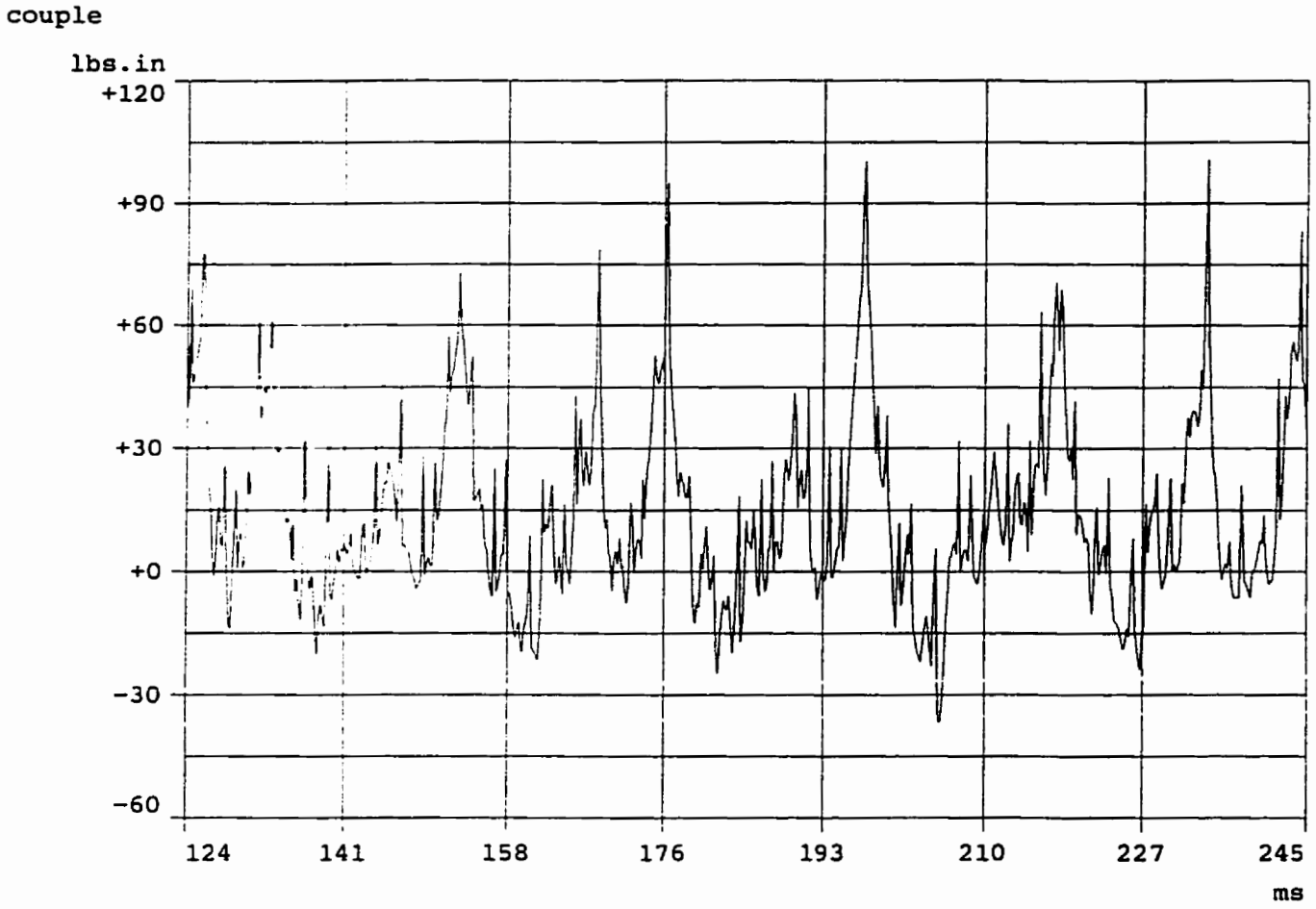



**Figure B.1** Extrait d'un signal typique du couple

# ANNEXE C : PÉRIODE DE RÉCHAUFFEMENT

## MÉTHODE D'ESSAI : VOLANT D'INERTIE

Avant chaque essai, le banc devra fonctionner à vide pendant les périodes de temps spécifiées au tableau C.1. Ces périodes varient en fonction de l'utilisation du banc d'essai. Selon les observations faites, une période de fonctionnement à vide plus longue est nécessaire lorsque le banc d'essai n'a pas été utilisé depuis plus de deux jours (tableau C.1). Pour les périodes où le banc d'essai est utilisé quotidiennement, une période de fonctionnement à vide beaucoup plus courte que la précédente, sera suffisante (dernière colonne).

Tableau C.1 Temps de fonctionnement à vide avant un essai

| VITESSE de l'essai | Après une période d'inactivité de plus de 2 jours | Quotidien |
|---|---|---|
| 210 rad/s | 10 min | 4 min |
| 315 rad/s | 5 min | ----- |
| 420 rad/s | 2 min | 2 min |
| 525 rad/s | 1 min | 1 min |

Note : Avant de poursuivre les essais après un réchauffement du montage, faire une pause de 5 minutes.

# ANNEXE D : PROCÉDURE D'ESSAI

La première étape consiste à préparer les bottes à évaluer pour pouvoir détecter le début et la fin de la coupure. Pour ce faire, un papier d'aluminium collé sur le dessus de la botte et un second collé à l'intérieur de la botte serviront de capteurs de début et d'arrêt.

Une fois ces capteurs installés, la botte est remplie de petites "billes" (diamètre moyen de 3 mm) en polystyrène afin qu'elle garde sa forme lorsqu'elle est évaluée. Elle est ensuite installée sur le support d'échantillon et positionnée de façon à assurer que le contact avec la chaîne soit perpendiculaire. La hauteur de chute est vérifiée (3,2 cm).

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

Le garde recouvrant le guide-lame est mis 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.

On laisse le système tourner à la vitesse spécifiée 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 collé à l'intérieur de la botte.

# ANNEXE E : CALCUL DE L'INERTIE DU SYSTÈME

L'inertie de toutes les pièces mécaniques en mouvement pour le banc d'essai est:

$$I_T = I_v + I_S$$

où $I_T$ est l'inertie totale du système, $I_v$ est l'inertie du volant utilisé et $I_S$ correspond à l'inertie de toutes les autres pièces mécaniques en mouvement, autre que le volant. Dans le banc d'essai, seul $I_v$ change lorsqu'on utilise les différents volants. Les valeurs de $I_v$ pour les différents volants sont les suivantes (calculée selon éq. 2.1):

- pour le volant P, l'inertie $5{,}079 \times 10^{-3}$ kg · m$^2$
- pour le volant M, l'inertie $10{,}532 \times 10^{-3}$ kg · m$^2$
- pour le volant G, l'inertie $33{,}288 \times 10^{-3}$ kg · m$^2$

La valeur de $I_S$ dépend de l'inertie des pièces suivantes:

- de l'embrayage (côté sortie) $9{,}18 \times 10^{-6}$ kg · m$^2$
- joint d'accouplement entre l'embrayage et le volant (négligeable)

- joint d'accouplement rigide entre le volant et le mesureur de couple

  calculé par l'équation

$$I = \frac{\rho \pi b}{2}(R_0^4 - R_i^4)$$

  $8{,}23 \times 10^{-5}$ kg · m²

- du mesureur de couple $4{,}5 \times 10^{-4}$ kg · m²

- de l'embrayage de protection (même équation que précédemment)

  $5{,}36 \times 10^{-4}$ kg · m²

- de la coupole joignant l'arbre au pignon d'entraînement de la chaîne

  (même équation que précédemment) $2{,}32 \times 10^{-4}$ kg · m²

- de la chaîne (selon Stacke [16] p. 71) $8{,}29 \times 10^{-6}$ kg · m²

- de l'ensemble des roulements à billes (4 à oreilles et 3 verticales)

  (non disponible et en principe négligeable)

Donc l'inertie des pièces mécaniques en mouvement, autres que le volant, est définie comme la somme des inerties des pièces précédentes et:

$$I_S \approx 1{,}3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

## ANNEXE F : CALCUL DES DROITES DE RÉGRESSION POUR $t_v/I_T$

Les détails de l'analyse de régression linéaire portant sur les variables $t_v/I_T$ et $\omega$, présentés à la figure 3.9, sont les suivants;

Les droites de régression sont $t_v/I = a\,\omega + b$

et les valeurs des paramètres $a$ (pente de la droite) et $b$ (ordonnée à l'origine) ainsi que l'erreur standard de chaque paramètre, indiqué entre paranthèses, sont

| Volant | N | $r^2$ | $a$ | $b$ |
|---|---|---|---|---|
| P | 15 | 0,98 | 1,35 (0,0459) | 163,1 (21,79) |
| M | 12 | 0,99 | 1,599 (0,0444) | 123,39 (18,77) |
| G | 24 | 0,96 | 1,29 (0,0573) | 96,64 (21,16) |

A partir de ces données, le test sur l'analyse de la variance des pentes des droites calculées, indique qu'il y a une différence statistiquement significative entre les valeurs moyennes.

Le détail est le suivant;

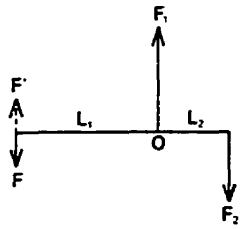
Comparaison multiple par paire

| | |
|---|---|
| volant P vs M | différence significative |
| volant M vs G | différence significative |
| volant P vs G | pas de différence significative |

Ces résultats, indique l'importance à apporter sur les tolérances des arbres des différents volants, pour s'assurer qu'ils sont tous identiques.

# ANNEXE E : MANUEL DU COUPLEMÈTRE, SECTION DYNAMIQUE

## TORQUE SENSORS A DISCUSSION—continued




In this case

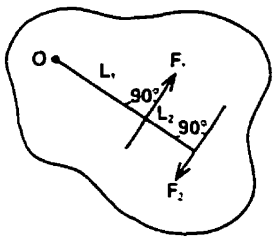
$$F = F_1 - F_2$$

and for equilibrium

$$F' \cdot L_1 = F_2 (L_1 - L_2)$$

and the resultant F' is equal and opposite to F.

But what is the resultant of two equal but opposite forces? In the drawing which follows forces $F_1$ and $F_2$ are equal, and parallel but act in opposite directions. The resultant is zero and the forces are said to constitute a *couple*. A couple tends to produce rotation and a measure of this




tendency is the *torque of the couple* which is given as the product of one of the forces and the perpendicular distance between them. This can be demonstrated by considering the sum of the moments of the two forces where the magnitude of $F_1$ equals the magnitude of $F_2$ or $\bar{F}_1 = \bar{F}_2 = F$ and we have

$$T_o = F(L_1 - L_2) - F \cdot L_1 = F(L_1 + L_2 - L_1) = F \cdot L_2$$

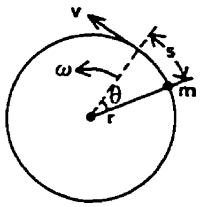
# DYNAMICS

Thus far, we have dealt with forces acting upon bodies at rest with respect to the observer, or in uniform motion, that is, in equilibrium. We now turn our attention to the influence of unbalanced forces acting upon bodies relative to the measurement of torque. In simple terms, our previous study dealt with statics. We will now deal with certain aspects of dynamics and rotation.

There is a parallel between linear and angular motion where angular displacement $\theta$, angular velocity $\omega$, and angular acceleration $\alpha$ are commonly measured in radians, radians per second, and radians per second² respectively. If we assume a shaft of radius r, we can relate linear velocity v and linear acceleration a to their angular counterparts as follows:

$$s = \theta \cdot r$$

Consider a particle of mass m on the surface of a shaft with radius r as shown in the following drawing.




From textbooks on the subject we can show that the kinetic energy KE of the particle of mass m is $\frac{1}{2} mv^2$. If we have particles of $m_1, m_2, m_3, \cdots$ with corresponding velocities $v_1, v_2, v_3, \cdots$ the total energy of motion is $\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} m_3 v_3^2 \cdots$, a most inconvenient quantity to calculate. Since $v_1 = \omega r_1$, $v_2 = \omega r_2$, $v_3 = \omega r_3$, etc. and $r_1, r_2, r_3$, etc. the distances of $m_1, m_2, m_3$, etc. from the axis of rotation it follows that the kinetic energy KE is $\frac{1}{2}\omega^2 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \cdots)$ since $\omega$, the angular velocity, is the same for all particles.

From Newton's Laws of Motion, inertia is the resistance offered by a body to a change of its state of rest or motion. In the rotation of a rigid body not only the bodies mass, but the axis of rotation determines the change in angular velocity resulting from the action of a given torque for a given time. With units of mass multiplied by length² the quantity $m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 \cdots$ is known as the *mass moment of inertia* J where

$$J = \sum (mr^2) = \int r^2 \, dm$$

and kinetic energy KE is expressed as

$$KE = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$$

Using the same approach, we may also define the moment of momentum or more commonly angular momentum as

$$\text{Angular Momentum} = J \cdot \omega$$

An important principal of dynamics is that mass m multiplied by acceleration a, in any direction, of a small mass is equal to the resolved parts in that direction of all the forces F acting on the mass.

It is possible to extend this principal to rotation and to state that the algebraic sum of the moments of the mass multiplied by acceleration is equal to the algebraic sum of the moments of the forces or

$$\sum F \cdot r = \sum ma \cdot r$$

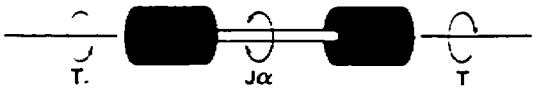
Further, in the case of a large, rigid body free to rotate about any axis, the algebraic sum of the moments of the mass multiplied by acceleration equals the algebraic sum of the moments of the external forces, because the actions and reactions of internal forces cancel. This means that I multiplied by $\alpha$ is equal to the sum of moments of all external forces where $a = \alpha \cdot r$ and

Since for a rigid body $\alpha$ is the same for all particles then the sum of all the external torques equals $J \cdot \alpha$ or

$$T = T_r = J \cdot \alpha$$

If there are no external torques acting on the body $J \cdot \alpha = 0$ and $J \cdot \omega$ or angular momentum is a constant and we have the relationship for forces in equilibrium:

$$T = = T_r$$




As we have already shown, in any rotating system, the sums of all the external torques equals the product of the rotating inertia and the angular acceleration or

$$T = T_r = J \cdot \alpha$$

Where

T = Applied torque, or torque of device under test
$T_r$ = Load torque or resisting torque
J = Inertia of all rotating components
$\alpha$ = Angular acceleration

Re-writing the above:

$$T = T_r = J \cdot \alpha$$

This equation points out that the torque of the test device and the load are equal only when the angular acceleration is zero. When the shaft is being accelerated, the torque of the test unit will be greater than that of the load; and the converse will occur during deceleration.

If measurements must be made under accelerating conditions, the device being tested can be mounted on a *Torque Table®*. Readings from the *Torque Table®* will be an accurate representation of the total torque developed by the device under test to overcome the load torque as well as the torque, the result of acceleration (or deceleration) of the shaft.

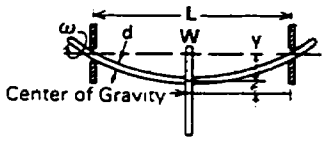
It is interesting to note that the *Torque Table®* can also be used to measure the torque due to bearing friction and windage losses. This is accomplished by allowing the motor under test to coast to a stop with the load free to rotate by inertia alone. In this manner the load because of its large inertia drives the device under test. As there is no power applied to the device under test, the output of the *Torque Table®* is a true representation of the torque caused by bearing friction and windage losses.

# CRITICAL SPEED

At certain speeds and under various conditions of loading and support, a rotating shaft will become dynamically unstable. The resulting vibrations and deflections that occur can result in failure not only to the shaft but to the elements of which the shaft is part. The speeds at which such dynamic instability occurs are called the critical speeds: $N_c$ of the shaft. Though there is more than one value for $N_c$ we will concern ourselves with the first or lowest value.

For a rotating shaft, the rotational speed (RPM) is critical when synchronized with $\omega_n$ the natural circular frequency of transverse vibration. Further, the critical speed of any arrangement of shafts is coincident with the natural frequency of the shaft system, vibrating laterally as a simple supported beam.

In this section, we will discuss *natural circular frequency* $\omega_n$ and its relationship to critical speed. In another section, we discussed the frequency of free vibration of a shaft also referred to as the natural frequency $\omega_n$. The two should not be confused.




Consider a uniform shaft of length L, diameter d as shown above, simply supported and with a disk of weight W centrally located on the shaft.

We find from structural handbooks that the central static deflection $\Delta$ assuming the weight of the shaft as negligible is

$$\Delta = \frac{WL^3}{48EI_e}$$

where E is the modulus of elasticity and $I_e$ its area moment of inertia. At any other deflection y there will be a spring force F tending to restore equilibrium where

$$F = \left(\frac{48EI_e}{L^3}\right) y = \left(\frac{W}{\Delta}\right) y = K \cdot y$$

and where K represents the shafts spring constant. For the condition of dynamic equilibrium of the shaft at any instant and without proof, we may state that the lateral vibration frequency $\omega$ is

$$\omega = \sqrt{\frac{Kg}{W}} = \sqrt{\frac{48EI_e\, g}{WL^3}} \text{ radians/sec.}$$

Or we have that

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{48EI_e\, g}{WL^3}} \text{ cps}$$

By substitution, we may, therefore, show that

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\Delta}}$$

and that

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\Delta}}$$

But be sure there is no confusion. $\Delta$ is the static deflection due to the weight under gravity and not its amplitude of oscillation caused by deflection y. The amplitude of free harmonic oscillation depends only on the starting conditions. The frequency depends upon springs and masses. There is no relation between the two.

With this in mind, we now consider the same shaft rotating at a circular frequency $\omega$. Due to machining errors, the

Source :Lebow, *Transducer Design Fundamentals, Product Listings*, Load Cell and Torque

# ANNEXE H : CALCUL DES PERTES ASSOCIÉES AU FROTTEMENT

Dans un premier temps, les pertes par frottement sont déterminées en se basant sur les essais à vide enregistrés. En effet, dans ces essais, seul le frottement agit. Ces données permettent d'évaluer un couple de frottement moyen ($T_f$), et par la suite, ce couple de frottement sera utilisé dans les essais de coupure effectués sur les éprouvettes de bois, pour déterminer le pourcentage de perte associé au frottement.

Soit $E_F$, l'énergie due au frottement (pour les essais à vide):

$$E_F = \int_0^{t_v} T_f \, \omega dt \qquad \text{(H.1)}$$

et en remplaçant $\omega$ par sa valeur, $\omega = \omega_i + \alpha t$, dans l'équation (H.1), on obtient

$$E_F = \int_0^{t_v} T_f \, \omega_i \, dt + \int_o^{t_v} T_f \, \alpha \, t \, dt \qquad \text{(H.2)}$$

En considérant que la valeur de $\alpha$ est constante et égale à $[(\omega_f - \omega_i)/t_v]$, et que la vitesse finale $\omega_f$ est nulle, l'énergie de frottement est alors égale à:

$$E_F = \frac{1}{2} T_f \, \omega_i \, t_v \qquad \text{(H.3)}$$

ainsi, le couple moyen de frottement, $T_f$, est égale à:

$$T_f = \frac{2\ E_F}{\omega_i\ t_v} \qquad \textbf{(H.4)}$$

De plus, l'énergie perdue sous forme de frottement ($E_F$) dans les essais à vide est égale à la quantité d'énergie initiale dans le système, soit:

$$E_F = \frac{1}{2}\ I_T\ \omega_i^2 \qquad \textbf{(H.5)}$$

A partir des valeurs enregistrées dans les essais à vide et de la quantité d'énergie perdue sous forme de frottement (éq. H.5), l'équation H.4 permet d'établir une relation entre le couple de frottement et la vitesse pour chacun des volants (tableau H.1), pour des vitesses d'essais comprises entre 100 et 700 rad/s.

**Tableau H.1** Équation du couple moyen de frottement pour chacun des volants

| Volant | N | Équation du couple moyen de frottement | corrélation ($r^2$) |
|---|---|---|---|
| P | 15 | $T_f$=3,179 × $10^{-4}$ $\omega$ + 0,424 | 0,84 |
| M | 12 | $T_f$=2,34 × $10^{-4}$ $\omega$ + 0,421 | 0,93 |
| G | 40 | $T_f$=3,107 × $10^{-4}$ $\omega$ + 0,53 | 0,52 |

Par la suite, l'énergie perdue sous forme de frottement dans les essais de coupure réalisés sur les éprouvettes de bois, a été évaluée de la même manière que précédemment, soit:

$$E_F = \frac{1}{2} T_f t_c \omega_m \qquad \textbf{(H.6)}$$

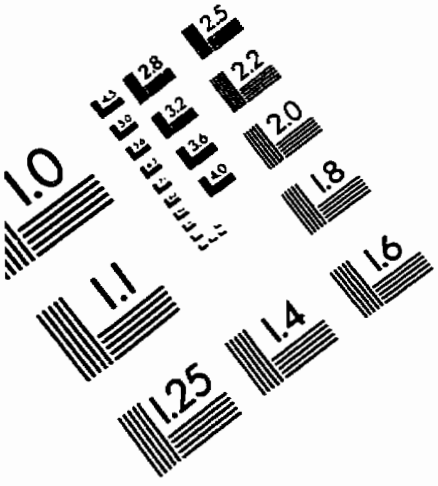
La vitesse angulaire moyenne ,$\omega_m$, est utilisée, conjointement avec le couple de frottement moyen pour évaluer l'énergie de frottement. Les résultats obtenus sont présentés au tableau H.2. Dans ce tableau, le pourcentage de perte est calculé par rapport à l'énergie totale nécessaire à la coupure, $E_T$. L'énergie totale est obtenue par l'équation suivante;

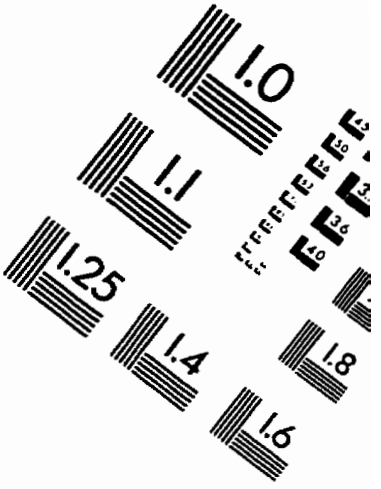
$$E_T = \frac{1}{2} I_T \left( \omega_i^2 - \omega_f^2 \right) \qquad \textbf{(H.7)}$$

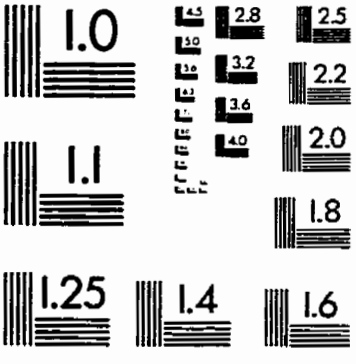
**Tableau H.2** Évaluation des pertes par frottement lors des essais de coupure

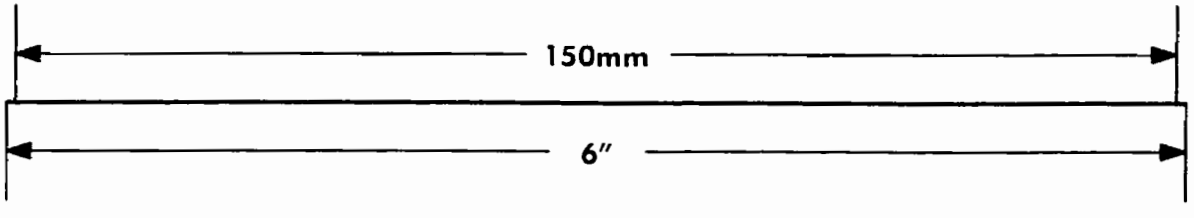
| Volant | éprouvettes no. | $E_T$ (J) | $E_f$ (J) | % pertes |
|---|---|---|---|---|
| P | 10 et 11 | 224,7 | 41,0 | 18 |
| M | 16 et 17 | 249,4 | 44,4 | 18 |
| G | 14 et 4 | 260,1 | 56,4 | 22 |

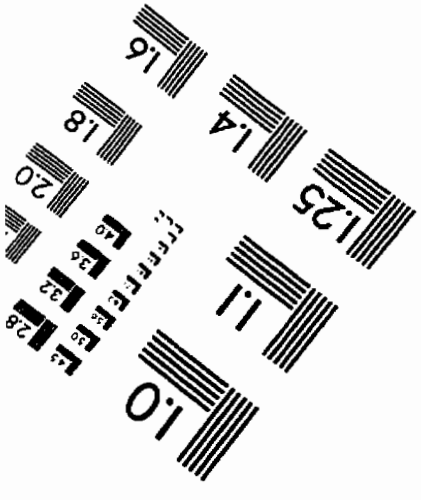
# IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

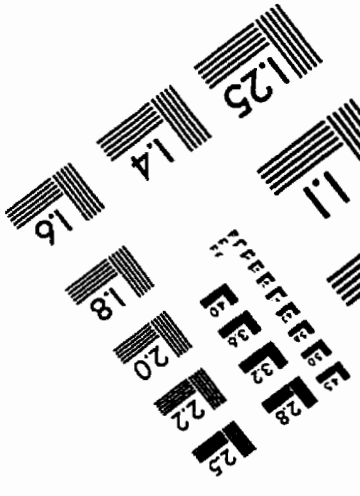



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved