



HAL
open science

Détermination des facteurs influençant la coupe et la qualité des plaquettes issues du déchetage du bois par des machines forestières

Rémi Georges

► **To cite this version:**

Rémi Georges. Détermination des facteurs influençant la coupe et la qualité des plaquettes issues du déchetage du bois par des machines forestières. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. Français. NNT : 2010NAN10096 . tel-01746359

HAL Id: tel-01746359

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01746359v1>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

École Doctorale Sciences et Ingénierie Ressources Produits Procédés Environnement

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ – NANCY 1

Spécialité : Sciences du bois et des fibres

Présenté par

Rémi GEORGES

**Détermination des facteurs influençant la coupe et la qualité des plaquettes
issues du déchetage du bois par des machines forestières**

Soutenue le 22 Novembre 2010

JURY

Président du jury :

Jean-François Brillhac

Professeur, Université de Haute Alsace, Mulhouse

Rapporteurs :

Roger Hernández

Professeur, Université Laval, Québec

Henri Paris

Professeur, Université Joseph Fourier-1, Grenoble

Directeur de thèse :

Pascal Triboulot

Professeur, UHP – Nancy 1, ENSTIB, Épinal

Co -directeur de thèse :

Pierre-Jean Méausoone

Maître de conférences HDR, UHP – Nancy 1, ENSTIB, Épinal

Sébastien Auchet

Maître de conférences, UHP – Nancy 1, ENSTIB, Épinal

"Most people say that it is the intellect which makes a great scientist.
They are wrong: it is character"
Albert Einstein

Remerciements

Il est toujours difficile de remercier justement toutes les personnes qui ont pu nous aider durant une si longue aventure, d'autant qu'elles ont été nombreuses.

Tout d'abord mes remerciements vont à l'équipe de recherche du LERMAB en les personnes de M. Sébastien AUCHET, M. Pierre-Jean MÉAUSOONE et M. Pascal TRIBOULOT, pour avoir dirigé l'ensemble de mon travail, pour leurs disponibilités, leurs humours, leurs précieux conseils, et les orientations qu'ils m'ont fournies dans la réalisation de cette recherche. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements et de mon profond respect.

Je souhaite également remercier vivement M. Roger HERNANDEZ, Professeur à l'université Laval, et M. Henri PARIS, Professeur à l'université Joseph Fourier-1, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et pour le temps consacré à ce travail.

Je tiens également à remercier M. Jean-François BRILHAC, Professeur à Université de Haute Alsace, pour sa participation à mon jury de thèse.

J'adresse mes remerciements à M. Ziad KERDI, Professeur à l'université d'Alep, pour son soutien et ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Un grand merci aux personnels techniques de l'ENSTIB pour leurs soutiens et particulièrement à M. Jean-Jacques BALLAND et à M. Cédric MARIN pour l'aide apportée dans la réalisation du banc d'essais.

J'adresse mes remerciements aux personnels et aux étudiants de l'ENSTIB pour ce cadre et cet accueil chaleureux propres aux Vosges.

Une thèse n'en serait pas une sans l'encouragement d'amis qui m'ont apporté le soutien scientifique, philosophique et logistique dont j'avais besoin. Alexandre, Jérémie, Guillaume, Jérôme, Rémi, Johann, Claude, Hadi, César, Mourad, Andrzej et les autres, recevez ici l'expression de ma gratitude.

Enfin, je souhaite exprimer mes plus chaleureux remerciements à ceux qui sont là en toutes circonstances et qui m'ont encouragé depuis toujours : mon père, ma mère, mon frère, ma sœur et tous les membres de ma famille.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	3
Liste des figures	7
Nomenclature	11
Abréviations	12
Chapitre I. Introduction générale	13
Chapitre II. Plaquette forestière: bois déchiqueté et positionnement au sein du bois-énergie	17
II.1 Préambule	18
II.2 Définition des plaquettes forestières et les autre utilisations du bois déchiqueté	18
II.2.1 Plaquettes forestières	18
II.2.2 Plaquettes pour l'industrie papetière	19
II.2.3 Panneaux dérivés du bois	19
II.2.4 Litière pour animaux et absorbant industriel	20
II.2.5 BRF (Bois Raméal Fragmenté)	21
II.3 Les plaquettes forestières au sein du bois énergie	21
II.3.1 Enjeux économiques et écologique de l'essor du bois énergie en France	21
II.3.2 Différents formes du combustible bois :	25
II.3.2.1 Les bûches :	25
II.3.2.2 Les bûches de bois densifiées :	25
II.3.2.3 Les Pellets ou Granulés de bois :	26
II.3.2.4 Comparaison entres plaquettes forestières et les autres formes de bois énergie :	26
II.3.3 Influence de la granulométrie des plaquettes sur leurs processus de transformation	27
II.3.3.1 Les chaudières à bois	27
II.3.3.2 Le Pyrolyse / Gazéification	28
II.4 Conclusion	30
Chapitre III. Bois, matériau, structure et usinage	31
III.1 Matériau et structure	32
III.1.1 Catégories de bois	34
III.1.1.1 Les gymnospermes :	34
III.1.1.2 Les angiospermes :	35
III.1.2 Composition chimique	35
III.2 Lois d'usinage du bois et désignations pour le déchiquetage	36
III.2.1 Spécificité de production de plaquettes forestières	36
III.2.2 Géométrie du couteau	38
III.2.3 Arête de coupe	38
III.2.4 Modes de coupe en usinage du bois	39
III.2.4.1 Les modes de coupe pour les opérations d'usinage courantes :	39
III.2.4.2 Les modes de coupe spécifique au déchiquetage :	41
III.2.5 Angles de coupe	43
III.2.5.1 Les angles de coupe principaux :	43
III.2.5.1.1 Angle de coupe ou d'attaque (γ):	43
III.2.5.1.2 Angles de taillant (β):	44
III.2.5.1.3 Angle de dépouille (α):	44

III.2.5.1.4	Angles de coupe principaux en déchiquetage du bois :	45
III.2.6	Mouvement de coupe :	48
III.2.6.1	Modes du travail :	48
III.2.6.2	Équations temporelles de la trajectoire du couteau :	48
III.2.6.3	Variation de largeur de coupe (<i>b</i>):	49
III.3	Conclusion	50
Chapitre IV. Matériels de déchiquetage et le banc d'essais		51
IV.1	Introduction	52
IV.2	Déchiqueteuses forestières	52
IV.2.1	Type de déchiqueteuses selon leur capacité	52
IV.2.1.1	Les petites déchiqueteuses de jardin :	53
IV.2.1.2	Les déchiqueteuses portées ou tractés, actionnées par la prise de force d'un tracteur :	53
IV.2.1.3	Les déchiqueteuses de branches tractées, actionnées par leur propre moteur :	53
IV.2.1.4	Les déchiqueteuses mobiles de forte capacité	54
IV.2.2	Systèmes d'aménagement des déchiqueteuses	55
IV.2.3	Systèmes de coupe en déchiquetage	56
IV.2.3.1	Déchiquetage par vis sans fin conique :	56
IV.2.3.2	Déchiqueteuse à tambour :	57
IV.2.3.3	Déchiqueteuse à disque :	59
IV.2.3.4	Évaluation des trois systèmes de déchiquetage :	62
IV.3	Banc d'essais	63
IV.3.1	Unité de déchiquetage	65
IV.3.1.1	Problématique du contre couteau :	67
IV.3.2	Unité d'aménagement	68
IV.3.3	Système de mesure la vitesse du disque	70
IV.4	Conclusion	71
Chapitre V. Mieux maîtriser la granulométrie des plaquettes forestières		73
V.1	La formation des plaquettes	74
V.1.1	La formation du copeau lors l'usinage linéaire selon le mode de coupe B (90-0)	74
V.1.1.1	Type I – Copeau obtenu par fendage :	74
V.1.1.2	Type II - Copeau obtenu par compression faible :	75
V.1.1.3	Type III – Copeau obtenu par flambage :	76
V.1.2	La formation de copeau lors l'usinage linéaire selon le mode de coupe C (0 – 90)	78
V.1.3	La formation du copeau en déchiquetage (mode A (90-90))	79
V.1.3.1	Formation de copeau pour de faibles profondeurs de passe :	79
V.1.3.2	Le processus de formation des plaquettes pour une grande profondeur de passe :	83
V.2	Facteurs influencent la granulométrie des plaquettes	86
V.2.1	Ensemble des paramètres influents	87
V.2.2	Vitesse de coupe :	87
V.2.3	Angles de coupe et direction d'aménagement du bois	89
V.2.4	Saillie des couteaux	93
V.2.5	Relation entre l'épaisseur et la longueur de plaquettes	94
V.2.6	Diamètre et forme du bois déchiqueté	96
V.2.7	Caractéristiques mécaniques du bois	96
V.2.8	Température de bois et les variations saisonnières	97
V.2.9	Conclusion sur les facteurs influents	97
V.3	Protocole expérimental de détermination des facteurs influents sur la granulométrie des plaquettes forestières	99
V.3.1	Introduction	99
V.3.2	Conditions de coupe	99
V.3.3	Caractéristiques des éprouvettes	100
V.3.4	Protocole expérimental pour l'analyse granulométrique	101
V.3.5	Procédure de tamisage	102

V.3.5.1	Tamis utilisés :	102
V.3.5.2	Analyse de la précision des tamis et de la méthode utilisée :	104
V.3.5.2.1	Conditions de déroulement des tests :	104
V.3.5.2.2	Résultats de l'analyse :	104
V.3.6	Résultats et discussions	105
V.3.6.1	Observations générales sur le processus de déchiquetage :	105
V.3.6.2	Avance par dent (f_z) :	106
V.3.6.3	Vitesse de coupe (V_c) et l'angle de coupe réel (γ_r):	108
V.3.6.4	Angle de taillant (β) :	113
V.3.6.5	Observation à la loupe binoculaire des plaquettes produites:	115
V.3.7	Conclusion	118
Chapitre VI. Efforts et puissance de coupe en déchiquetage		121
VI.1	Effort de coupe	122
VI.1.1	Introduction	122
VI.1.2	Répartition des efforts de coupe en déchiquetage par disque	124
VI.1.3	Évolution des efforts de coupe	126
VI.1.4	Facteurs influents sur les efforts de coupe	127
VI.1.4.1	Angles de coupe :	128
VI.1.4.2	Longueur des plaquettes	129
VI.1.4.3	Vitesse de coupe :	129
VI.1.4.4	Humidité et température du bois :	129
VI.1.4.5	Frottement :	130
VI.2	Puissance de coupe et la consommation d'énergie	130
VI.2.1	Méthodes utilisées pour l'estimation de la puissance	130
VI.2.2	Facteurs influents sur la puissance et l'énergie spécifique de coupe	131
VI.3	Synthèse de l'état de l'art sur les facteurs influençant l'effort et la puissance de coupe en déchiquetage	131
VI.4	Mesure de l'effort de coupe	132
VI.4.1	Méthodes existantes pour la mesure des efforts :	132
VI.4.1.1	Méthodes de mesure indirecte des efforts :	133
VI.4.1.2	Méthodes de mesure directe des efforts :	134
VI.4.2	Méthode pour mesurer l'effort de coupe sur le banc d'essais	136
VI.4.2.1	Optimisation de l'épaisseur du contre-couteau :	136
VI.5	Mesure de consommation d'énergie électrique	141
VI.6	Étalonnage dynamique et traitement des signaux	141
VI.6.1	Méthodologie de mesure des efforts de coupe	141
VI.6.1.1	Nature des signaux mesurés par les extensomètres :	142
VI.6.1.2	Fonctions de réponse en fréquence déformation du c-couteau/ effort de coupe :	143
VI.6.1.3	Méthodes de calcul de l'effort de coupe (F_y) :	145
VI.6.1.4	Validation de la méthode de mesure :	146
VI.6.1.4.1	Étalonnage dynamique représentatif :	147
VI.6.1.4.2	Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux :	149
VI.6.1.4.3	Comparaison entre les mesures de puissance et les déformations du contre-couteau :	150
VI.7	Procédure expérimentale et analyse des résultats	151
VI.7.1	Conditions de coupe	151
VI.7.1.1	Conditions de coupe :	151
VI.7.1.2	Caractéristiques des éprouvettes :	152
VI.7.2	Protocole expérimentale	152
VI.7.2.1	Efforts de coupe :	153
VI.7.2.2	Puissance électrique consommée :	156
VI.7.3	Résultats et discussions	157
VI.7.3.1	Allure des courbes d'effort en déchiquetage :	157
VI.7.3.2	Répétabilité des mesures :	160
VI.7.3.3	Influence sur l'effort de coupe des facteurs testés pour la granulométrie :	162
VI.7.3.3.1	Avance par dent et vitesse de coupe :	162

VI.7.3.3.2	Angle de coupe réel et la vitesse de coupe :	162
VI.7.3.3.3	Angle de taillant et vitesse de coupe :	163
VI.7.3.3.4	Énergie consommée pour 1 cm ³ (E_{cons}):	163
VI.7.4	Conclusion	164
Chapitre VII. Conclusion générale et perspectives		165
VII.1	Conclusions	166
VII.2	Perspectives	167
Chapitre VIII. Références bibliographiques		169
Annexe A. Désignations complémentaires sur l'opération de déchiquetage		185
A.1	Angles de coupe secondaires :	186
A.1.1	Plans de références :	186
A.1.2	Angle de levage Φ :	188
A.2	Mouvement de coupe pour une déchiqueteuse à tambour:	188
A.2.1	Modes du travail :	188
A.2.2	Équations temporelles de la trajectoire du couteau :	189
A.3	Formation de copeau en avalant lors de la coupe rotative	190
Annexe B. Déchiqueteuses utilisées dans l'industrie		191
B.1	Canter de scierie :	192
B.1.1	Disposition spiralée :	192
B.1.2	Disposition étage :	193
B.1.3	Disposition radiale :	193
B.2	Déchiqueteuse fixes à disque ou à tambour:	195
B.2.1	Conceptions spéciales :	196
Annexe C. Mesure expérimentale des fonctions de réponse en fréquence		199
C.1	Définition	200
C.2	Échantillonnage et transformée de Fourier discrète	202
C.3	Repliement et recouvrement	202
C.4	Fuites d'énergie et fenêtrage	204
C.5	Retour dans le domaine temporel	206
Annexe D. Facteurs influents l'effort de coupe en usinage traditionnel du bois		209
D.1	Influence de l'outil de travail :	210
D.1.1	Angles de coupe :	210
D.1.2	Acuité de l'arête :	210
D.2	Influence des conditions de coupe :	211
D.2.1	Mode de coupe :	211
D.2.2	Épaisseur du copeau :	212
D.2.3	Largeur de coupe (b) :	213
D.2.4	Frottement	213
D.3	Influence du matériau usiné :	214
D.3.1	Densité	214
D.3.2	Humidité :	215
D.3.3	Température :	216
D.3.4	Singularités du bois :	217

Liste des figures

Figure II-1. Différents emplois du bois et ses plaquettes (source: gipeblor.com)	18
Figure II-2. Développement du marché des plaquettes et particules bois dans les états membres de l'union européenne [UN 2003]	20
Figure II-3. Gisement brut issu des rémanents de l'exploitation forestière actuelle	22
Figure II-4: Equivalence énergétique des différents types de combustible bois	24
Figure II-5. Comparatif du coût des énergies en euros TTC par kWh janvier 2009 (source : ajena.org)	24
Figure II-6. Puissance du parc des chaufferies collectives	25
Figure II-7. Différents formes de combustible bois: bûches, briquettes (source: aduhme.org)	26
Figure II-8. Différents formes de combustible bois : sciures, Plaquette et granulées de bois (source: biomass-concept.com)	26
Figure II-9. Comparaison entre les différents formes de bois énergie selon les efforts demandés	27
Figure II-10. Schéma de fonctionnement d'une chaudière automatique à plaquettes (source : Hargassner)	28
Figure II-11. Principales filières de la gazéification de la biomasse [Dufour 2007]	29
Figure II-12. Schéma de fonctionnement d'un gazéifieur automatique à plaquettes (source: nexterra.ca)	30
Figure III-1. Schéma d'un arbre illustrant la patte, le tronc, et le houppier (Source : quebec-amerique.com)	32
Figure III-2. Direction d'anisotropie et anatomie du bois [Schoch 2004]	34
Figure III-3. Anatomie d'un bois de résineux	34
Figure III-4. Plan ligneux des feuillus (Source : bois-construction.org)	35
Figure III-5. Schéma général des constituants chimiques du bois	36
Figure III-6. Cernes d'accroissement et leurs rayons de courbure dans une poutre et un rondin	37
Figure III-7. Composition fonctionnelle de la partie active du couteau	38
Figure III-8. Orientation de l'arête de coupe par rapport à l'axe de rotation	39
Figure III-9. Modes de coupe A, B, C [Kivimaa 1950]	39
Figure III-10. Définition des différents modes de coupe [McKenzie 1967]	40
Figure III-11. Distinction des modes de coupe en fonction des cernes de croissance [Kivimaa 1950]	40
Figure III-12 . Inclinaison de 45° sur les trois modes de coupe [Thoms 1984]	40
Figure III-13. Formation de copeau suivant le mode de coupe [Thoms 1984]	41
Figure III-14. Désignation de la direction de l'amenage selon Hartler	41
Figure III-15. Ensemble Disque - éprouvette selon deux plans	42
Figure III-16. Coupe selon le plan horizontal	43
Figure III-17. Coupe selon le plan vertical	43
Figure III-18. Angles de coupe principaux	45
Figure III-19. Angles de coupe en coupe orthogonal [Koch 1964]	45
Figure III-20. Angles de coupe traditionnels pour le déchiquetage à disque	46
Figure III-21. Angles de coupe principaux, déchiqueteuse à disque	47
Figure III-22. Mouvement du couteau et de la section du bois pour une déchiqueteuse à disque	49
Figure III-23. Variation de la largeur de coupe durant le déchiquetage	50
Figure IV-1. Déchiqueteuse actionnée par la prise de force d'un tracteur (source : Noremat)	53
Figure IV-2. Déchiqueteuse de branche actionnée par son propre moteur (source : Bandit)	54
Figure IV-3. Déchiqueteuses de forte capacité (source : Silvatec, Jenz)	54
Figure IV-4. Dispositifs d'introduction du bois (source : FARMI Forest, Pezzolato, Noremat)	55
Figure IV-5. Système de déchiquetage par vis sans fin [Vares 2005]	57
Figure IV-6. Système de déchiquetage à tambour	58
Figure IV-7. Différentes conceptions du tambour	58
Figure IV-8. Système de déchiquetage à disque	59
Figure IV-9. Organigramme du principe de fonctionnement d'une déchiqueteuse à disque	60

Figure IV-10. Systèmes de calibrage des plaquettes dans les déchiqueteuses à disque _____	61
Figure IV-11. Types de couteaux utilisés sur le système de déchiquetage à disque _____	61
Figure IV-12. Banc d'essais - vue droite _____	63
Figure IV-13. Banc d'essais - vue gauche _____	64
Figure IV-14. Matériels d'acquisition utilisés sur le banc _____	64
Figure IV-15. Unité de déchiquetage _____	65
Figure IV-16. Trois portes couteaux accessibles _____	66
Figure IV-17. Porte - couteau _____	66
Figure IV-18. Directions d'effort de coupe au moment de l'attaque pour 3 diamètres de billon différents _____	67
Figure IV-19. Quelques Positions et formes du contre-couteau [McLauchlan 1979] _____	67
Figure IV-20. Unité d'aménage _____	68
Figure IV-21. Directions d'aménage possibles _____	69
Figure IV-22. Dispositif de meure du Capteur capacitif avec ses composants _____	70
Figure IV-23. Vitesse linéaire de la rotation du disque à 800 tr/min et une fréquence d' échantillonnage 50 KHz _____	71
Figure V-1. Le copeau de type I [Franz 1958] _____	74
Figure V-2. Cycle de l'évolution des efforts pour le copeau de type I [Franz 1958] _____	75
Figure V-3. Le copeau de type II [Franz 1958] _____	76
Figure V-4. Diagramme de l'évolution des efforts pour le copeau de type II [Franz 1958] _____	76
Figure V-5. Le copeau de type III [Franz 1958] _____	77
Figure V-6. Cycle de l'évolution des efforts pour le copeau de type II [Franz 1958] _____	77
Figure V-7. La formation de copeau en mode coupe C _____	78
Figure V-8. Les zones de contraintes critiques durant le processus de tranchage _____	79
Figure V-9: Les fissures en coupe A quand la cohésion inter-fibres est relativement fort (Type I) _____	80
Figure V-10: Les fissures en Coupe A quand la cohésion inter-fibres est insuffisante (Type II) _____	80
Figure V-11: Les zones de rupture potentielles en mode de coupe A [McKenzie 1961] _____	81
Figure V-12: La flexion des fibres devant l'arête de coupe et les ruptures en traction [McKenzie 1962] _____	82
Figure V-13: L'hypothèse de la distribution des contraintes de tension sous l'arête de coupe [McKenzie 1961] _____	83
Figure V-14. La zone compressée en déchiquetage [McLauchlan 1979] _____	84
Figure V-15. La formation des plaquettes en trois mécanismes ; coupe, cisaillement et fissuration [Hartler 1963b] _____	85
Figure V-16. Les trois modes de formation des plaquettes: 1- Opening mode, 2- Forward shear mode, 3- Remote opening mode [Hellström 2008a] _____	85
Figure V-17. Diagramme d'Ichikawa recensant les facteurs influençant la qualité des plaquettes _____	87
Figure V-18: le processus de déchiquetage par le couteau du Canter Swecan _____	89
Figure V-19. Couteau avec un chanfrein supplémentaire _____	90
Figure V-20. Processus de déchiquetage et les facteurs influencent selon Monico [Monico 1979] _____	90
Figure V-21. Forces de réactions et leurs composantes dans deux cas : grande ε à droite et petite ε à gauche _____	92
Figure V-22: L'influence de la saillie du couteau sur la longueur des plaquettes _____	94
Figure V-23: Relation entre la longueur et l'épaisseur des plaquettes (calculées) ; À gauche pour le pin, et à droite pour différents bois durs [Engelgau 1978] _____	94
Figure V-24. Fréquence de distribution de l'épaisseur des plaquettes par rapport à leurs longueurs pour; a- le chêne rouge, b- le pin taeda, c- le noyer tendre, d- le storax américain [Twaddle 1997] _____	95
Figure V-25. Configuration de coupe pour un rond de diamètre maximal 120 mm _____	100
Figure V-26. Tamis oscillant (Allgaier) _____	102
Figure V-27. Tamis vibrant _____	103
Figure V-28. Tamis Retsch AS200 _____	103
Figure V-29. Plaquettes grossières produites avec le déchiquetage d'épicéa et de sapin _____	105
Figure V-30. Deux cas de la surface de coupe selon la distance entre le couteau et le contre-couteau _____	106
Figure V-31. Effet de la variation de l'avance par dent sur la distribution granulométrique – chêne _____	107
Figure V-32. Effet de la variation de l'avance par dent sur la distribution granulométrique – sapin _____	108

Figure V-33. Fractions granulométriques	109
Figure V-34. Effet de la variation de la vitesse de coupe sur la distribution granulométrique – sapin	110
Figure V-35. Effet de la variation de la vitesse de coupe sur la distribution granulométrique - chêne	110
Figure V-36. Effet de la variation de l'angle de coupe sur la distribution granulométrique - sapin	111
Figure V-37. Effet de la variation de l'angle de coupe sur la distribution granulométrique – chêne	112
Figure V-38. Propagation des fissures et les efforts de coupe	113
Figure V-39. Effet de la variation de l'angle de taillant sur la distribution granulométrique – sapin	114
Figure V-40. Effet de la variation de l'angle de taillant sur la distribution granulométrique - chêne	114
Figure V-41. Plaquette type 1; épicéa à gauche et chêne à droite	115
Figure V-42. Plaquette type 2 ; épicéa à gauche et chêne à droite	115
Figure V-43. Proportion des différents types des plaquettes dans la fraction (6 - 8) ; (épicéa, V_c : 19.5 m/s, f_z : 8 mm et γ : 50°)	116
Figure V-44. Formation des plaquettes simplifiée et les efforts de coupe	117
Figure V-45. Définition des trois modes élémentaires de rupture d'une plaque fissurée [Triboulot 1981]	117
Figure VI-1. Représentation schématique des efforts en coupe orthogonale	122
Figure VI-2. Grandeurs de coupe ; longueur, largeur et profondeur	124
Figure VI-3. Efforts de coupe en déchiquetage par disque [Hartler 1962a]	125
Figure VI-4. Composants de l'effort de coupe sur un couteau de disque	125
Figure VI-5. Variation des composantes parallèles et perpendiculaires de l'effort de coupe à vitesse de coupe lente [Uhmeier 1995]	126
Figure VI-6. Variation de l'effort de coupe en déchiquetage à vitesse de coupe lente [Hellström 2008a]	126
Figure VI-7. Évolution de l'effort de coupe F_y durant le passage d'un couteau [Hartler 1963a]: à gauche schéma explicatif, à droite mesure pour une vitesse de coupe de 20 m/s	127
Figure VI-8. Facteur influençant les efforts de coupe [Scholz 2009]	127
Figure VI-9. Variation des composantes parallèles et normales des efforts de coupe en fonction de l'angle de dépouille et celui de chanfrein supplémentaire pour une vitesse de coupe lente (0.08 m/s) [Uhmeier 1995]	128
Figure VI-10. Écart-type du component parallèle de l'effort de coupe en fonction de l'angle de chanfrein supplémentaire β' et la longueur des plaquettes [Uhmeier 1995]	129
Figure VI-11. Schéma de l'outil de coupe instrumenté	134
Figure VI-12. Implantation des anneaux octogonaux [Korkut 2003]	135
Figure VI-13. Dynamomètre Kistler 9225B, a) trois paires de quartz, b) capteur piézoélectrique à trois composantes, c) implantation des capteurs	136
Figure VI-14. Contre couteau déformé sous l'effet de l'effort de coupe (unité de déformation : mm, échelle : 0.5/1)	137
Figure VI-15. Fixation des extensomètres sur le contre couteau	137
Figure VI-16. Dimension du contre-couteau	138
Figure VI-17. Calcul des facteurs d'amortissement modaux ζ_i	139
Figure VI-18. Dispositif expérimental destiné à estimer le facteur d'amortissement	140
Figure VI-19. Déformation et vibration du contre-couteau sous l'effet des chocs exercés par les couteaux	140
Figure VI-20. Système "WattPilote" – schéma de câblage	141
Figure VI-21. Évolution des signaux représentant les microdéformations au cours de l'opération de déchiquetage (épicéa, $f_z=8$ mm, $\omega=800$ tr/min, $D_{moy}=85$)	142
Figure VI-22. Démarche d'obtention des spectres fréquentiels de chaque échantillon de déformation S_1 et S_2	143
Figure VI-23. Trois points de frappe sur la face supérieure du contre-couteau	143
Figure VI-24. Démarche d'obtention d'une fonction de réponse en fréquence déformation du contre-couteau / effort de coupe H31	144
Figure VI-25. Obtention du signal temporel de l'effort de coupe E_1 à partir de sa TFD	146
Figure VI-26. Spectre d'un impact dans le domaine fréquentiel	147
Figure VI-27. Cohérence d'une FRF	148
Figure VI-28. Superposition des déformations et de l'effort de coupe après l'étalonnage dynamique	148
Figure VI-29. Superposition des résultats expérimentaux et théoriques : déformations et largeur de coupe	149

Figure VI-30. Superposition des résultats expérimentaux de la puissance et de la déformation du contre-couteau _____	150
Figure VI-31. Configuration de coupe pour un rondin de diamètre de 120 mm en maximum _____	151
Figure VI-32. Exemple d'effort mesuré durant le déchiquetage d'une éprouvette _____	153
Figure VI-33. Courbe d'effort découpée en pics _____	154
Figure VI-34. Effort moyen mesuré pour 1 cm de la largeur de coupe _____	154
Figure VI-35. Organigramme des différentes étapes de traitement de la courbe d'effort _____	155
Figure VI-36. Cycle de variation de la consommation d'énergie électrique à vide _____	156
Figure VI-37. Consommation d'énergie durant la coupe _____	157
Figure VI-38. Forme de la courbe d'effort (F_y) durant le déchiquetage avec la variation de la largeur de coupe (b) _____	158
Figure VI-39. Évolution de l'effort de coupe F_y durant le passage d'un couteau [Hartler 1963a]: à gauche schéma explicatif, à droite mesure pour une vitesse de coupe de 20 m/s _____	158
Figure VI-40. Courbe de tendance de la partie impulsive de la courbe de déchiquetage _____	159
Figure VI-41. Résultats de la variation d'effort F_y pour 5 essais de déchiquetage : _____	160
Figure VI-42. Énergie consommée pour une unité de volume, obtenue avec les différents tests de répétabilité _____	161
Figure VI-43. Effort de coupe F_y en fonction de l'angle et de la vitesse de coupe par 1 centimètre de largeur de coupe _____	163

Liste des tableaux

Tableau IV-1. Déchiqueteuses forestières selon la capacité - récapitulatif _____	55
Tableau IV-2. Évaluation des différents dispositifs d'entraînement du bois _____	56
Tableau IV-3. Caractéristiques des trois différents types de déchiqueteuses forestières _____	62
Tableau V-1. Influence de l'épaisseur de coupe et de l'angle de coupe sur la forme du copeau [Juan 1992] _____	78
Tableau V-2. Récapitulatif des facteurs influençant la granulométrie des plaquettes forestières _____	98
Tableau V-3. Valeurs des facteurs testés _____	100
Tableau V-4. Résultats du test de répétabilité _____	105
Tableau V-5. Valeurs des jeux d'angles de coupe _____	109
Tableau V-6. Observations sur les surfaces des plaquettes _____	116
Tableau V-7. Récapitulatif des facteurs influençant la granulométrie des plaquettes forestières enrichies de mes résultats expérimentaux _____	118
Tableau VI-1. Récapitulatif des données des courbes des efforts obtenus par le test de répétabilité _____	161
Tableau VI-2. Valeurs des facteurs testés _____	162

Nomenclature

T_{ep} ,	tonne d'équivalent pétrole,
MAP,	1 m ³ apparent de plaquettes,
Stère,	1 m ³ apparent de bûches,
A_{γ} ,	face de coupe,
A_{α} ,	face de dépouille,
α ,	angle de dépouille,
β ,	angle de taillant,
β' ,	angle du chanfrein supplémentaire,
γ ,	angle de coupe (attaque),
γ_r ,	angle de coupe réel,
λ' ,	angle complémentaire,
Φ ,	angle de levage,
θ ,	angle d'engagement de l'outil,
θ_c ,	angle de rotation instantané du disque,
χ ,	angle de direction de l'arête de coupe,
λ ,	angle d'inclinaison de l'arête de coupe,
ι ,	angle du fil par rapport à l'axe horizontal,
ρ ,	angle d'inclinaison horizontal,
ε ,	angle d'inclinaison vertical.
V_c ,	vitesse de coupe (m/s),
V_f ,	vitesse d'amenage (m/min),
f_z ,	avance par dent ou par couteau (mm),
Z,	nombre de dent (couteau),
R,	rayon de coupe (mm),
N,	vitesse de rotation (tr/s),
ω ,	fréquence de rotation (rad/s),
H,	saillie de couteau (mm)
h,	profondeur de passe (mm),
H_b ,	humidité sur brut,
F_c	effort de coupe (N),

F_p, F_n	composantes de d'effort de coupe selon la direction de l'avance de l'outil, respectivement appelées : effort parallèle ou principal et effort normal,
f, n	composantes de d'effort de coupe, respectivement selon la direction tangentielle et normale à la face d'attaque (N),
R'	force exercée par le bois sur l'arête de coupe,
F_1	force de frottement entre le bois et l'outil,
F_2	force exercée par le bois sur l'outil, perpendiculaire à la face de coupe,
μ	coefficient de frottement,
e	épaisseur du coupeau (mm),
F	effort de coupe par cm de largeur de coupe (N),
b	largeur de coupe (mm),
K_{ed}	coefficient d'arête ($N \cdot mm^{-1}$),
k_e	coefficient d'essence,
k_c	coefficient de coupe,
a_p	profondeur de passe (mm),
E_{cons}	énergie consommée afin de déchiqeter une unité de volume (J/cm^3),
S_1, S_2	signaux représentant la déformation ($\mu \epsilon$),
$H_{ij}(j\omega)$	matrice complexe de la fonction de réponse en fréquence,

Abréviations

ENSTIB : Ecole Nationale Supérieure des Industries et Technologies du Bois,
 LERMAB : Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois,
 ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (www2.ademe.fr),
 IFN : Inventaire Forestière National (www.ifn.fr),
 Solargo : initiatives pour l'énergie, l'environnement, l'agriculture (www.solagro.org),
 AFOCEL (FCBA) : Association Forêt Cellulose (www.afocel.fr),
 Aduhme : Agence locale des énergies (www.aduhme.org)
 Copacel : Confédération Française de l'Industrie des Papiers, Cartons et Celluloses
 (www.copacel.org),
 PHA : Central supply agency for the Austrian pulp and paper industry,
 UCFE: Union de la Coopérations forestière française (www.ucff.asso.fr),
 FRF : Fonction de Réponse en Fréquence,
 TFD : Transformé de Fourier Discrète.

Chapitre I. Introduction générale

Notre étude porte sur le déchetage du bois brut de qualité secondaire comme les rémanents forestiers, le bois des coupes d'éclaircies et le bois des tempêtes. Les produits de ce déchetage, appelés plaquettes forestières, sont principalement utilisés dans le domaine du bois énergie (chaudières automatiques à bois, gazéification) et le volume utilisé dans ce domaine n'a cessé d'augmenter ces dernières années.

Dans le marché, il existe trois types de déchiqueteuses forestières : à disque, à tambour et à vis sans fin. Quel que soit le type de déchiqueteuse utilisée, la distribution granulométrique n'est pas bien maîtrisée et la quantité d'énergie pour déchiqueter le bois nuit au rendement de cette machine. Les facteurs influençant la qualité des plaquettes, les efforts et la puissance de coupe sont peu étudiés et aucune loi ne permet d'estimer la valeur des efforts de coupe en déchetage.

Les objectifs affichés de cette thèse sont :

- 1- Déterminer les facteurs influençant la qualité des plaquettes forestières principalement utilisées dans le domaine du bois énergie ;
- 2- Caractériser une méthode de mesure des efforts et de la puissance de coupe lors du déchetage du bois ;
- 3- Monter et mettre au point un banc d'essais de taille réelle utilisant la technologie de déchetage à disque.

La problématique proposée fait appel à plusieurs compétences portant sur la mécanique, l'analyse du comportement dynamique des machines et la technologie de l'usinage du matériau bois. Dans le corps du mémoire, nous traiterons des points suivants : dans un premier temps (chapitre II), nous nous intéresserons au produit ciblé par le thème de recherche, soit la plaquette forestière et ses spécificités géométriques et dimensionnelles. La présentation de l'état des lieux permet de mieux comprendre les diversités de transformation et d'utilisation de ce produit naturel. Pour une application énergétique, une analyse comparée avec les autres produits bois déchiquetés est nécessaire afin de montrer leurs points communs et différences. Nous montrerons l'effet de l'automatisation du système d'aménagement des chaudières à bois et l'importance de maîtriser la granulométrie des plaquettes pour le bon fonctionnement de ce système.

Dans une deuxième partie (chapitre III), nous analyserons les différents paramètres à prendre en compte lors de l'étude de la coupe du matériau bois. Partant des recherches acquises sur la coupe linéaire, nous examinerons les transferts possibles vers la coupe spécifique du

déchiquetage du bois. Ce dernier domaine a peu été étudié et de nombreuses lacunes existent actuellement.

Dans le chapitre IV, nous présenterons les différents matériels de transformation du bois en plaquettes forestières, travaillant dans un environnement forestier et répondant à des contraintes industrielles de productivité. Nous avons défini les contraintes et les besoins demandés par ce type de transformation afin de réaliser notre banc d'essais de taille réelle permettant de transformer des résidus forestiers en plaquettes valorisables du point de vue énergétique. Nous présenterons notre banc d'essais et ses différentes fonctionnalités dans le reste de ce chapitre.

Ensuite dans le chapitre V, nous nous intéresserons à la caractéristique géométrique des plaquettes forestières. Les seuls travaux existant dans ce domaine sont issus de l'industrie papetière. En s'appuyant sur ceux-ci, nous allons revenir sur les paramètres influençant la géométrie des plaquettes, puis nous présenterons le protocole retenu afin de caractériser la granulométrie des produits. L'analyse de la formation des plaquettes est complexe, car elle résulte de la compétition entre deux mécanismes : le cisaillement et la propagation des fissures. Les résultats obtenus seront présentés avec les tendances affichées des plusieurs facteurs comme la vitesse de coupe, l'avance par dent, l'angle de coupe réel et l'angle de taillant.

Enfin, dans le chapitre VI, nous décrirons et analyserons la méthode utilisée pour la mesure des efforts de coupe et de la puissance en déchiquetage du bois. Les méthodes classiques utilisant majoritairement des méthodes de mesure directe, comme la platine dynamométrique, peuvent influencer les comportements dynamiques du système étudié si celui entre en interaction avec celui du capteur utilisé. Les bandes passantes de ces capteurs ne sont pas suffisantes pour étudier les phénomènes de coupe. La méthode utilisée repose sur la mesure dynamique de la déformation du contre-couteau. Les différents résultats, notamment de validation de la méthode, sont présentés après. Des tendances sont dégagées des résultats, ce qui nous permet de compléter le travail réalisé sur la granulométrie.

Les conclusions et les perspectives sont présentées dans le chapitre VIII. On y trouve les apports et les limites de ce travail de recherche et les différentes perspectives à donner à ce travail.



***Chapitre II. Plaquette forestière: bois
décheté et positionnement au sein du bois-
énergie***

II.1 Préambule

Les plaquettes de bois sont des morceaux de bois qui ont la forme d'un parallépipède. Leurs granulométries et leurs formes varient selon le domaine d'utilisation. L'opération par laquelle ces plaquettes sont produites à partir du bois brut s'appelle le déchiquetage. Le déchiquetage du bois est effectué par des machines tournantes munies de couteaux. Cette opération a fait l'objet de différentes études depuis plus de cent ans, mais il reste encore beaucoup d'améliorations à apporter notamment au niveau de la maîtrise de la formation des plaquettes et de la conception des machines outils plus performantes et moins énergivores.

II.2 Définition des plaquettes forestières et les autres utilisations du bois déchiqueté

Ce premier chapitre présente les filières utilisant les plaquettes de bois déchiqueté, compare leur importance et souligne les enjeux de cette matière première.

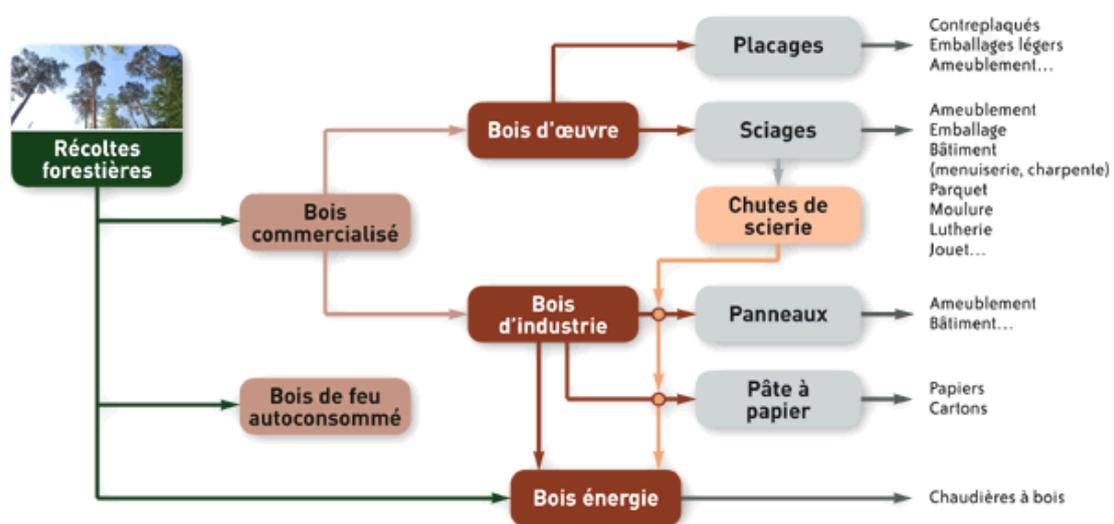


Figure II-1. Différents emplois du bois et ses plaquettes (source: gipeblor.com)

II.2.1 Plaquettes forestières

L'appellation plaquette forestière caractérise le bois énergie directement issu de la forêt à la différence des plaquettes industrielles ou des produits bois en fin de vie qui ont subi une transformation industrielle avant de devenir un combustible (Figure II-1). La plaquette forestière est le résultat du déchiquetage par des engins mécanisés (broyeurs à couteaux) des rémanents d'une exploitation forestière ou de bois de faible diamètre ; c'est souvent la seule

valorisation possible. Elles se présentent sous la forme de petits morceaux de bois de taille optimale variant entre 10×10×5 mm pour les petites chaudières de particulier et 50×50×20 mm pour les grosses chaudières professionnelles.

Durant les dix dernières années, avec l'augmentation de l'énergie par biomasse, la demande en plaquettes forestières a considérablement augmenté. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'améliorer le processus de la production de plaquettes depuis la source jusqu'à la destination finale, pour diminuer le coût énergétique et améliorer leur stabilité géométrique.

II.2.2 Plaquettes pour l'industrie papetière

Depuis la première utilisation de pâte à papier à base de fibres de bois en 1840, l'industrie Papetière utilise des plaquettes pour préparer la pâte à papier mécanique, la pâte mi-chimique et la pâte chimique. En France, ces plaquettes sont essentiellement produites à partir du bois des coupes d'éclaircies pratiquées en forêt (70%) et des produits connexes de l'activité scierie (30%). En 2008, l'industrie papetière française a consommé 8.3 millions de tonnes de bois résineux et feuillus (Source : Copacel)¹. Les plaquettes destinées à la papeterie doivent être sans écorce (écorce est moins de 0,7 %), sans particule anorganique (métal, sable,...). Elles doivent être produites à partir de bois vert. Les dimensions optimales de ces plaquettes sont : longueur 25 - 28 mm, largeur 15 – 30 mm, épaisseur 4 – 8 mm (Source : PHA²) [Felber 2005]. Ces plaquettes sont produites soit par un canter de scierie soit par une déchiqueteuse à disque ou à tambour.

II.2.3 Panneaux dérivés du bois

Le déchiquetage du bois est une étape importante dans le processus de la fabrication des panneaux à base de particules ou de fibres. Dans cette industrie, on utilise le terme « plaquettes » pour le produit du déchiquetage primaire de rondins ou de dosses de scierie, et le terme « copeaux » pour le produit du déchiquetage secondaire qui réduit la plaquette initiale en copeaux. Concernant les panneaux de particules, la granulométrie des plaquettes doit respecter un certain dimensionnement avec un rapport longueur/épaisseur souhaitable de l'ordre de 60 jusqu'à 150, car un rapport élevé favorise la résistance et la stabilité du panneau. Un rapport plus faible est acceptable pour l'âme du panneau. La largeur des particules a

¹ Confédération Française de l'Industrie des Papiers, Cartons et Celluloses (www.copacel.org),

² Central supply agency for the Austrian pulp and paper industry.

également son importance car elles risquent de se fractionner parallèlement à leur longueur si elles sont trop larges [Bary-Lenger 1999]. L'industrie des panneaux accepte les produits connexes des scieries et le bois vert, c'est-à-dire fraîchement coupé. Les produits de trituration (rondins, branches) sont également une source d'approvisionnement importante pour les industries de fabrication de panneaux [Barboutis 2007]. La Figure II-2 montre le développement du marché des plaquettes bois destinées à l'industrie des panneaux et à l'industrie papetière. La demande sur les plaquettes ne cesse d'augmenter, d'où l'importance de l'amélioration des outils de production.

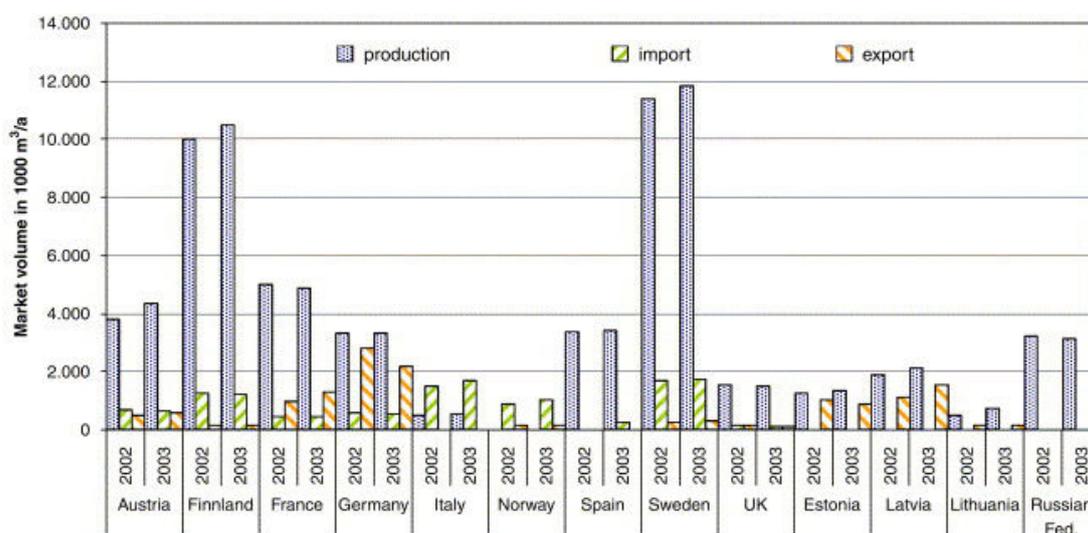


Figure II-2. Développement du marché des plaquettes et particules bois dans les états membres de l'union européenne [UN 2003]

II.2.4 Litière pour animaux et absorbant industriel

L'utilisation des copeaux de bois comme litière animale ou absorbant industriel utilise les propriétés absorbantes du bois. De fines particules (entre 0,5 et 2 mm) sèches (entre 10 et 15% d'humidité) peuvent avoir une capacité d'absorption de 400 %.

Les rémanents forestiers valorisés en litière pour animaux offre une alternative avantageuse à la paille. Selon une étude réalisée par la société G.A.E.C, l'ADEME¹ et la Conseil Régional du Limousin sur un box de 150 m², la litière en plaquettes a montré plusieurs avantages du point de vue:

- de confort des animaux : des animaux toujours au sec, pas d'échauffement de litière, pas d'odeur d'ammoniaque, très peu de mouches.

¹ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (www2.ademe.fr).

- De la qualité de l'air ambiant : pas de poussière ni d'odeur de résine.
- De l'entretien : renouvellement du paillage limité à 1 fois par mois, épandage pouvant s'effectuer avec la pailleuse, stabilisation du terrain dans le bâtiment, facilité de reprise du fumier.
- De la valorisation de la litière souillée : le fumier issu du mélange des particules de bois et des déjections animales se décompose progressivement pour former un compost intéressant pour l'épandage.

II.2.5 BRF (Bois Raméal Fragmenté)

Le BRF est obtenu par le déchiquetage des branches de diamètre inférieur à 7 cm et ne comporte pas plus de 20% de résineux. Ce broyat doit être rapidement (avant fermentation) répandu sur le sol. L'utilisation de cette méthode tend à redonner aux sols agricoles l'autosuffisance, l'autorégulation et la fertilité.

La méthode BRF est une accélération de processus pédogénétique en œuvre dans la forêt, c'est une nourriture naturelle pour le sol, plus besoin d'arrosage, ni d'aucun apport d'azote supplémentaire, ni de recours aux biocides et autres produits chimiques néfastes. Ce n'est donc pas un engrais, il s'agit de redynamiser les chaînes trophiques, trop simplifiées et appauvries des sols cultivées, dont l'activité générera une fertilité bien supérieure à la situation antérieure [Dodelin 2007].

D'autres produits non énergétiques à base de bois déchiqueté existent, comme par exemples les articles en bois comprimés, certains matériaux d'emballage, d'isolant thermique, de briques et de tuiles légères [Deschênes 1986].

II.3 Les plaquettes forestières au sein du bois énergie

II.3.1 Enjeux économiques et écologique de l'essor du bois énergie en France

Les ressources de bois-énergie en France, utilisées à hauteur de 9,2 millions de Tep¹ en 2004, présentent un fort potentiel de développement au vu du gisement de bois encore disponible. Avec 15,4 millions hectare en 2003, soit 28% du territoire nationale, la France détient la

¹ Tonne d'équivalent pétrole.

troisième surface boisée d'Europe, après la Suède et la Finlande. Sur la dernière décennie, la progression de la forêt s'est confirmée : celle-ci s'est accrue, chaque année, de 0,4% en surface et 88,3 millions de m³ en volume (soit le volume du tronc dont le diamètre est supérieur à 7 cm). Tandis que l'ensemble des prélèvements de bois (bois d'œuvre, bois de trituration, bois-énergie) s'élevait à 61 millions de m³ « IFN »¹

La récolte des bois d'œuvre ou bois de trituration génère des résidus appelés rémanents (branchages, petits bois), on estime (selon une étude réalisée pour l'ADEME par l'IFN et SOLAGRO ²) [ADEME 2004] l'équivalent énergétique de ces résidus sur l'ensemble du territoire à 7,3 millions de tep par an. C'est le "gisement" forestier physique potentiellement mobilisable.

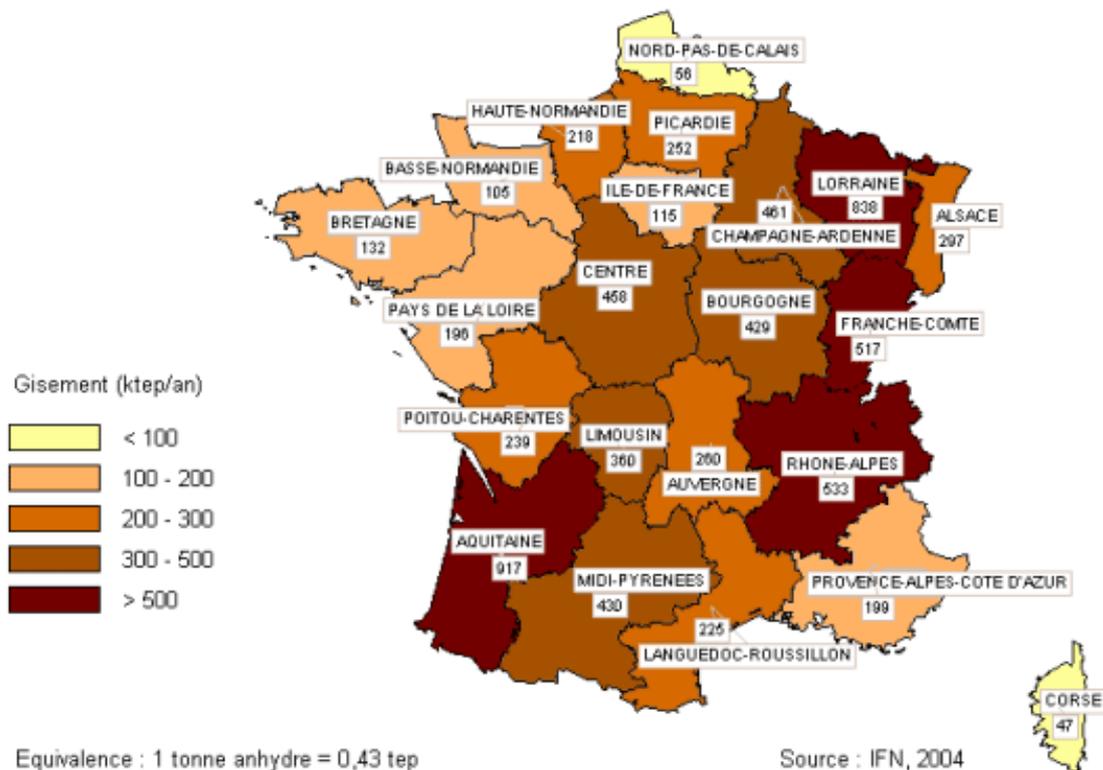


Figure II-3. Gisement brut issu des rémanents de l'exploitation forestière actuelle

Par recoupement des différents rapports de l'ADEME, il semblerait que les plaquettes forestières ne présentent qu'à peu près 15 % de la consommation annuel de bois énergie en

¹ Inventaire Forestière National (www.ifn.fr).

² Initiatives pour l'énergie, l'environnement, l'agriculture (www.solagro.org)

France, en sachant que les plaquettes sont la forme du bois la moins coûteuse (Figure II-5) et la plus facile à manipuler.

L'objectif des pouvoirs publics est d'augmenter de 50 % en 5 ans la contribution de la biomasse à la production nationale de chaleur et d'électricité, c'est-à-dire passé de 10 Mtep en 2004 à 15 Mtep en 2010. Dans ce cadre, le bois énergie est essentiel. Pour atteindre cet objectif, la puissance publique a mis en œuvre toute une série de mécanismes de développement : crédit d'impôt, directive quotas de CO₂, plan bois énergie de l'ADEME et des collectivités territoriales, certificats d'économie d'énergie, fiscalité, ... etc. Grâce à cette politique les résultats sont encourageants, la vente de chaudières au bois a progressé de 127% en 2005, un fort développement sur les réseaux de chaleurs collectifs (20 000 tep/an) avec le programme bois énergie 2000 – 2006, dirigé par l'ADEME. Quinze projets de production d'électricité à partir de biomasse d'une puissance supérieure à 12 MW devraient être mis en service avant le 1^{er} janvier 2007. Ces centrales consommeraient 600 000 tonnes/an de plaquettes forestières, plusieurs projets similaires sont à venir [AFOCEL 2006].

L'économie locale est soutenue par le développement du secteur bois énergie : pour une collectivité territoriale, la difficulté est de raisonner en termes de valeur ajoutée et non uniquement en terme économique ; à long terme, plusieurs avantages sont recensés :

- la valorisation énergétique de déchets à faible valeur marchande, autorisant ainsi le recyclage des sous-produits, et de fait le soutien de toute une filière professionnelle,
- des économies : le faible prix du combustible, indépendant des marchés internationaux, permet de rentabiliser les équipements,
- de nouveaux emplois locaux : le bois nécessite trois à quatre fois plus de main d'œuvre que les énergies concurrentes, parfois très qualifiée,
- l'entretien de l'espace, la gestion rationnelle de la forêt qui sont des préoccupations importantes, particulièrement dans certaines zones touristiques et la protection contre l'incendie.
- la création de richesses au niveau local, puisque la réduction du recours aux énergies importées permet d'alimenter les flux économiques régionaux (Source: aduhme¹, UCFF²).

¹ Agence locale des énergies (www.aduhme.org),

² Union de la Coopération forestière française (www.ucff.asso.fr).

La (Figure II-4) donne l'équivalence énergétique des différents types de combustible bois par rapport au fioul et en KWh afin de pouvoir comparer les différentes sources d'énergie.

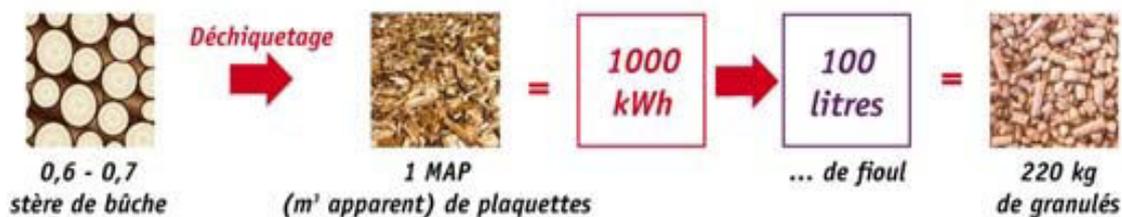


Figure II-4: Equivalence énergétique des différents types de combustible bois

Pour la production de chaleur, le bois est moins cher que le gaz, la Figure II-5 donne les tarifs des différents type d'énergie, ces prix variant fortement d'une période à l'autre, cette figure permet simplement d'avoir des ordres de grandeurs comparatifs. Ces chiffres ont été publiés en janvier 2009.



Figure II-5. Comparatif du coût des énergies en euros TTC par kWh janvier 2009 (source : ajena.org)

Les prix du bois déchiqueté (bois issu de toutes sources) et des plaquettes forestières étant compétitifs, beaucoup de chaudières ont été installées ces dernières années et la tendance est à l'augmentation. La Figure II-6 montre l'évolution de la puissance du parc des chaufferies collectives en France entre 1980 et 2005. Fin 2004, le parc des chaufferies collectives bois en fonctionnement comprenait 641 installations, soit 430 MW de puissance thermique installée.

Le parc en service est en constante progression, de plus de 13 % par an en moyenne depuis 2000¹ [ADEME 2005].

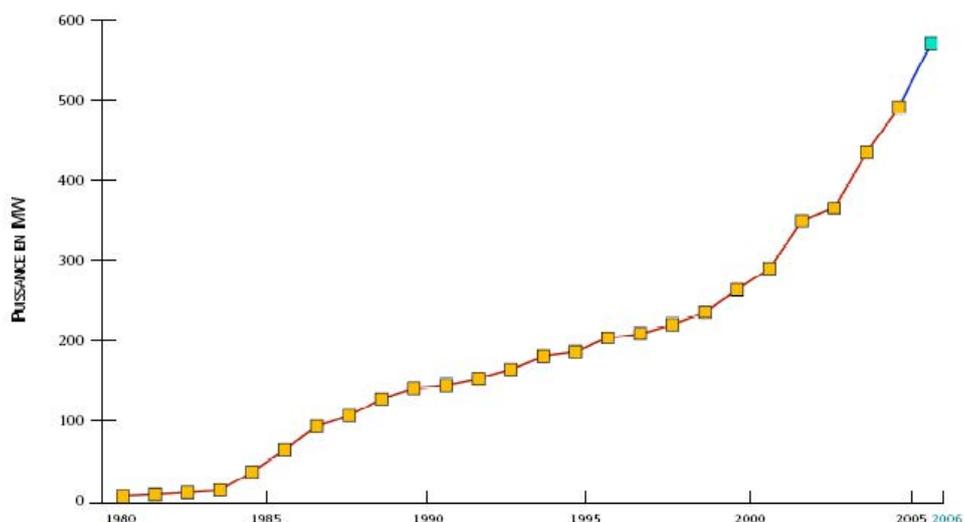


Figure II-6. Puissance du parc des chaufferies collectives

Concernant les chaufferies industrielles, pour une puissance supérieure à 1 MW, le parc est estimé à 1000 unités, essentiellement concentrées dans l'industrie du bois et de la trituration, représentant une puissance installée de l'ordre de 2,5 GW.

II.3.2 Différents formes du combustible bois :

II.3.2.1 Les bûches :

Elles représentent le mode d'utilisation du bois comme source de chauffage le plus ancien et encore le plus utilisé en France : bois coupé en rondin et éventuellement fendu (Figure II-7 ; 1), utilisable selon longueur et calibre, en cheminée, inserts, foyers fermés, cuisinières à bois, tous poêles à bûche et chaudière à bûches.

II.3.2.2 Les bûches de bois densifiées :

Elles sont aussi appelées les briquettes ou bois comprimés combustibles de même utilisation que les bûches classiques, fabriquées à partir de produits de connexes des industries du bois

¹ Les dates des sondages utilisées ne sont pas récentes car les nouveaux chiffres sont attendus pour la fin de 2010 (projet 2000 – 2010)

(sciures, copeaux, écorces) fortement compressés, sans colle, se présentant sous diverses formes (Figure II-7 ; 2).

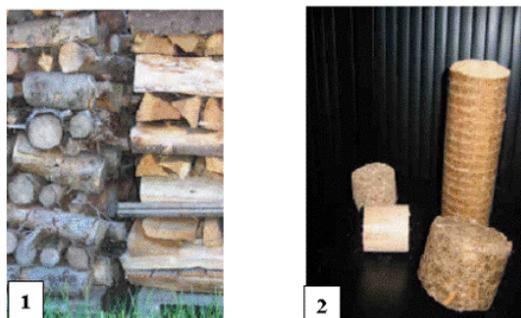


Figure II-7. Différentes formes de combustible bois: bûches, briquettes (source: aduhme.org)

II.3.2.3 Les Pellets ou Granulés de bois :

Ce sont des combustibles issus du compactage des sous-produits de la transformation du bois comme la sciure qui est affinée, séchée et compressée sans colle ni additif en petites cylindres de 6 à 8 mm (Figure II-8 ; 2), leurs taux d'humidité très faible, moins de 10%, ce qui améliore leur combustion. Ils sont utilisables dans les pôles à granulés, les chaudières automatiques au bois à plaquettes ou à granulés.



Figure II-8. Différentes formes de combustible bois : sciures (1), Plaquette (2) et granulées (3) de bois (source: biomass-concept.com)

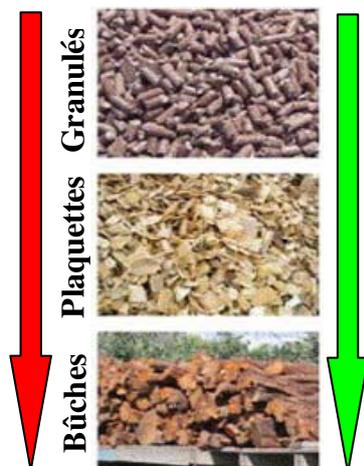
II.3.2.4 Comparaison entre plaquettes forestières et les autres formes de bois énergie :

Les plaquettes forestières sont la forme de bois-énergie qui coûte le moins cher et elles constituent un bon compromis par rapport aux bûches et aux granulés. Kaltschmitta [Kaltschmitta 2006] a identifié les efforts demandés afin de pouvoir produire et exploiter les différents formes de bois-énergie (Figure II-9), et ses analyses nous permettent de dire que

l'utilisation des plaquettes facilite l'automatisation des opérations de production et de conversion en chaleur tout en restant à des coûts raisonnables et compétitifs.

Décroissant :

- efforts techniques demandés pour la production,
- degré de la mécanisation de la chaîne de production,
- débit de production,
- surface utilisée pour la commercialisation,
- applicabilité pour une grande installation.



Augmentation :

- coût de transport
- variation des propriétés de combustible
- insensibilité durant le stockage,
- efforts techniques demandés pour les appareils de conversion.

Figure II-9. Comparaison entre les différentes formes de bois énergie selon les efforts demandés

II.3.3 Influence de la granulométrie des plaquettes sur leurs processus de transformation

La chaleur est la principale énergie récupérée à partir du matériau bois, cette chaleur peut être utilisée directement ou transformée en d'autres types d'énergie comme l'énergie électrique ou l'énergie mécanique. L'énergie est extraite du bois par combustion directe des plaquettes ou par transformation du bois en un autre type de matériau intermédiaire comme le gaz.

II.3.3.1 Les chaudières à bois

Ces chaudières varient selon leur puissance, de petites chaudières pour des habitations individuelles ou des petits réseaux de chaleurs de plusieurs logements, à de grosses chaudières utilisées dans des chaufferies collectives ou dans l'industrie. La particularité des chaudières utilisant les plaquettes forestières comme combustible, est l'automatisation de leur fonctionnement. Plusieurs systèmes sont utilisés pour alimenter ces chaudières en bois :

- par une vis d'Archimède mue par motoréducteur et moteur électrique,
- par un tiroir mu par un vérin hydraulique souvent alimenté par bande transporteuse,
- par gravité via une antichambre permettant également une alimentation par bande transporteuse.

La solution la plus économique, et par conséquent la plus courante, est l'alimentation par vis d'Archimède (Figure II-10). La seule limite à l'utilisation de ce système est la granulométrie

du combustible car la vis d'Archimède ne permet pas de transporter des plaquettes trop grosses appelées « queues de déchiquetage »¹ [Bernard 2005]. L'existence de fines particules (> 1 mm) constitue un autre problème lié à la granulométrie des plaquettes forestières, car elles sont mal valorisées lors de la combustion et risquent d'augmenter le pourcentage des particules dans les fumées [Khan 2009].

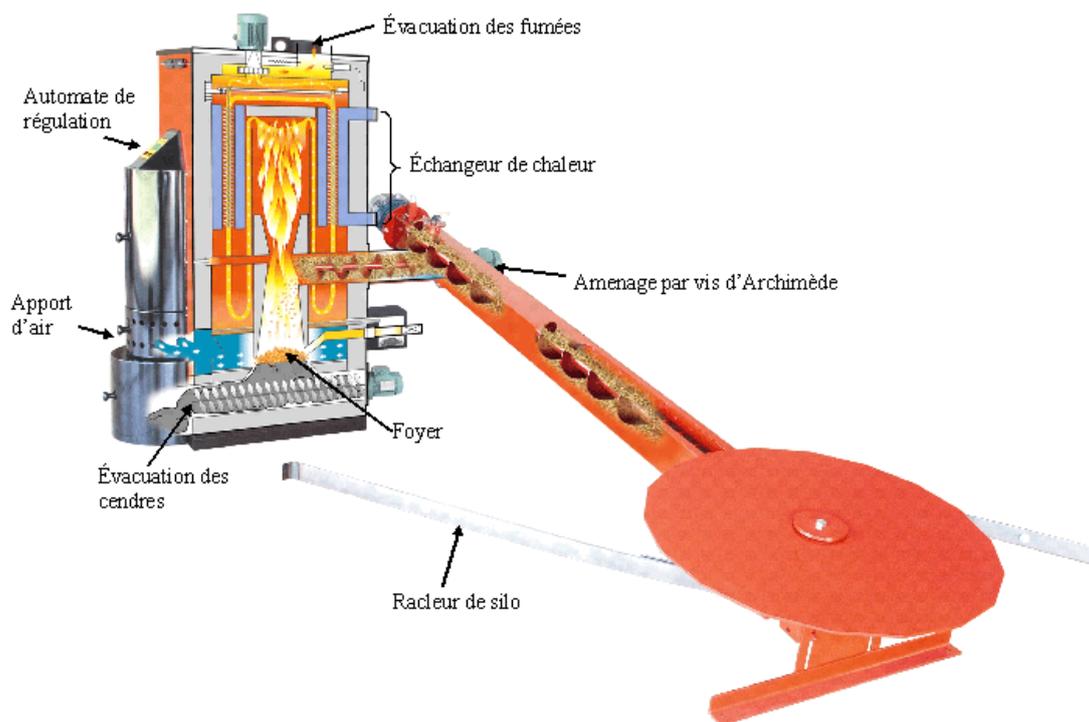


Figure II-10. Schéma de fonctionnement d'une chaudière automatique à plaquettes (source : Hargassner)

II.3.3.2 Le Pyrolyse / Gazéification

Ce procédé chimique a pour objectif de valoriser le bois énergétiquement en produisant des gaz utiles dans plusieurs applications (Figure II-11). Les gaz produits par la pyrolyse/gazéification sont principalement le monoxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H₂), le méthane (CH₄), le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau (H₂O).

¹ Les queues de déchiquetage : sont des gros morceaux de bois (hors normes), ils sont à l'origine de plusieurs problèmes dans les systèmes d'amenage automatique des plaquettes.

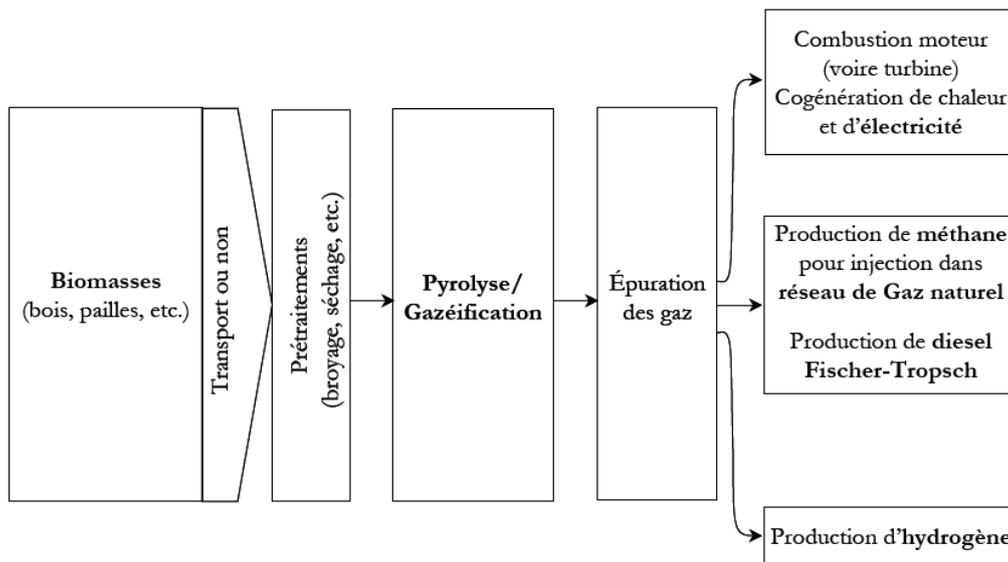


Figure II-11. Principales filières de la gazéification de la biomasse [Dufour 2007]

Comme pour les chaudières, l'utilisation des plaquettes forestières nécessite l'automatisation de l'opération de gazéification. Le principe du système automatique de gazéification est montré dans la Figure II-12. La puissance et la taille de ces systèmes de gazéification automatique varient entre des petits gazéificateurs domestiques (répandus récemment aux États-Unis pour produire l'électricité individuelle), et des gros gazéificateurs utilisés dans les grandes structures.

Deux phénomènes liés à la granulométrie des plaquettes, risquent d'arrêter l'aménagement automatique de bois : le blocage de la vis d'Archimède par les queues de déchiquetage, comme pour les chaudières ou l'apparition d'un phénomène de pontage. On peut décrire ce dernier comme la création d'une structure solide en forme de pont au-dessus des rouleaux d'aménagement qui se trouve dans le silo des plaquettes, empêchant la chute des plaquettes vers la vis d'aménagement. Selon Mattsson [Mattsson 2002; Mattsson 2003] et Jensen [Jensen 2004], le risque de pontage s'intensifie avec l'augmentation du pourcentage des queues de déchiquetage (surtout les plaquettes qui ont une longueur de 100 mm et plus), et avec l'augmentation de l'humidité des plaquettes. Les plaquettes homogènes de forme carrée limitent l'apparition de ces deux phénomènes [BERC 2007].

L'apparition du pontage est possible avec les chaudières si les plaquettes sont stockées dans un silo équipé par des rouleaux d'aménagement.

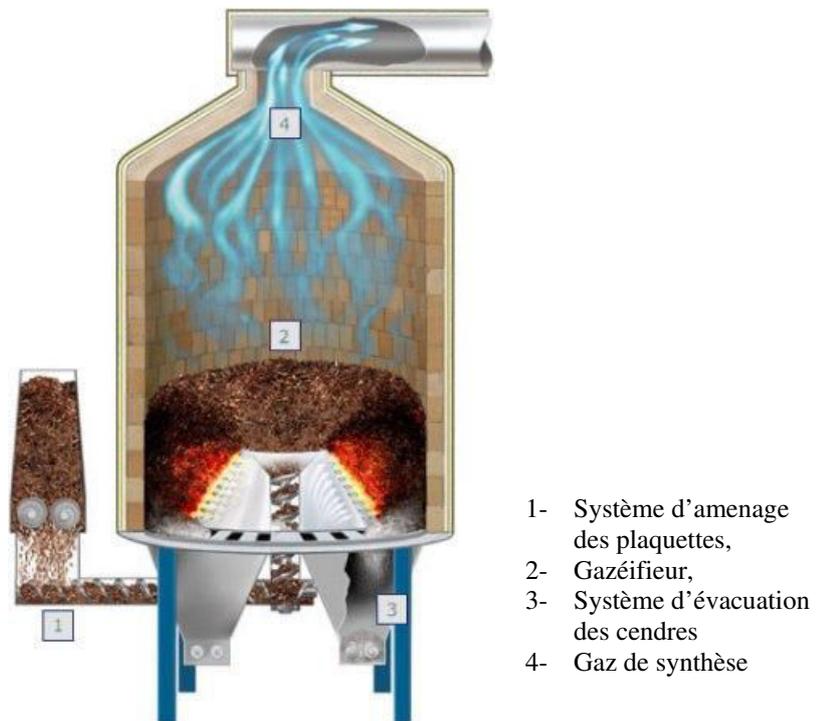


Figure II-12. Schéma de fonctionnement d'un gazéifieur automatique à plaquettes (source: nexterra.ca)

D'autres produits énergétiques sont extraits à partir du bois déchiqueté : des huiles et des phénols obtenus par l'hydrogénation, et des sucres de fermentation et de l'éthanol obtenus par l'hydrolyse [Deschênes 1986]. La granulométrie des plaquettes joue un rôle important sur l'automatisation de ces opérations et la facilité des traitements chimiques.

II.4 Conclusion

La plaquette forestière est un produit qui possède plusieurs utilisations. Parmi elles, le bois-énergie est un domaine en pleine expansion. Afin de pouvoir suivre le développement enregistré dans ce domaine en répondant aux exigences du marché, il est nécessaire d'étudier les appareils de production (déchiqueteuse forestière) pour les améliorer, afin qu'ils donnent un produit de bonne qualité pour une dépense énergétique minimale.



*Chapitre III. Bois, matériau, structure et
usinage*

III.1 Matériau et structure

L'arbre comprend des racines (patte), une tige (tronc), des branches et un feuillage (houppier) (Figure III-1). Le bois est une matière ligneuse élaborée par un organisme vivant au milieu d'un écosystème. L'ensoleillement, la nature du terrain, l'altitude, la température ambiante, la pollution atmosphérique etc. interviennent directement sur la croissance des arbres. Le bois est le matériau qui constitue l'essentiel du tronc, des branches et des racines.

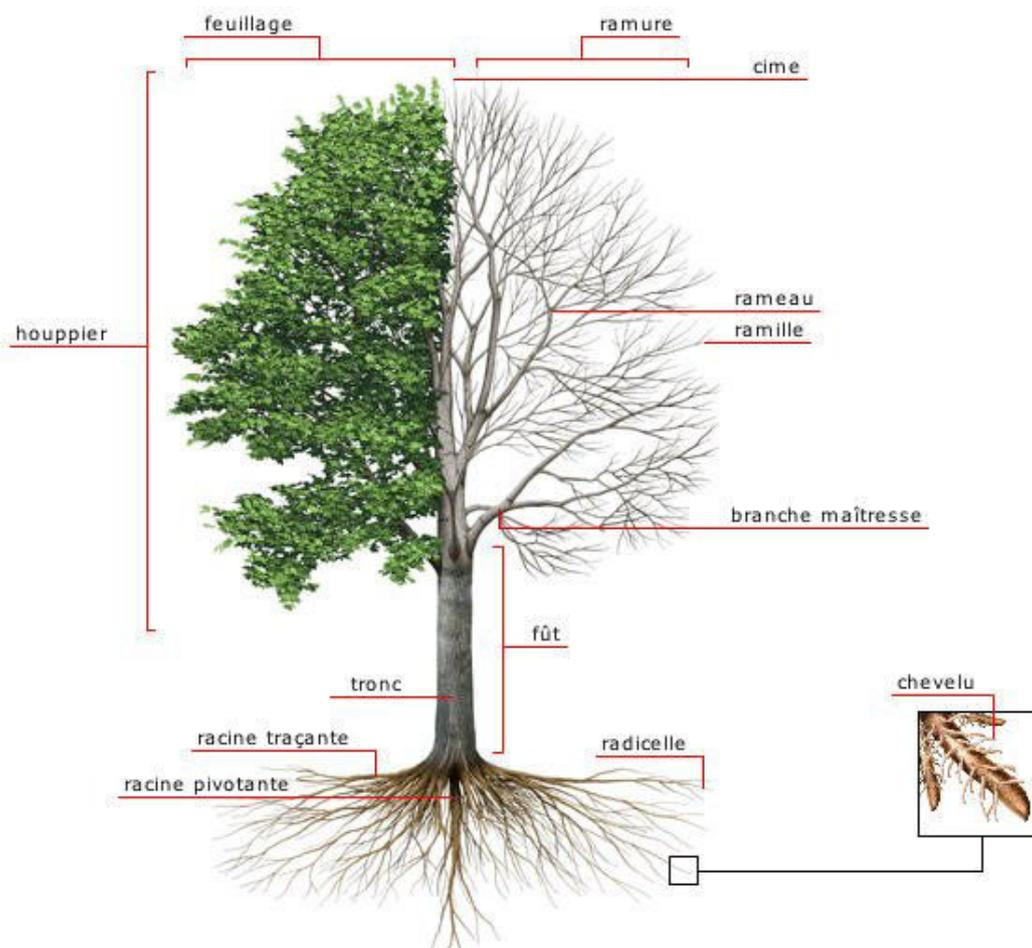


Figure III-1. Schéma d'un arbre illustrant la patte, le tronc, et le houppier (Source : quebec-amerique.com)

La Figure III-2 illustre une section de la grume et permet de constater les couches suivantes :

- l'écorce externe (liber dur), une première enveloppe protectrice, elle est constituée de cellules mortes,
- l'écorce interne (liber mou) qui conduit la sève élaborée,

- L'assise génératrice, ou cambium, invisible à l'œil nu, qui produit vers l'extérieur le liber, les cellules de bois vers l'intérieur,

Le bois proprement dit se présente sous forme de couches concentriques, qui correspondent aux accroissements saisonniers (cernes annuels de croissance).

- Le bois d'aubier occupe les couches externes, il est constitué de cellules vivantes conductrices de la sève brute.
- Le bois de cœur (duramen) occupe l'intérieur de la grume, les cellules qui le constituent ne contribuent plus à la circulation de la sève, c'est le matériau de soutien de la structure que constitue l'arbre, [Bodig 1982]

L'épaisseur de l'aubier et des cernes annuels d'accroissement, la densité, le grain et la rétractabilité du bois marqueront définitivement sa croissance et révéleront en grande partie ses caractéristiques. Le bois, en effet à la fois hétérogène, anisotrope et hygroscopique :

◆ **Hétérogène :**

Car les cellules qui le composent sont de natures et de formes différentes, sa densité est irrégulièrement répartie, et des singularités de croissance différencient chaque pièce.

◆ **Anisotrope :**

Parce qu'il possède une structure cellulaire orientée et ne présente pas les mêmes caractéristiques suivant les différentes directions. Le bois est plus particulièrement orthotrope, à savoir qu'il présente trois directions privilégiées ; longitudinale "L", radial "R" et tangentielle "T" (Figure III-2). Cette orthotropie s'explique par le mode de croissance de l'arbre en deux phases, l'une verticale et l'autre radiale.

◆ **Hygroscopique :**

Car il est susceptible de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction de la température et l'humidité relative de l'air ambiant.

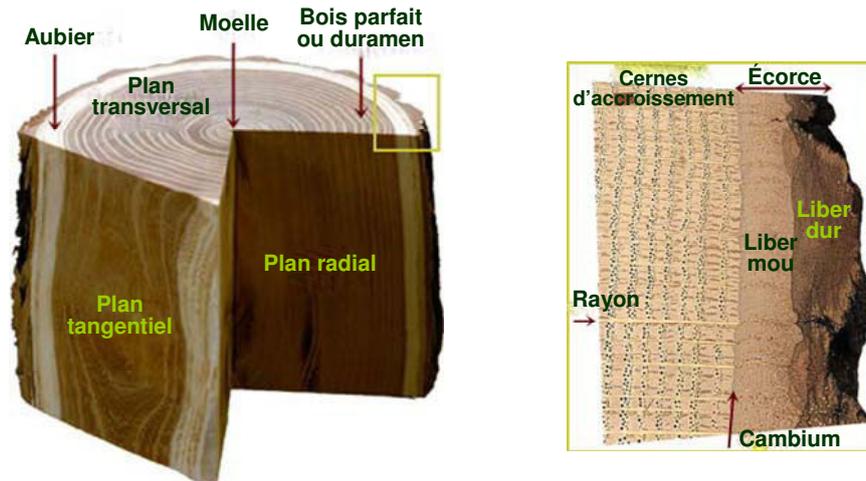


Figure III-2. Direction d'anisotropie et anatomie du bois [Schoch 2004]

III.1.1 Catégories de bois

Le bois est classé sous deux grandes catégories :

III.1.1.1 Les gymnospermes :

Comprenant les arbres résineux, ils présentent une organisation relativement simple, uniforme et régulière. Deux principaux types de cellules (les trachéides et les cellules de parenchyme) suffisent à constituer les plans ligneux de tous les résineux (Figure III-3); les éléments issus des initiales de l'assise cambiale (l'assise génératrice libéro-ligneuse) restent bien alignés, en particulier dans le sens radial [Keller 1994].

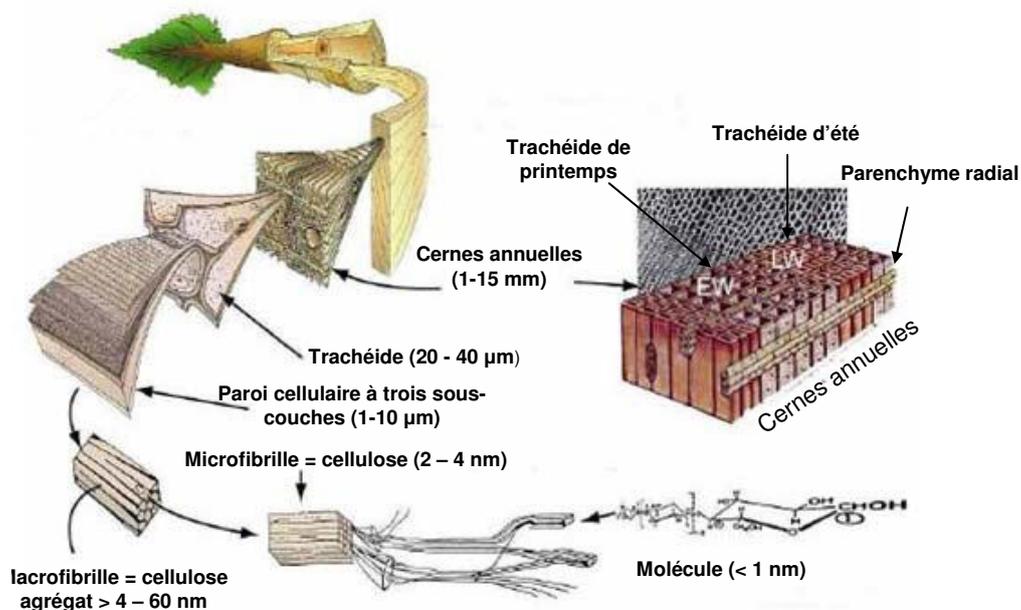


Figure III-3. Anatomie d'un bois de résineux

III.1.1.2 Les angiospermes :

Comprenant les feuillus, dont les espèces sont plus évoluées du point de vue de la botanique, présentent dans leur structure une diversité beaucoup plus grande que celle du bois de résineux, plus uniforme (Figure III-4). Chez ces derniers les trachéides longitudinales remplissent la double fonction de soutien et de conduction, chez le feuillus ce sont deux types de cellules qui se partagent les deux fonctions.

Comme éléments nouveaux, il y a les éléments de vaisseaux, spécialisés dans le transport de la sève brute, alors que la résistance mécanique est assurée par les fibres.

La conduction, l'accumulation, la restitution et la transformation de substances nutritives sont assurées, comme chez les résineux, par les parenchymes longitudinal et radial. L'association très diverse de ces types de cellules aboutit à une multitude de plans ligneux caractéristiques de très nombreuses espèces [Keller 1994].

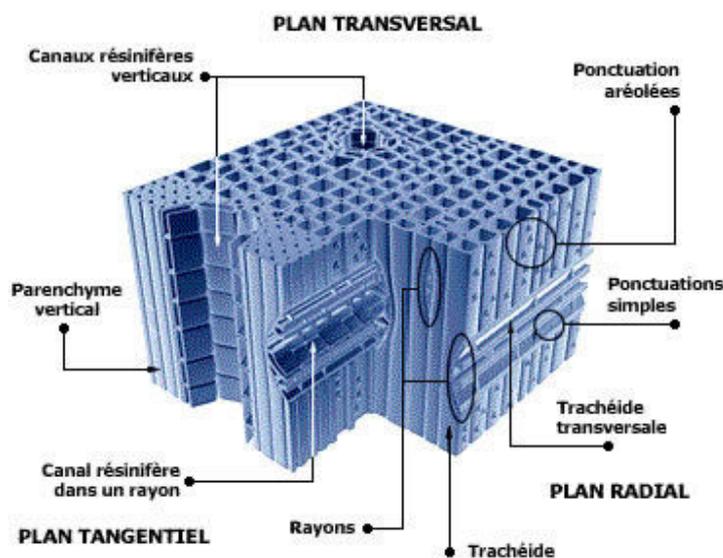


Figure III-4. Plan ligneux des feuillus (Source : bois-construction.org)

III.1.2 Composition chimique

Quelle que soit l'essence, la composition chimique du bois en pourcentage pondéral varie peu. Ainsi, pour le bois anhydre, on obtient :

Carbone C = 50%, Oxygène O = 43%, Hydrogène H = 6%, Azote N = 1%

Des minéraux tels que le calcium, la magnésium, les carbonates et de silice ne représentent guère que de 1 à 3% du poids de bois sec, que l'on retrouve sous forme de cendres [Rowell 2005].

Dans le bois, les substances macromoléculaires représentent environ 95 % de la masse anhydre tandis que les substances de plus bas poids moléculaires ne représentent que 5 % de la masse anhydre (Figure III-5), [Haluk 1994].

Le bois est essentiellement constitué de cellulose, de hémicelluloses et de lignines. La cellulose ($C_6 H_{10} O_5$)ⁿ représente 50% en poids du bois, c'est un homopolymère, elle se trouve principalement sous forme de microfibrilles, la cellulose constitue l'ossature du matériau et lui donne sa rigidité.

Les hémicelluloses sont des polysaccharides, elles possèdent des propriétés hydrophiles et sont susceptibles de gonflements importants à relier à la variabilité dimensionnelle du bois, elles représentent entre 25% et 30 % du poids. Les lignines sont des polymères complexes, elles incrustent les parois des cellules et assurent leur liaison, elles constituent entre 20% et 25% du poids.

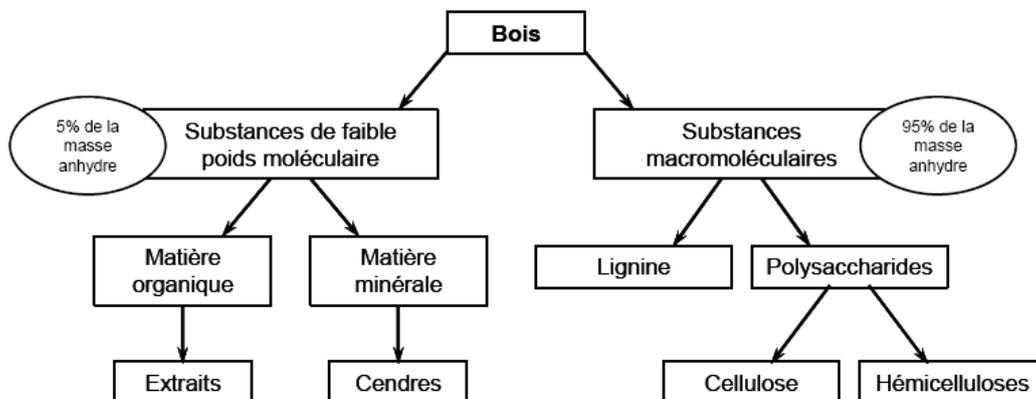


Figure III-5. Schéma général des constituants chimiques du bois

III.2 Lois d'usinage du bois et désignations pour le déchiquetage

III.2.1 Spécificité de production de plaquettes forestières

Dans ce chapitre nous distinguerons le déchiquetage et des opérations d'usinage courantes (rabotage, toupillage, tenonnage ...). Le déchiquetage du bois pour obtenir des plaquettes forestières est une opération d'usinage particulière car :

- Elle est réalisé sur :
 - du bois dit “Vert” c'est-à-dire fraîchement coupé ou séché à l'air ambiant pendant quelques mois. Il possède un taux d'humidité du bois qui ne descend pas en dessous de 42 % sur sec (30 % sur brut). Alors que pour les opérations d'usinage traditionnel, elles sont effectués sur du bois sec, qui a une humidité de 10 % sur sec (9 % sur brut).
 - du bois “Rond” c'est à dire des branches ou des rondins dont le rayon de courbure des cernes d'accroissement est très important par rapport celui qu'on trouve dans les avivés destinés à l'usinage traditionnel (Figure III-6).

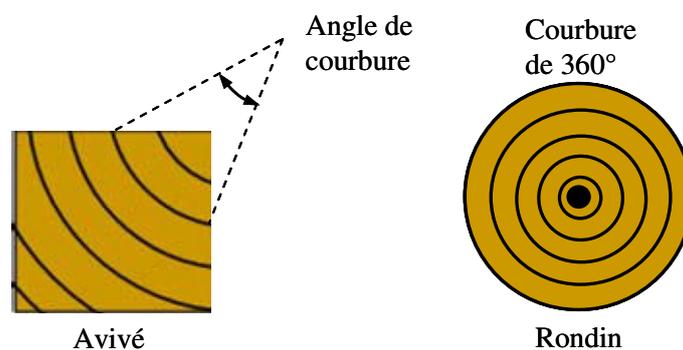


Figure III-6. Cernes d'accroissement et leurs rayons de courbure dans une poutre et un rondin

- Il n'y a pas de pièces : le produit est traditionnellement le déchet (copeaux ou plaquettes).
- L'énergie consommée lors de la coupe est beaucoup plus importante que celle demandée par l'usinage traditionnel car :
 - la direction de coupe est perpendiculaire au fil du bois, une direction qui demande le plus d'énergie.
 - la profondeur de passe est très importante, pouvant atteindre 30 mm alors qu'elle ne dépasse pas 1 mm en usinage traditionnel.
- La largeur de coupe est variable durant le passage du couteau, de 0 au moment de l'attaque jusqu'à une valeur maximale équivalente au diamètre du rondin avant qu'elle diminue jusqu'à 0 à la fin de la course, alors qu'elle est constante en usinage traditionnel.

III.2.2 Géométrie du couteau

Il est important de définir la géométrie du couteau et les surfaces de référence pour déterminer les modes et les angles de coupes :

La partie fonctionnelle du couteau qui intervient directement dans l'opération de coupe, se compose de la face de coupe (A_γ), la face de dépouille (A_α) et de l'arête qui est l'intersection de la face de coupe et de dépouille (Figure III-7).

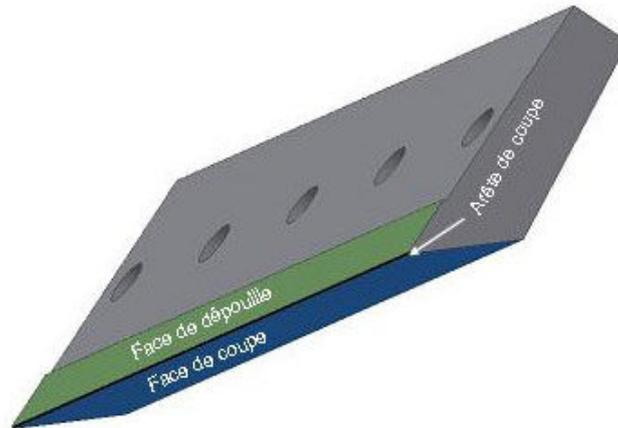


Figure III-7. Composition fonctionnelle de la partie active du couteau

Une grande partie des plaquettes formées glissent sur la surface de coupe, pendant que la surface de dépouille fait que l'arête soit le seul contact entre le couteau et la surface du bois générée. La définition angulaire de ces surfaces est importante, car elle a une grande influence sur la formation des plaquettes et sur les efforts de coupe.

III.2.3 Arête de coupe

Pour les déchiqueteuses actuellement utilisées pour la production de plaquettes forestières, on distingue 2 principaux types de coupe en fonction de l'arête de coupe (Figure III-8) : « Coupe droite » pour une arête parallèle à l'axe de rotation, comme dans le cas des déchiqueteuses à tambour et « coupe fauchante ou arasante » si l'arête est perpendiculaire à l'axe de rotation, comme pour les déchiqueteuses à disque.

On peut également trouver une « coupe mixte », où l'arête de coupe se trouve sur un corps d'outil conique, comme par exemple lors de l'utilisation de Canter.

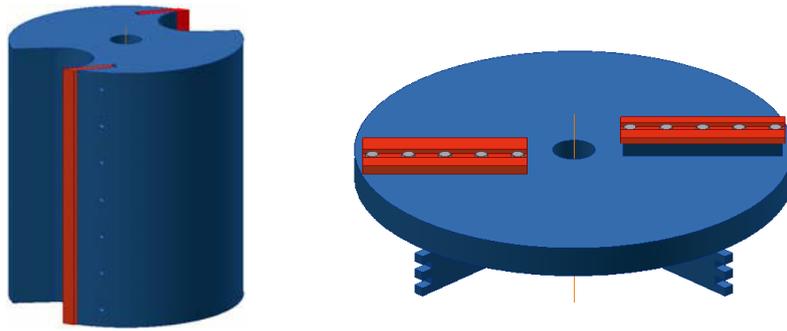


Figure III-8. Orientation de l'arête de coupe par rapport à l'axe de rotation

III.2.4 Modes de coupe en usinage du bois

III.2.4.1 Les modes de coupe pour les opérations d'usinage courantes :

La conséquence directe de l'anisotropie du bois est l'influence de la direction de coupe sur la génération de surface par le travail mécanique. Chacune des trois directions principales du bois régit différemment au travail mécanique de l'arête de coupe.

La désignation des modes de coupe comprend à la fois l'orientation de l'arête tranchante de l'outil et de la direction de coupe par rapport aux fibres. C'est [Kivimaa 1950], qui fût un des premiers à définir les trois modes principaux de coupe dans l'usinage bois (Figure III-9).

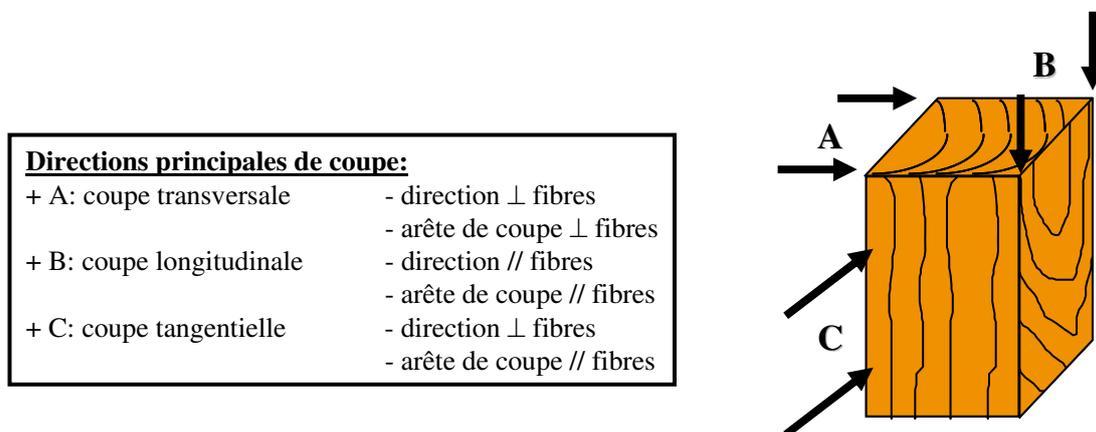


Figure III-9. Modes de coupe A, B, C [Kivimaa 1950]

De nos jours, la notation de McKenzie [McKenzie 1967], représentée sur la Figure III-10, est utilisée pour définir les différents modes de coupe. Il considère une combinaison de deux nombres dans la quelle le premier correspond à l'angle formé entre la direction de l'arête de coupe et le fil du bois, et le second à l'angle formé entre la direction de déplacement de l'outil et le fil du bois.

Orientation	Exemples d'opérations d'usinage	
1	90-90	Sciage à ruban (délignage)
2	90-0	Corroyage
3	0-90	Tenonnage par dérouleur (petite passe)
4	0-90	Tronçonnage
5	90-0	Toupillage avec faible passe
6	90-90	Fraisage en bout

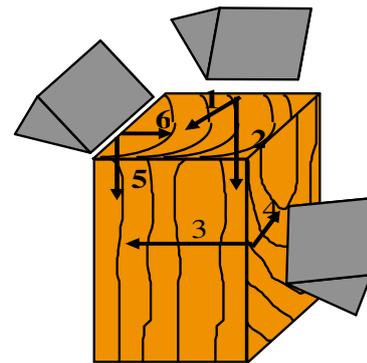


Figure III-10. Définition des différents modes de coupe [McKenzie 1967]

Avec les définitions de Kivimaa, il convient, pour définir avec précision les modes de coupe, de faire une distinction correspondant non plus à la direction de l'arête de coupe par rapport aux fibres, mais par rapport aux cernes annuels, il est alors possible de parler de coupe B- I et de coupe B-II ou de mode 90- 0 I et 90- 0 II, (Figure III-11).

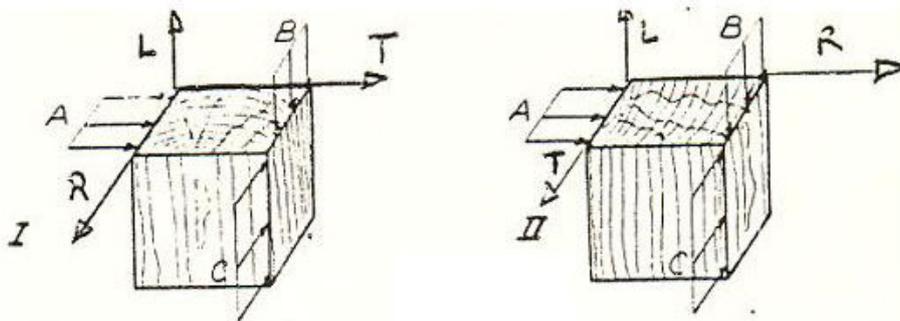


Figure III-11. Distinction des modes de coupe en fonction des cernes de croissance [Kivimaa 1950]

Dans la pratique, la coupe se fait rarement suivant une seule direction et l'arête de coupe est souvent inclinée par rapport aux fibres, comme nous montre la figure ci-dessous.

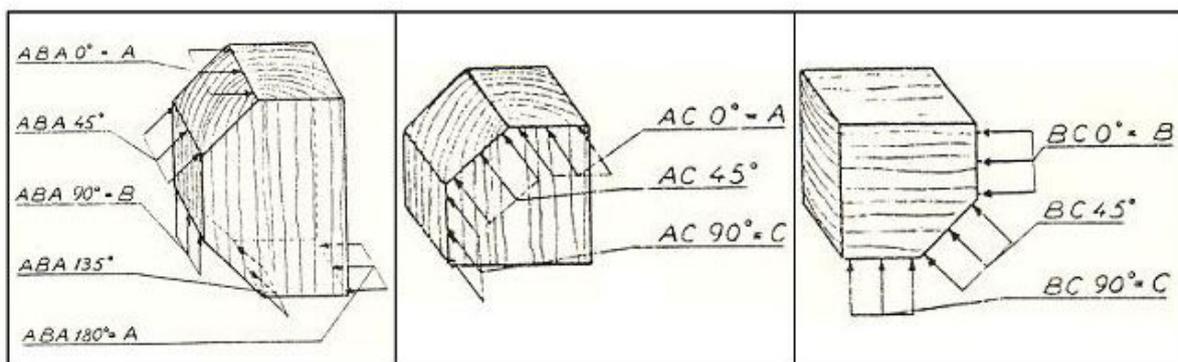


Figure III-12 . Inclinaison de 45° sur les trois modes de coupe [Thoms 1984]

Les efforts de coupe et la formation du copeau dépendent du mode de coupe utilisé. La Figure III-13 montre le processus de la formation de copeau selon les trois modes de coupe.

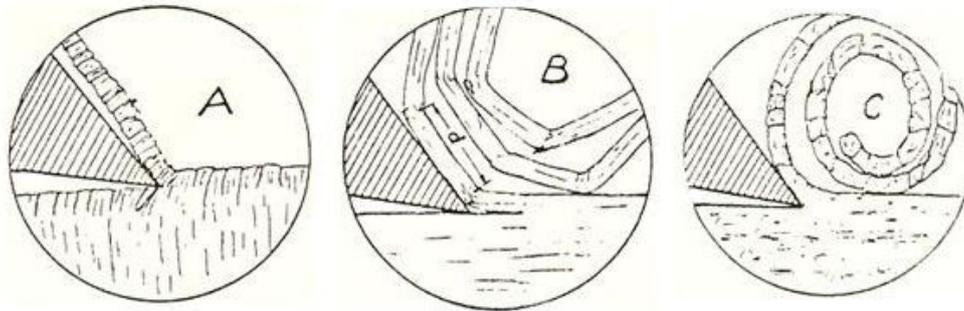


Figure III-13. Formation de copeau suivant le mode de coupe [Thoms 1984]

La direction de l'arête tranchante par rapport à l'avance du bois est en général perpendiculaire, car c'est la solution la plus facile à réaliser et à affûter, ce qui entraîne une entrée brutale de l'outil dans la matière peut provoquer des vibrations, une usure accélérée de l'outil et une surface de pièce finie de faible qualité. Pour un travail plus progressif et un effort mieux réparti, on incline alors le tranchant (coupe biaise).

III.2.4.2 Les modes de coupe spécifique au déchiquetage :

Dans ses travaux sur les déchiqueteuses à disque, Hartler [Hartler 1962a] a utilisé trois angles pour désigner la direction de l'amenage, ces angles sont : "Spout angle (ϵ)", "side angle (ν)" et l'angle (ω) qui est formé entre le fil du bois et la face du disque, qui se trouve dans le plan (XZ) (Figure III-14).

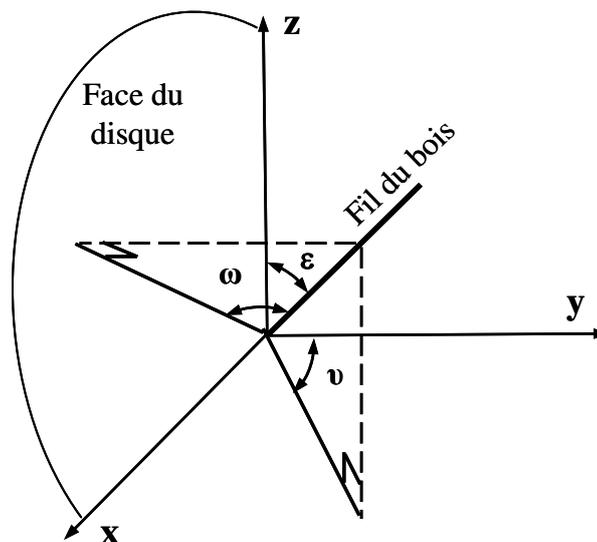


Figure III-14. Désignation de la direction de l'amenage selon Hartler

L'angle (ϵ) est formé entre le fil du bois et l'axe Z , pendant que (ν) est formé entre la projection de la direction de la fibre sur le plan horizontal (xy) et l'axe y qui est perpendiculaire sur la face du disque. Ses désignations ne seront pas utilisées durant cette thèse car elles ne sont pas adaptées à nos configurations de coupe.

Les expérimentations réalisées au cours de ma thèse ont été effectuées sur un banc d'essais, qui est basé sur le principe de la déchiqueteuse à disque. Nous allons nous inspirer des désignations de McKenzie [McKenzie 1961] concernant la direction de l'amenage et le mode de coupe. La Figure III-15 présente une coupe de l'ensemble (disque - éprouvette) selon le plan horizontal et une dans le plan vertical, toutes deux perpendiculaires à la face du disque.

Dans la coupe selon le plan horizontal, on peut visualiser le premier angle (ρ) (Figure III-16), étant donné que l'arête du couteau est toujours parallèle à la surface du disque. L'angle (ρ) est l'angle formé entre la direction de l'arête de coupe et le fil du bois désigné par « angle d'inclinaison horizontal ».

Dans la coupe selon le plan vertical, on peut visualiser le deuxième angle (ϵ) (Figure III-17), étant donné que le plan de coupe est toujours parallèle à la surface du disque. L'angle (ϵ) est l'angle formé entre la direction de déplacement de l'outil et le fil du bois désigné par « angle d'inclinaison vertical ».

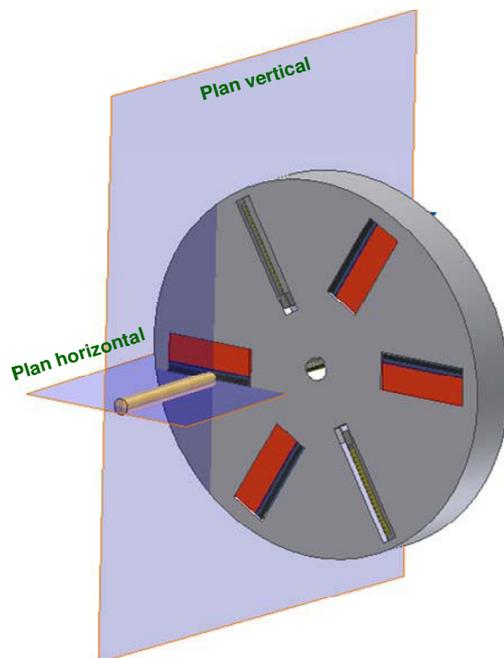


Figure III-15. Ensemble Disque - éprouvette selon deux plans

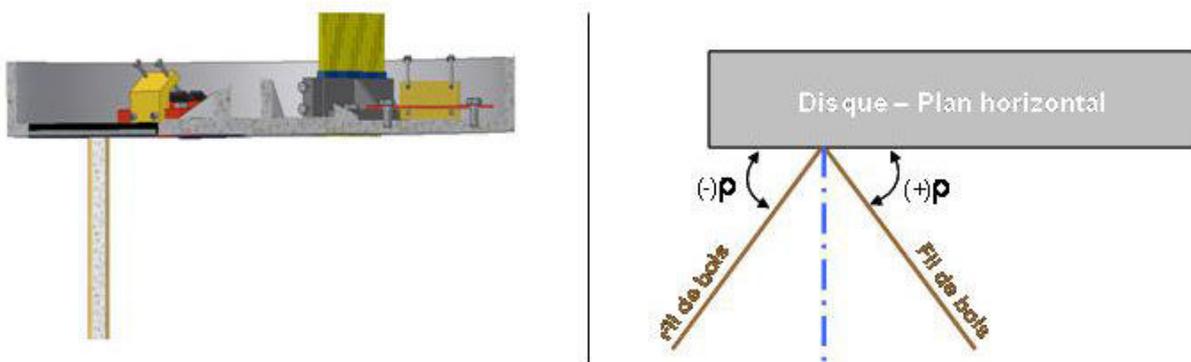


Figure III-16. Coupe selon le plan horizontal

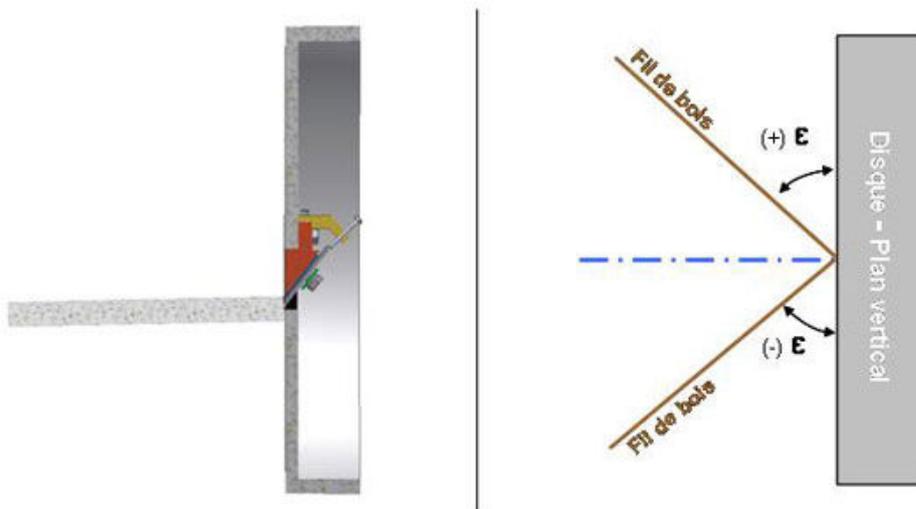


Figure III-17. Coupe selon le plan vertical

III.2.5 Angles de coupe

III.2.5.1 Les angles de coupe principaux :

Selon Barette [Barette 2006] et Martin [Martin 1994], il y a trois angles de coupe principaux, qui ont des effets plus ou moins importants sur le processus de l'usinage.

III.2.5.1.1 Angle de coupe ou d'attaque (γ):

C'est un angle important, car de lui dépend une grande partie de la qualité du travail exécuté. Il conditionne la pénétration de l'arête tranchante, donc le niveau d'énergie absorbé par la coupe. Il varie suivant la dureté du matériau (de 10° à 40°).

L'augmentation de l'angle de coupe diminue la déformation du copeau donc les efforts de coupe. Cette augmentation entraîne une diminution de l'angle de taillant (β) qui conduit à un bec fragile et facilite la production d'éclats surtout lors de coupe en mode B.

III.2.5.1.2 Angles de taillant (β):

C'est l'angle de l'arête tranchante et il situe entre 35° et 45° pour les modes A et B et jusqu'à 20° dans la direction C.

Il confère à l'outil sa capacité à absorber les chocs et les efforts. Plus cet angle sera faible, plus l'usure de l'arête tranchante sera rapide. Il existe une valeur critique en dessous de laquelle l'usure devient très rapide, cette valeur dépend du matériau travaillé, de la constitution de l'outil, de l'épaisseur du copeau et de la direction de coupe.

III.2.5.1.3 Angle de dépouille (α):

Cet angle est sans grande influence sur les efforts de coupe dans la limite où il évite le talonnage du corps du couteau contre la surface usiné et par conséquent l'échauffement de l'outil et le brûlage du bois. Sa valeur varie de 5° à 25° . Au dessus de 15° , l'effort croît avec α particulièrement en présence du mode de coupe A.

La Figure III-18 montre les angles de coupe sur un outil d'usinage rotatif du bois, cette désignation est applicable sur un système de déchiquetage à tambour. D'ailleurs toutes les autres désignations utilisées dans l'usinage du bois sont applicables sur le système de déchiquetage à tambour, c'est parce que l'opération de coupe par un tambour ressemble à celle effectuée traditionnellement par un outil d'usinage rotatif. La déchiqueteuse à tambour travaille en avalant en mode de coupe ($90 - 90$). L'arête de coupe se déplace selon un cercle appelé le cercle de coupe.

La somme de ces trois angles est égale à 90° :

$$\text{équation III-1,} \quad \alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

La somme des angles de coupe principaux

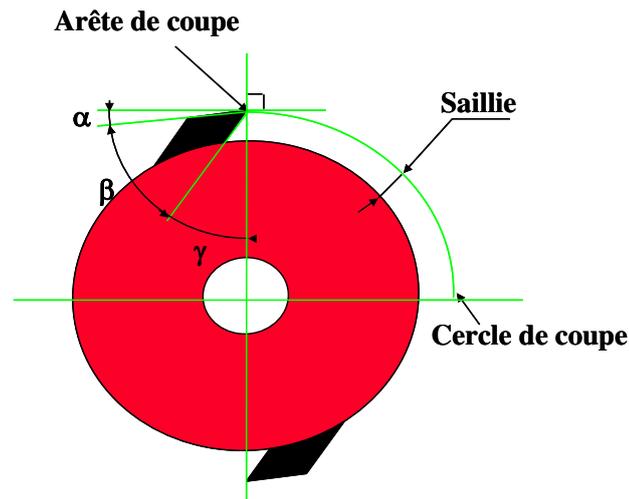


Figure III-18. Angles de coupe principaux

La Figure III-19 montre les angles de coupe sur un outil d'usinage bois pour la coupe orthogonale, ce mode de coupe est très proche de celui effectué par une déchiqueteuse à disque. Dans ces deux modes de coupes l'arête de coupe déplace d'un seul plan.

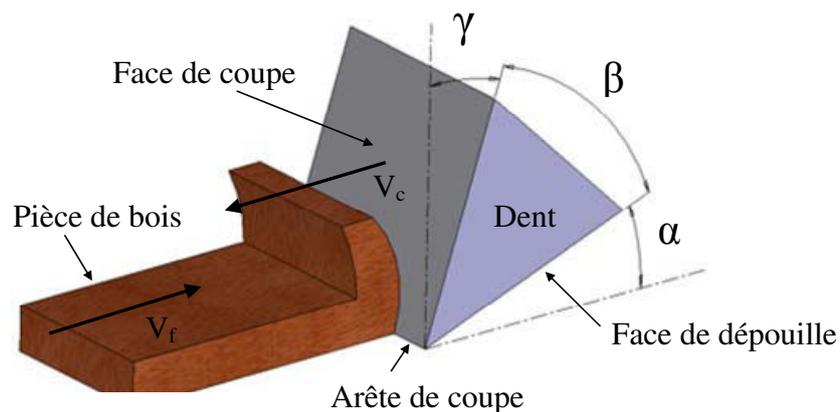


Figure III-19. Angles de coupe en coupe orthogonal [Koch 1964]

III.2.5.1.4 Angles de coupe principaux en déchiquetage du bois :

L'opération de déchiquetage par une déchiqueteuse à disque est traditionnellement représentée par quatre angles (Figure III-20). La somme de ces quatre angles est égale à 90° [Hartler 1962b].

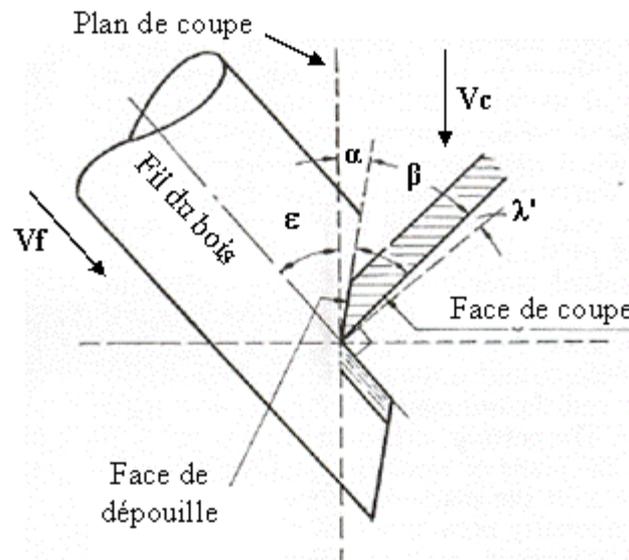


Figure III-20. Angles de coupe traditionnels pour le déchetage à disque

Ces quatre angles sont les suivants :

- Angle de l'inclinaison (ϵ), entre le fil du bois et le plan de coupe,
- Angle de dépouille (α), entre la face de dépouille et le plan de coupe,
- Angle de taillant (β), entre la face d'attaque et la face de dépouille,
- Angle complémentaire (λ')¹, entre la face d'attaque et la perpendiculaire au fil du bois.

Cette désignation est généralement utilisée pour représenter les angles de coupe, quand l'aménagement du bois est effectué par gravité. Dans cette situation, l'angle d'inclinaison du bois (ϵ) varie entre 30° et 40°, l'angle de taillant est entre 30° et 37° pendant que l'angle de dépouille (α) est compris entre 1° et 7° [McLauchlan 1979]. Cette désignation a montré ses limites quand nous l'avons appliqué avec un mode de coupe (90 – 90). Dans ce cas l'angle ϵ est égale 90° et par conséquent l'angle complémentaire est devenu négatif.

Nos désignations sont basées sur celles utilisées dans l'usinage traditionnelle du bois, quatre angles peuvent bien représenter l'opération de coupe effectuée par un système de déchetage à disque (Figure III-21). Sur cette figure, il est possible de constater que l'arête de coupe se déplace dans un seul plan, appelé plan de coupe. Ses quatre angles sont :

- l'angle de dépouille (α), entre la face de dépouille et le plan de coupe,
- l'angle de taillant (β), entre la face d'attaque et la face de dépouille,

¹ Le symbole utilisé pour désigner l'angle complémentaire est (λ), mais pour ne pas confondre avec l'angle de l'inclinaison de l'arête, nous l'avons remplacé par (λ')

- l'angle de coupe ou d'attaque (γ), entre la face d'attaque et la normale à la face du disque.

Comme dans l'usinage bois la somme des ces angles est 90°

$$\text{équation III-2, } \alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Somme des trois premiers angles de coupe, déchiqueteuse à disque

- l'angle de coupe réel entre la face d'attaque et le fil de bois est γ_r . Dans les cas où la direction de l'amenage est horizontale ($\varepsilon = 90$), l'angle de coupe (γ) et l'angle de coupe réel (γ_r) sont égaux. Selon McKenzie [McKenzie 1961] cet angle a un effet important sur la formation des copeaux et les efforts de coupe engendrés dans la coupe orthogonal $90-90^1$.

$$\text{équation III-3, } \gamma_r = 180 - (\varepsilon + \alpha + \beta)$$

Angle de coupe réel, déchiqueteuse à disque

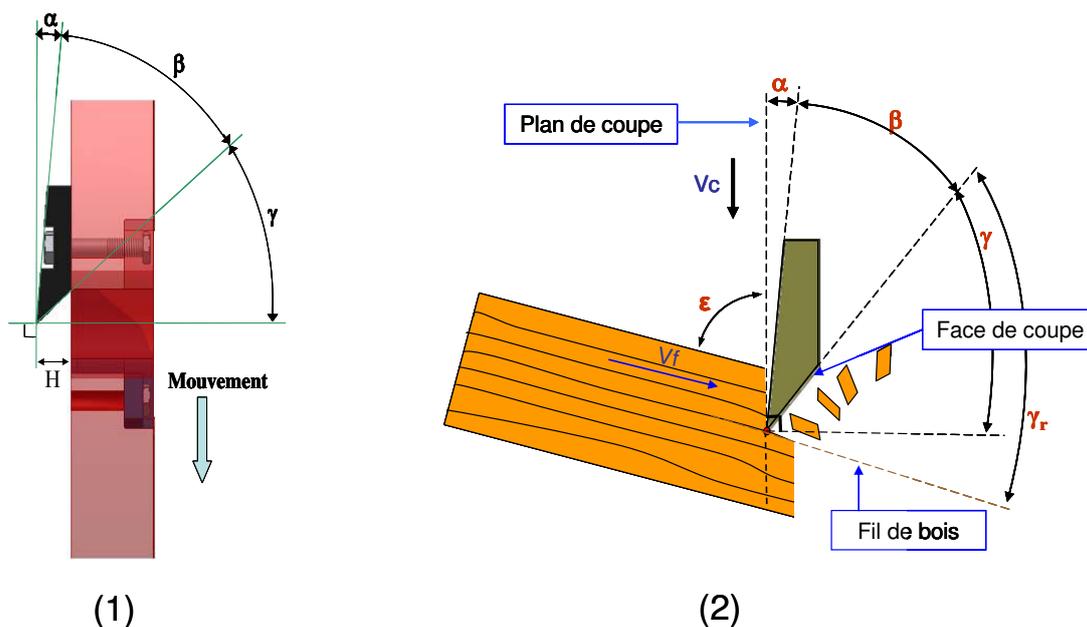


Figure III-21. Angles de coupe principaux, déchiqueteuse à disque

ε – Angle d'inclinaison vertical,

H – Saillie de couteau,

V_c – Vitesse de coupe (m/s),

V_f – Vitesse d'amenage (m/min).

¹ McKenzie considère l'angle de coupe (γ) est celui qui est situé entre le fil du bois et la surface de coupe.

Cette désignation des angles de coupe et du mode coupe, nous permet de définir toutes les positions de déchiquetage possibles pour l'ensemble des conceptions actuelles de systèmes de déchiquetage. Elle permet de plus de définir indépendamment la position de coupe et celle d'aménagement. Dans les futurs travaux sur le système de déchiquetage à disque ou à tambour, des modifications sur les conceptions actuelles sont possibles afin d'améliorer la performance. Dans le cas où les angles de coupe principaux ne suffiraient pas pour décrire la nouvelle conception, les angles de coupe secondaire seraient utilisés (Annexe A).

III.2.6 Mouvement de coupe :

III.2.6.1 Modes du travail :

La déchiqueteuse à disque ne fonctionne ni en opposition ni en avalant, car l'arête du couteau ne se déplace que dans un seul plan.

III.2.6.2 Équations temporelles de la trajectoire du couteau :

Dans la mesure où les mouvements du couteau et de la pièce du bois sont connus, il est possible de définir les équations temporelles du point caractérisant la trajectoire du couteau, en considérant (t) le temps en secondes, (R) le rayon de coupe en mm, (V_f) la vitesse d'aménagement en mm/s, (ϖ) le taux de rotation en rad/s, (N) la vitesse de rotation en tr/s.

Pour une déchiqueteuse à disque (Figure III-22), la coordonnée du point M sur l'axe \overrightarrow{OU} est constante, sa valeur est ($H + X$). On peut calculer les coordonnées de M dans le repère (OVZ) par l'équation III-4.

$$\text{équation III-4, } \begin{cases} V_M(t) = R \cdot \sin(\varpi \cdot t) \\ Z_M(t) = R \cdot \cos(\varpi \cdot t) \\ \varpi = 2 \cdot \pi \cdot N \end{cases}$$

Avec une vitesse d'aménagement (V_f) en mm/s, (Z) le nombre de dents et la vitesse de rotation (N) en tr/s, l'équation III-5 nous donne la valeur de l'avance par dent (f_z) en mm :

$$\text{équation III-5, } \begin{cases} \text{Si } H > \frac{V_f}{N \cdot Z} ; f_z = \frac{V_f}{N \cdot Z} \\ \text{Si non ; } f_z = H \end{cases}$$

Avance du bois par dent (couteau)

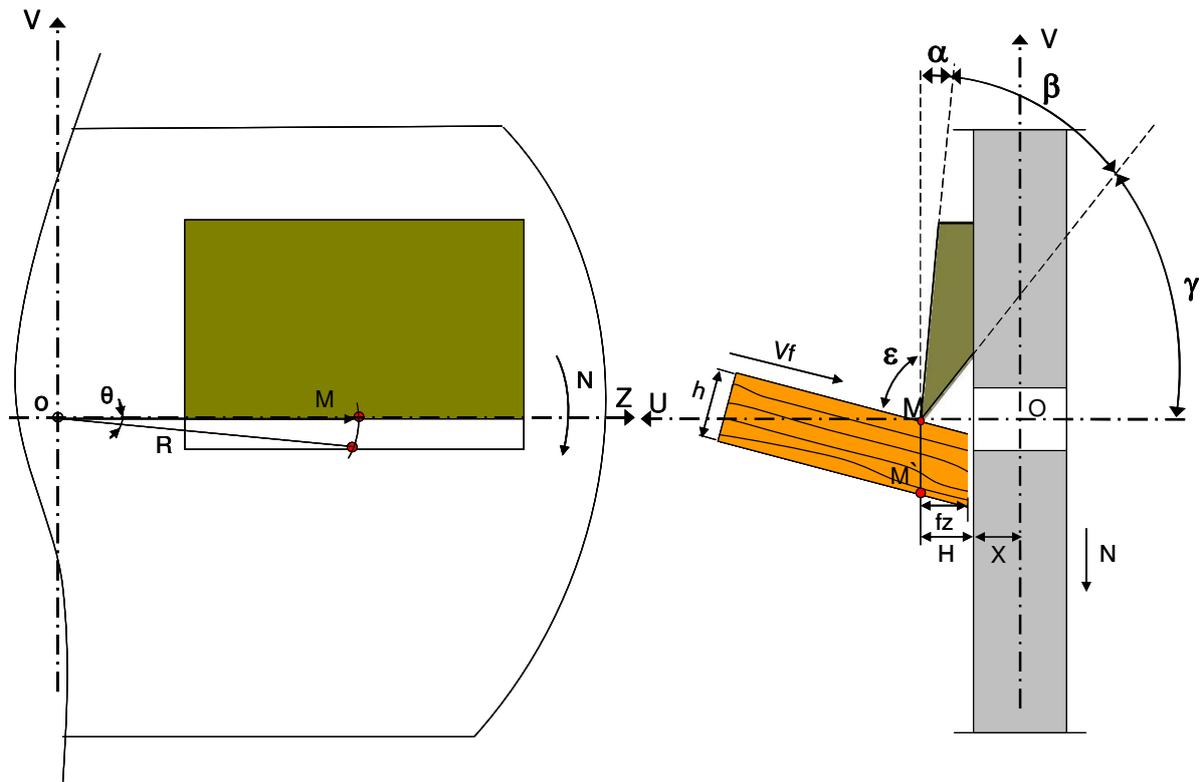


Figure III-22. Mouvement du couteau et de la section du bois pour une déchiqueteuse à disque

III.2.6.3 Variation de largeur de coupe (b):

La variation de la largeur de coupe durant le passage d'un couteau, mentionnée précédemment III.2.1, est une caractéristique importante qu'il faut prendre en compte. La Figure III-23 montre cette variation pour le passage d'un couteau durant le déchetage d'un rondin de 150 mm de diamètre, à une vitesse de coupe de 26 m/s. En conséquence à cette variation, les efforts de coupe vont également varier car, selon les lois d'usinage, les efforts de coupe croissent avec l'augmentation de la largeur de coupe.

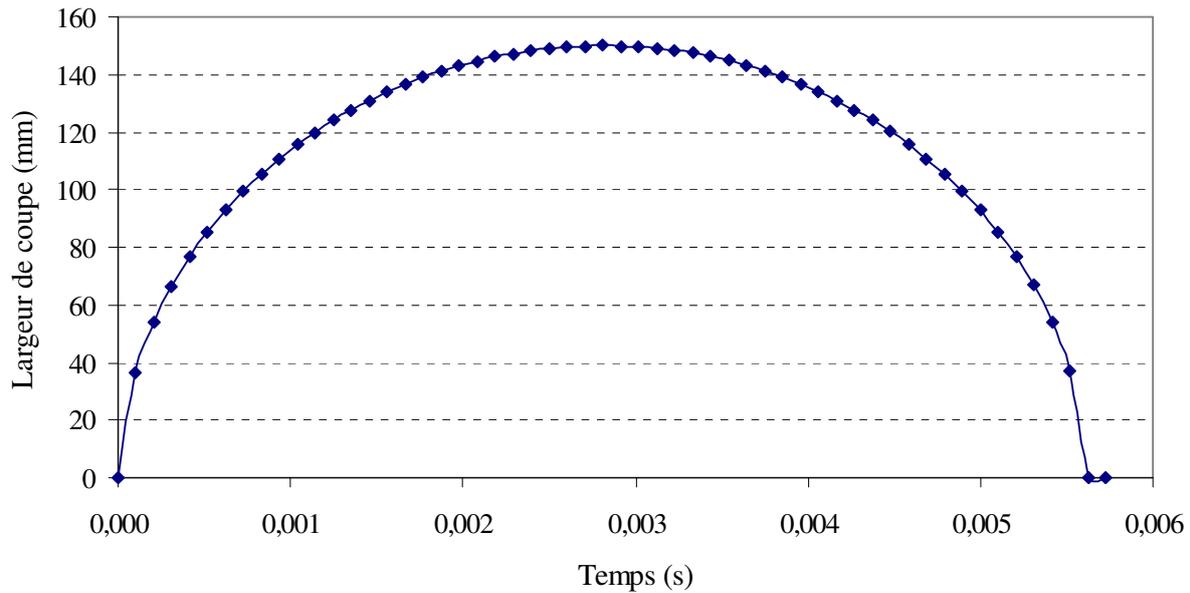


Figure III-23. Variation de la largeur de coupe durant le déchetage

III.3 Conclusion

Ce chapitre a défini le matériau bois et les lois de base nécessaires pour les travaux de la thèse. Il a aussi donné une idée de la complexité du domaine du déchetage du bois. Il va de soit que le nombre de paramètres d'usinage est très important dans le cas de matériaux hétérogènes comme le bois. Cette complexité a joué un rôle négatif sur les avancées théoriques et techniques de l'usinage du bois en général et plus particulièrement sur son déchetage. D'où la nécessité d'investir plus dans ce domaine afin de pouvoir remplir le vide scientifique sur les conditions optimales du processus de déchetage du bois.



*Chapitre IV. Matériels de déchiquetage et le
banc d'essais*

IV.1 Introduction

Le déchiquetage du bois est réalisé grâce aux couteaux qui fragmentent le bois, à la différence des broyeurs qui ont des marteaux ou des dents avec pour objectif de réduire la taille du bois sans prendre en compte l'homogénéité des plaquettes, leur forme, le pourcentage de poussières ou celui de plaquettes hors norme dénommées "queues de déchiquetage". Selon le produit final recherché et la qualité de la matière première, les couteaux sont montés de différentes façons sur des rotors de formes différents. Les déchiqueteuses sont par conséquent classées en deux catégories : celles utilisées pour transformer les rondins en plaquettes et éléments équarris, et celles utilisées pour transformer la totalité du bois en plaquettes. Ces deux classes de déchiqueteuses sont utilisées dans l'industrie alors qu'en déchiquetage forestier, seule la deuxième classe de déchiqueteuses est utilisée. Une analyse détaillée des déchiqueteuses utilisées dans l'industrie est présentée au sein de l'annexe B. Il est important de connaître les avancées techniques utilisées sur les déchiqueteuses industrielles afin de déterminer les potentialités applicables aux déchiqueteuses forestières. Dans ce chapitre je vais présenter les caractéristiques des déchiqueteuses forestières du point de vue technique et fonctionnel afin de pouvoir les comparer et tirer des conclusions. Enfin, je vais représenter le banc d'essais que nous avons mis en place dans notre laboratoire sur le site d'Épinal.

IV.2 Déchiqueteuses forestières

Dans le langage courant, la déchiqueteuse est souvent désignée par le terme broyeur forestier. Le marché propose un grand nombre de déchiqueteuses différentes par leur capacité, leur mode d'aménagement et leur système de coupe.

IV.2.1 Type de déchiqueteuses selon leur capacité

La capacité de déchiquetage est une caractéristique importante pour différencier les déchiqueteuses. Plus cette capacité sera importante, plus les bois acceptés posséderont de gros diamètre et plus le broyeur nécessitera de la puissance.

IV.2.1.1 Les petites déchiqueteuses de jardin :

Ces petites déchiqueteuses sont utilisées par les particuliers ou les paysagistes afin de réduire en plaquettes des branchages pouvant aller jusqu'à 5 cm de diamètre et pour une productivité jusqu'à 0.5 m_{ap}/h. On les trouve dans les grandes surfaces de bricolage ou les jardinerie à des prix entre 500 et 3000 €.

IV.2.1.2 Les déchiqueteuses portées ou tractées, actionnées par la prise de force d'un tracteur :

Les déchiqueteuses actionnées par la prise de force se tractent ou se montent sur le relevage trois points du tracteur. Ce système permet l'exploitation des petits bois d'éclaircies et d'élagage. Les diamètres de bois acceptés vont de 5 à 40 cm et la productivité de 5 à 40 m_{ap}/h, selon la taille de la machine et la puissance du tracteur. Ces déchiqueteuses sont destinées aux petites structures (particuliers, communes, associations, coopératives agricoles), et sont appréciées pour leur légèreté, leur faible coût et leur disponibilité. Le coût de ces matériels est généralement compris entre 80 000 € et 100 000 € [Rougié 2009].



Figure IV-1. Déchiqueteuse actionnée par la prise de force d'un tracteur (source : Noremat)

IV.2.1.3 Les déchiqueteuses de branches tractées, actionnées par leur propre moteur :

Ces déchiqueteuses sont plus flexibles que les précédentes car elles sont autonomes en terme de fonctionnement, bien qu'elles nécessitent d'être tractées par un tracteur ou autre moyen. Elles permettent une production de plaquettes à partir des bois pouvant atteindre 40 cm de diamètre et une productivité entre 10 et 40 m_{ap}/h. Le coût de ce matériel est à peu près le double du prix d'une déchiqueteuse actionnée par la prise de force de la même taille. Ce type de matériel concerne les structures professionnelles [ITEBE 2001b].



Figure IV-2. Déchiqueteuse de branche actionnée par son propre moteur (source : Bandit)

IV.2.1.4 Les déchiqueteuses mobiles de forte capacité

Les grosses déchiqueteuses de forte capacité sont montées sur porteur forestier ou semi-remorque et fonctionnent en général avec un porteur forestier et un camion-benne. Ce système permet une production de plaquettes de 30 à 80 m_{ap}/h , pour un diamètre de bois qui peut atteindre 80 cm. Ce type de machine est adapté aux grosses productions des coopératives forestières sur des surfaces conséquentes. L'achat d'un tel matériel demande un important investissement qui est compris entre 300 000€ et 500 000 €.



Figure IV-3. Déchiqueteuses de forte capacité (source : Silvatec, Jenz)

Un résumé des caractéristiques de différentes catégories de déchiqueteuses est donné par le Tableau IV-1 :

Type de déchiqueteuses	Diamètre de bois (cm)	Productivité (m_{ap}/h)	Prix (€)
Petites pour le jardin	jusqu'à 5	jusqu'à 0,5	1000 - 3000
Actionnées par la prise de force	5 - 40	5 - 40	80×10^3 - 100×10^3
Actionnées par leur propre moteur	jusqu'à 40	10 - 40	$2 \times (80 \times 10^3 - 100 \times 10^3)$
Mobile de forte capacité	jusqu'à 80	30 - 80	30×10^3 - 500×10^3

Tableau IV-1. Déchiqueteuses forestières selon la capacité - récapitulatif

IV.2.2 Systèmes d'aménagement des déchiqueteuses

Il existe plusieurs systèmes d'aménagement qui se différencient par la position de la trémie, par le dispositif d'entraînement de bois et par le mode d'alimentation [ITEBE 2001a].

Selon sa position, la trémie peut être latérale ou frontale par rapport à l'axe de progression de l'engin ou peut être mixte, c'est-à-dire réglable dans l'une ou dans l'autre de ces deux positions. Le dispositif d'introduction du bois, s'il existe, peut se faire par des rouleaux à picots, ou par un tapis roulant ou un dispositif mixte des deux systèmes (Figure IV-4). Il existe un ancien système d'introduction du bois, qui consiste à un réservoir doté d'un piston pour pousser le bois, mais ce système n'est plus courant. Sur des machines simples où ce dispositif n'existe pas, un goulot incliné permet l'alimentation par gravité.



Figure IV-4. Dispositifs d'introduction du bois (source : FARMI Forest, Pezzolato, Norematt)

Ces différents dispositifs d'introduction du bois ont des avantages et des inconvénients, on les a évalués selon plusieurs critères comme présenté dans le Tableau IV-2 :

Capacité Système	Amenage de plusieurs types d'éprouvettes	Amenage de différentes tailles d'éprouvettes	Maintien l'éprouvette	Maîtrise de la direction d'amenage	Variation de la vitesse d'amenage
Deux rouleaux ameneurs	++	++	+	+	+++
Tapis roulant et rouleau ameneur	+++	+++	+	+	+++
Piston et réservoir	-	-	-	+	-
Trémie et amenage par gravité	++	++	-	-	-

- Mauvais, + Moyen, ++ Bien, +++ Très bien

Tableau IV-2. Évaluation des différents dispositifs d'entraînement du bois

L'alimentation des déchiqueteuses s'effectue manuellement pour les petits bois ou pour un déchiquetage occasionnel, à la grue avec grappin pour les gros rondins ou pour une utilisation professionnelle (utilisation intensive).

IV.2.3 Systèmes de coupe en déchiquetage

Trois systèmes de coupe sont principalement utilisés dans les déchiqueteuses forestières : système à vis sans fin, système à tambour et système à disque. Dans ce paragraphe, on va analyser le principe de fonctionnement et les différentes conceptions de ces trois systèmes de coupe afin de dévoiler leurs avantages et inconvénients, et à la fin les comparer selon plusieurs critères.

IV.2.3.1 Déchiquetage par vis sans fin conique :

Les déchiqueteuses à vis sans fin sont utilisées de façon marginale dans le marché.

Une arête de coupe, en matériau trempé, est implantée sur la périphérie de la vis, permettant à la fois d'amener le bois et de le couper (Figure IV-5).

La taille des plaquettes produites dépend la forme de la vis et sa taille. Leur longueur est égale au pas de la vis, ce qui rend impossible une modification du calibre des plaquettes. L'inconvénient de ce système est que les plaquettes produites ne sont pas homogènes et elles ont une taille grossière par rapport à celles produites par les autres systèmes de coupe [Vares 2005].

L'arête tranchante coupe de façon continue, le bois est plutôt "sectionnant" que "tranché" pour produire les plaquettes. En comparant avec les autres systèmes de déchetage, l'unité de coupe par vis sans fin demande moins de puissance et l'arête tranchante est moins sensible à l'impureté du bois. Ce système est conçu pour déchetter les chutes d'éclaircie et les rondins longs, il n'est pas disponible en grande taille, ce qui limite son action aux bois de petit diamètre [Tolfts 2006b]. Le chargement de bois est généralement manuel et un appareil spécial est nécessaire pour l'affûtage de l'arête tranchante.

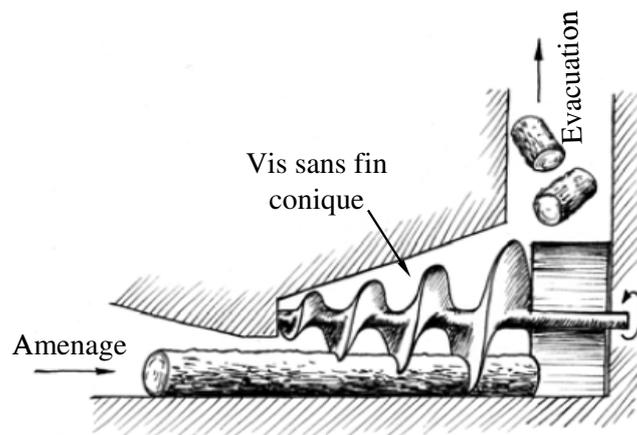


Figure IV-5. Système de déchetage par vis sans fin [Vares 2005]

IV.2.3.2 Décheteteuse à tambour :

Les couteaux sont montés sur un cylindre rotatif (Figure IV-6) et toujours arrangés parallèlement à l'axe de rotation selon trois conceptions : le tambour aux multiples couteaux, le tambour aux couteaux de taille égale à sa largeur, et le tambour composé (Figure IV-7).

Le bois est généralement tranché perpendiculairement au fil du bois avec une mode de coupe 90 – 90, avec parfois une inclinaison de la direction de l'amenage [Hoglund 1980].

La taille des plaquettes est contrôlée par la grille de calibration. Son action est de laisser sortir du tambour les particules ayant deux dimensions inférieures à celles des mailles de la grille alors qu'elle retient les autres particules qui seront de nouveau coupées. Ce mode de broyage augmente le pourcentage des poussières de bois (fines) dans les plaquettes produites par un système à tambour. Par conséquent, ce pourcentage est plus important en comparaison à celui produit par un autre système du fait de ces coupes multiples d'une même plaquette. Les plaquettes tendent à avoir un couleur marron à cause du frottement qu'elles ont subi par le tambour contre la grille [Spinelli 2001].

L'ouverture de l'orifice d'alimentation du bois est assez grande et a une forme rectangulaire, avec une largeur égale à celle du tambour. Cette caractéristique avec l'existence de la grille donne l'avantage à ce système pour déchetage les chutes courtes et larges.

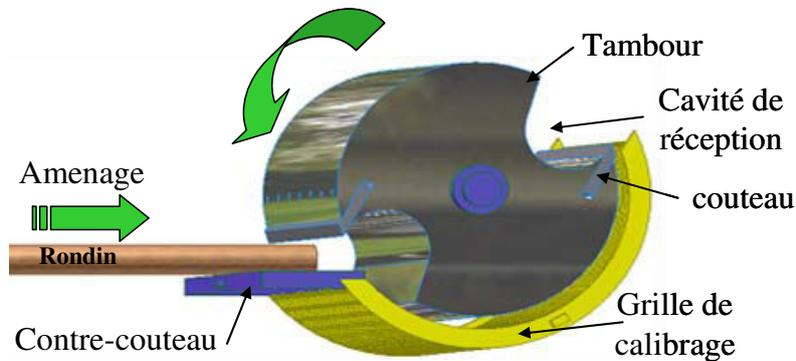
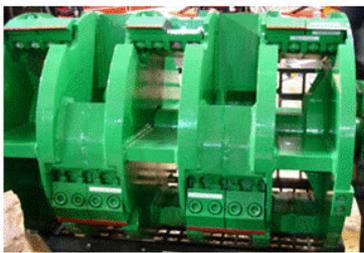


Figure IV-6. Système de déchetage à tambour



Tambour multiples couteaux (source: Jenz)



Tambour à des couteaux de taille égale à sa largeur (source: Brunette)



Tambour composé (source: Karl Kuemmerling)

Figure IV-7. Différentes conceptions du tambour

Les plaquettes ne sont pas toujours éjectées avec suffisamment de force. Pour y remédier, on a parfois recours à un système de ventilation. Dans ce cas, les copeaux sont acheminés jusqu'à ce dispositif par une vis sans fin.

Le diamètre du rondin influence l'angle selon lequel le couteau attaque le bois. La taille des plaquettes est influencée par cet angle, et les paramètres suivants : la vitesse d'amenage, la vitesse de coupe et les angles de coupe. Le débit du bois décheté par un système à tambour est moins important que celui d'un système de déchetage à disque de même puissance,

mais le système à disque produit des plaquettes qui sont moins homogènes du point de vue de leur distribution granulométrique [Levy 2006].

IV.2.3.3 Déchiqueteuse à disque :

Le disque comporte plusieurs couteaux disposés radialement et des orifices qui sont parfois munis de mini-couteaux. Des pales d'évacuation sont fixées sur le dos du disque, équipées parfois de "peignes" ou "éclateurs" (Figure IV-8).

Lors du passage d'un couteau au niveau du bois à déchiqueter, une tranche est sectionnée sous l'effort de cisaillement résultant de l'action d'un cisaillement entre le couteau et le contre-couteau. Les plaquettes se forment sous l'effet des fissurations qui se créent au moment où la tranche commence à glisser sur la face de coupe du couteau. La taille des plaquettes peut diminuer lors de l'acheminement de ces plaquettes jusqu'à leur réception à cause des chocs qu'elles subissent contre le capot, les pales d'évacuation ou entre elles. Les plaquettes sont éjectées dans la goulotte de la machine grâce à la force centrifuge et au flux d'air fourni par les pales d'évacuation.

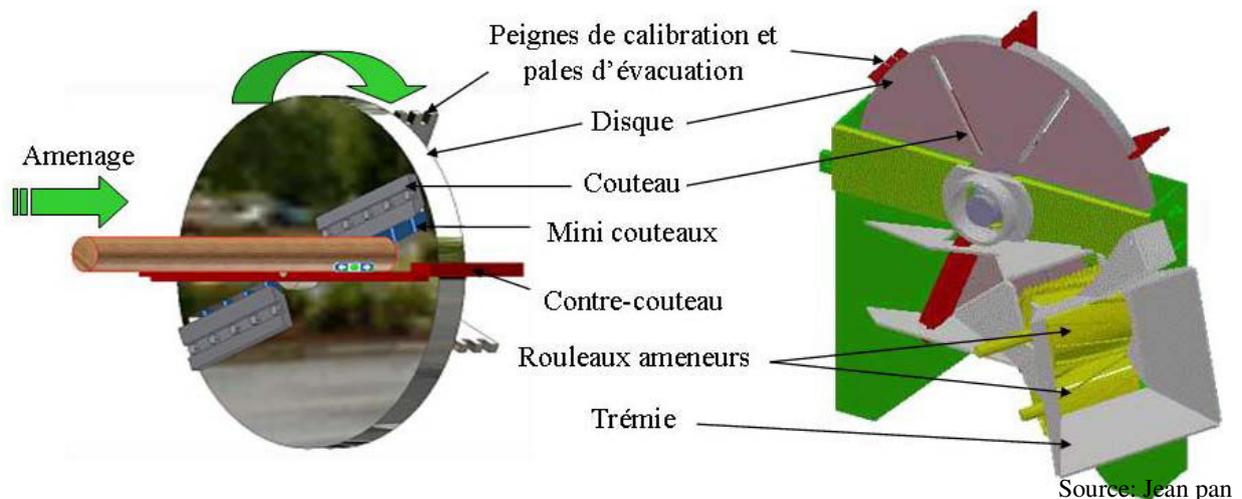


Figure IV-8. Système de déchiquetage à disque

Selon Borroni [Borroni 2005], le bois doit subir le moins possible de déplacements parasites lors de son introduction dans la trémie afin de réduire de façon considérable l'apparition des queues de déchiquetage. Si la trémie est orientée à 90° du disque porte-couteaux, le bois est maintenu proche du disque. Par contre, s'il y a un angle de 45° entre la trémie et le disque, l'espace entre le disque et les rouleaux est alors plus grand, la branche peut alors davantage fléchir sous l'action du disque et prendre ainsi une direction parallèle au couteau. En

conséquence, un segment plus long est sectionné, et donne lieu à des queues de déchetage. De plus, afin de remédier à ce problème, on ajoute des niveaux des coupes supplémentaires, comme des petits couteaux perpendiculaires, appelés également mini-couteaux, derrière les couteaux. Des peignes affûtés peuvent être également joints pour fragmenter les copeaux au passage (Figure IV-10). L'inclinaison du disque peut être dans le plan horizontal ou dans le plan vertical. La plupart des déchetageuses à disque et celles à tambour sont équipées par un système d'asservissement, dénommé "No-Stress". Ce système a pour objectif d'arrêter l'amenage du bois quand la vitesse du rotor descend en dessous d'un certain seuil, et de relancer l'amenage quand la vitesse du rotor reprend sa valeur maximale. La Figure IV-9 montre le principe général de fonctionnement d'une déchetageuse à disque conçue pour produire des plaquettes destinées au bois-énergie.

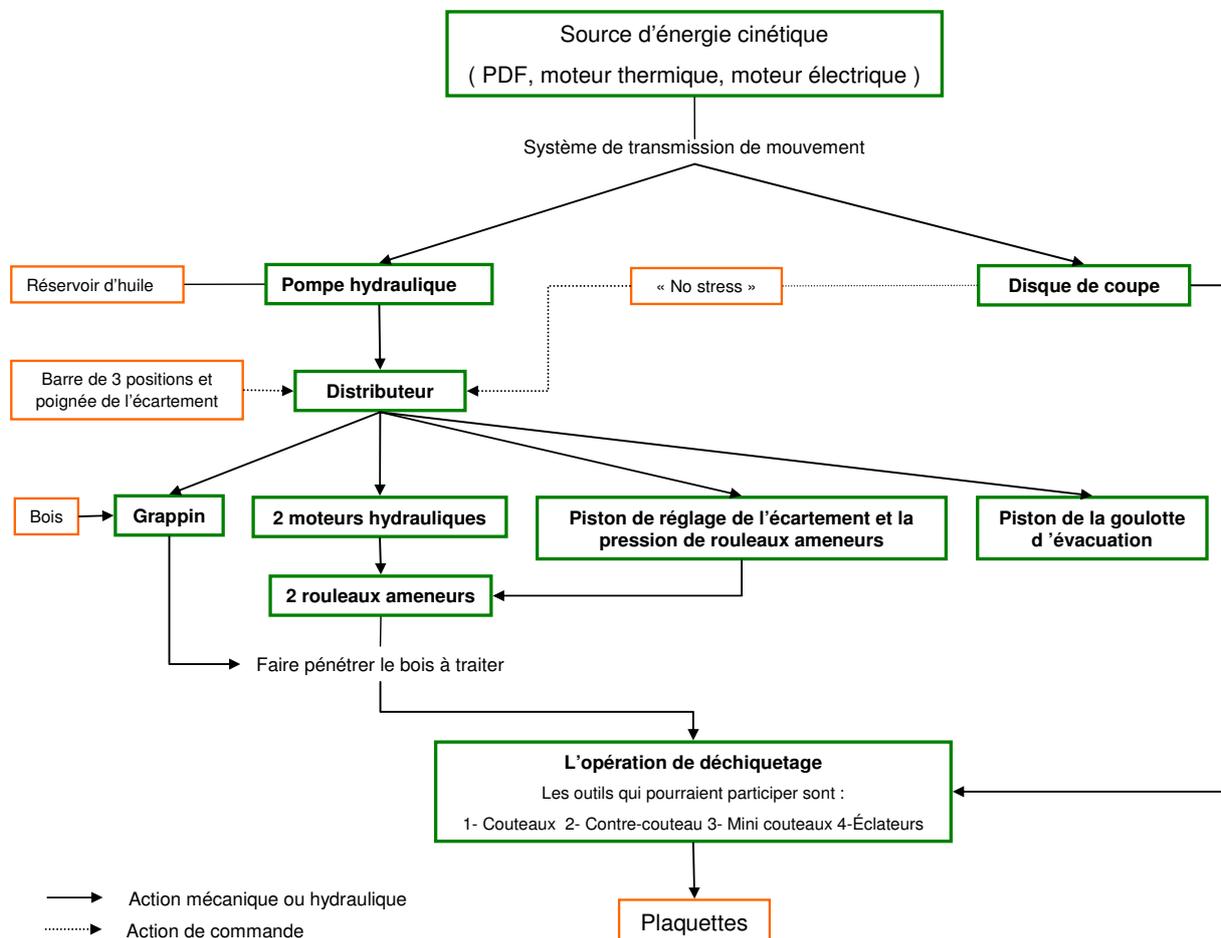


Figure IV-9. Organigramme du principe de fonctionnement d'une déchetageuse à disque

Le système de coupe pour les déchetageuses à disque se trouve sur des machines de toutes capacités. Le disque peut atteindre 170 cm de diamètre, pour un bois avec un diamètre maximal coupé de 70 cm. Le nombre de couteaux et la taille du disque dans les

déchetageuses forestières sont moins importantes que celles des machines industrielles, afin de les rendre moins lourdes et de diminuer la puissance, et ainsi la taille du moteur nécessaire à l'entraînement. Alors que le nombre de couteaux ne dépasse pas six pour les engins forestiers, il peut dépasser les vingt pour les déchetageuses industrielles.

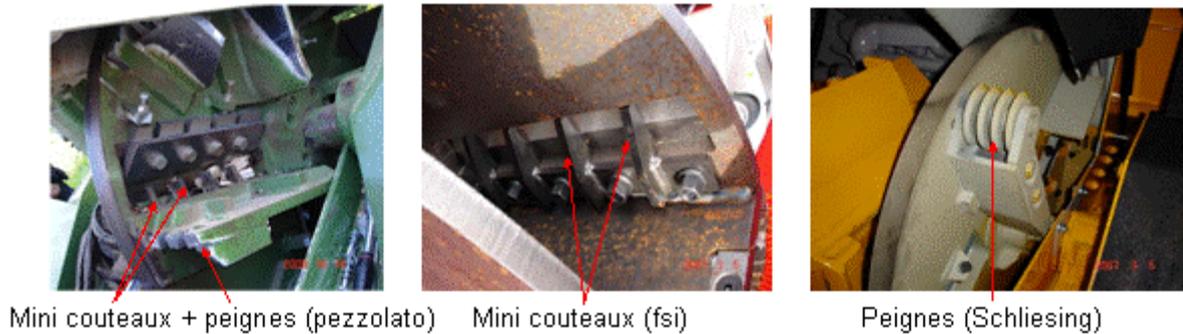


Figure IV-10. Systèmes de calibrage des plaquettes dans les déchetageuses à disque

Sur le marché, on peut trouver plusieurs conceptions de couteaux qui sont utilisés avec ce système de déchetage (Figure IV-11). L'évaluation de l'efficacité de ces différents types est mitigée car il n'y a pas assez d'études comparatives et chaque fabricant désigne son outil comme le meilleur en se basant sur des arguments portant sur la qualité des plaquettes produites, la consommation d'énergie et la durée de vie des couteaux.

Les quatre conceptions existantes sont :

- couteau droit monobloc,
- couteau droit en plusieurs parties,
- couteau composé de plusieurs couteaux circulaires,
- couteau en forme d'angle (le bois est toujours dirigé vers le milieu).

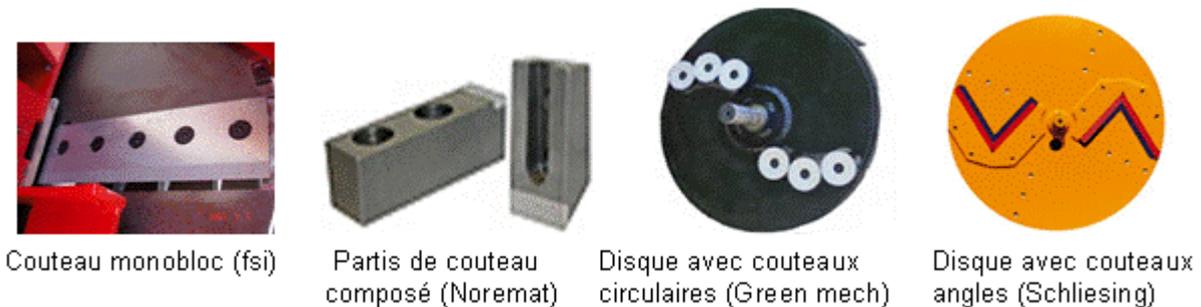


Figure IV-11. Types de couteaux utilisés sur le système de déchetage à disque

Il existe deux modes pour lesquels les couteaux sont fixés sur le disque : un où les couteaux traversent le disque (Figure IV-10, Pezzolato), et le deuxième où les couteaux sont fixés sur la face du disque (Figure IV-11, fsi)

IV.2.3.4 Évaluation des trois systèmes de déchetage :

La comparaison des trois systèmes réalisée par Tolfts [Tolfts 2006a] et présentée dans le Tableau IV-3, est basée sur l'étude expérimentale réalisée par Forestry Commission.

Type de déchiqueteuse	Système à disque	Système à tambour	Système à vis sans fin conique
Système de déchiquetage	couteaux montés sur un disque rotatif, qui est normal à la direction d'aménagement.	couteaux fixés parallèlement à l'axe de rotation d'un tambour dont l'axe de rotation est perpendiculaire à la direction d'aménagement.	coupe effectuée par le filetage d'une vis conique, qui amène également le bois.
Mode de coupe	coupe toujours perpendiculaire afin d'obtenir des plaquettes de taille constante.	variations possibles sur la taille des plaquettes si la coupe des rondins par le tambour est tangentielle ou radiale.	taille des plaquettes produites relativement constante et déterminée par le pas de la vis.
Taille des grumes admissibles	50 cm de diamètre.	80 cm en hauteur et 120 cm en largeur.	couramment de 21 à 35 cm de diamètre.
Système de calibrage	pas de système de calibrage, mais des éclateurs peuvent être ajoutés pour diminuer la proportion des plaquettes surdimensionnées.	grille de calibration qui réduit efficacement les queues de déchiquetage mais risque d'augmenter la proportion des fines particules.	pas de système de calibrage, mais des éclateurs peuvent être ajoutés pour diminuer la proportion des plaquettes surdimensionnées.
Qualité granulométrique des plaquettes	très bonne si la déchiqueteuse est bien réglée et le bois coupé est seulement des longues grumes.	petit pourcentage de queues de déchiquetage mais proportion des fines particules souvent élevé.	bonne avec un petit pourcentage de fines particules, la taille des plaquettes est constante lors du déchiquetage des longues grumes.
Productivité	très bonne productivité pour un faible coût pour le déchiquetage de longues grumes.	inférieure à celle d'une déchiqueteuse à disque d'une puissance similaire.	productivité élevée pour le déchiquetage de longues grumes pour une puissance nécessaire inférieure à celle des deux autres types.

Tableau IV-3. Caractéristiques des trois différents types de déchiqueteuses forestières

IV.3 Banc d'essais

Après une analyse approfondie des études expérimentales sur le déchetage des rémanents forestiers, j'ai développé un banc d'essai de taille réelle que j'ai implanté sur le site du LERMAB à Epinal. Partant d'un matériel expérimental de défibrage vétuste, de profondes modifications mécaniques et électriques ont été nécessaires : retournement du volant pour un accès en face avant, avec nécessité de la fabrication de l'arbre moteur ; remise aux normes électriques et remplacement du moteur par un autre plus puissant ; mise en place d'un nouveau système d'amenage ; réalisation du système d'évacuation et fabrication de plusieurs jeux de portes couteaux. J'ai participé activement à la réalisation de ce prototype. Ce banc d'essais permet de faire varier plusieurs paramètres afin d'étudier leurs effets sur la granulométrie des plaquettes forestières et la puissance de coupe lors de l'opération de déchetage.

Le banc d'essai est composé de deux unités indépendantes (Figure IV-12 et Figure IV-13) :

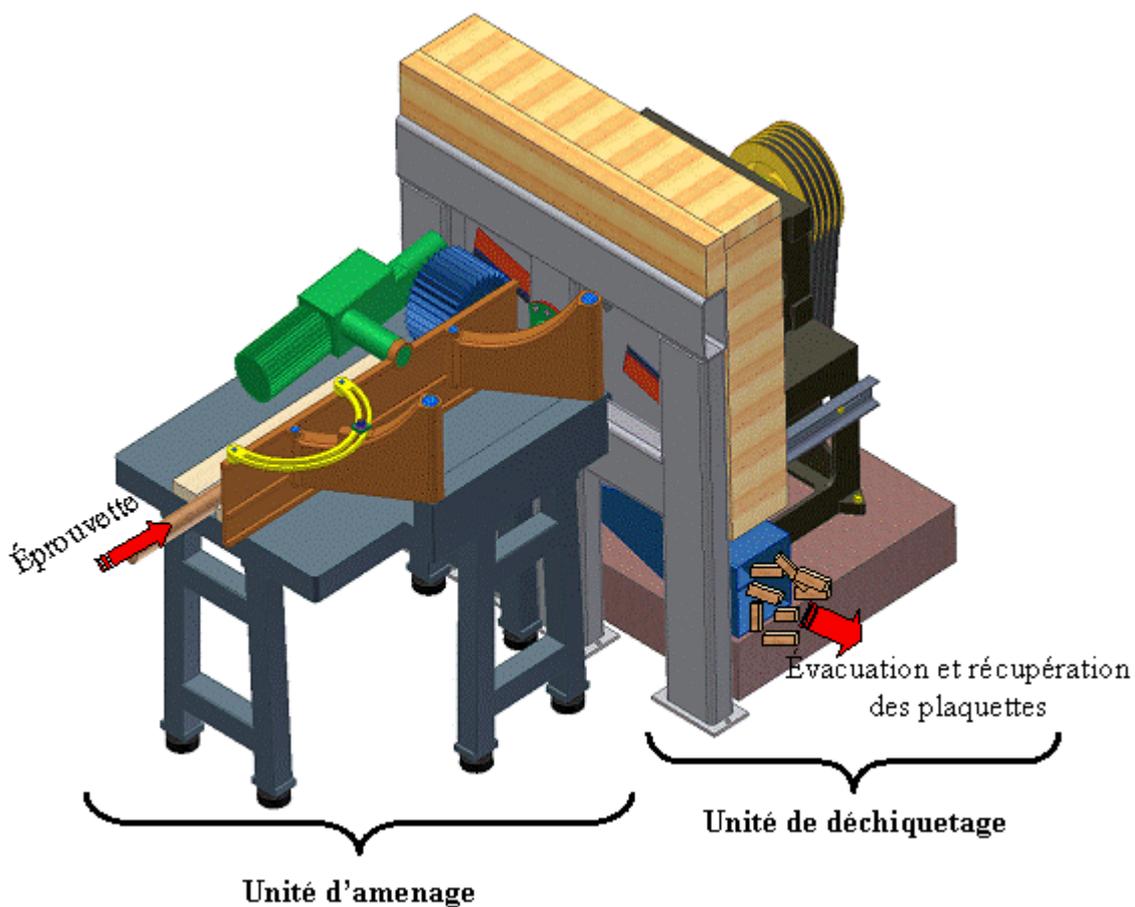


Figure IV-12. Banc d'essais - vue droite

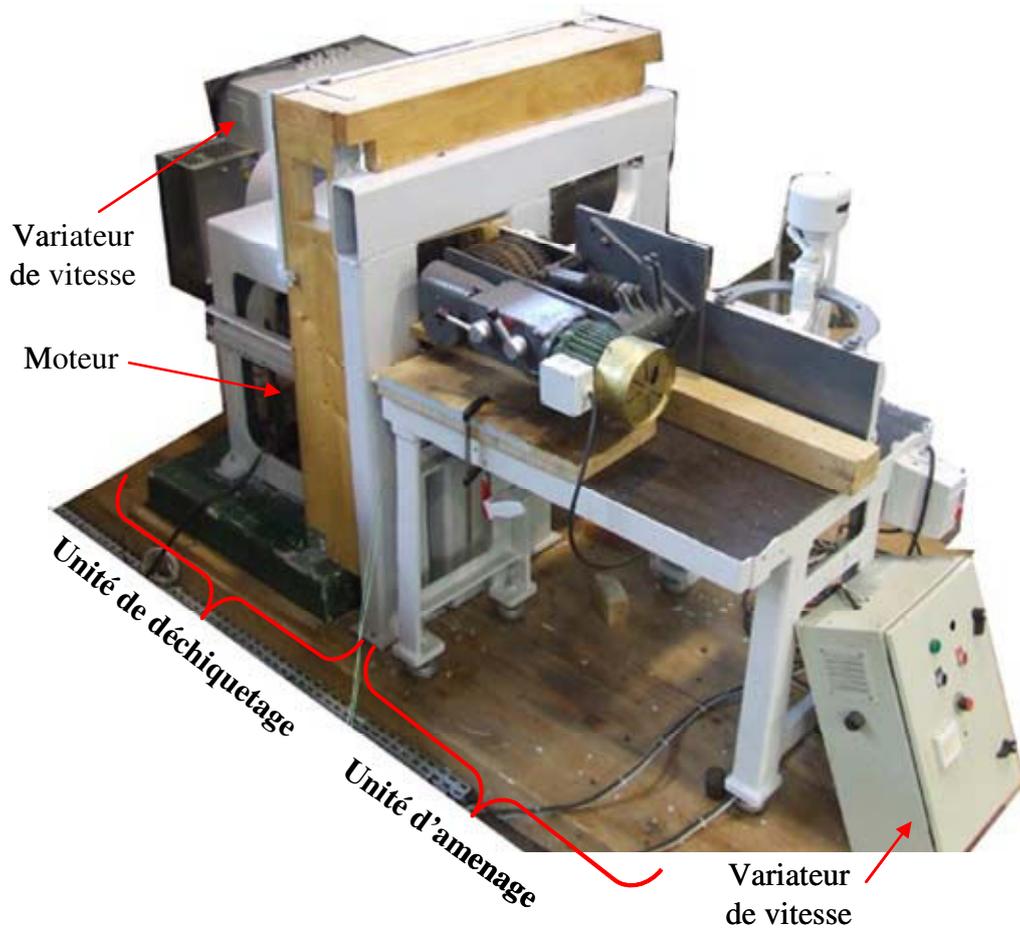


Figure IV-13. Banc d'essais - vue gauche

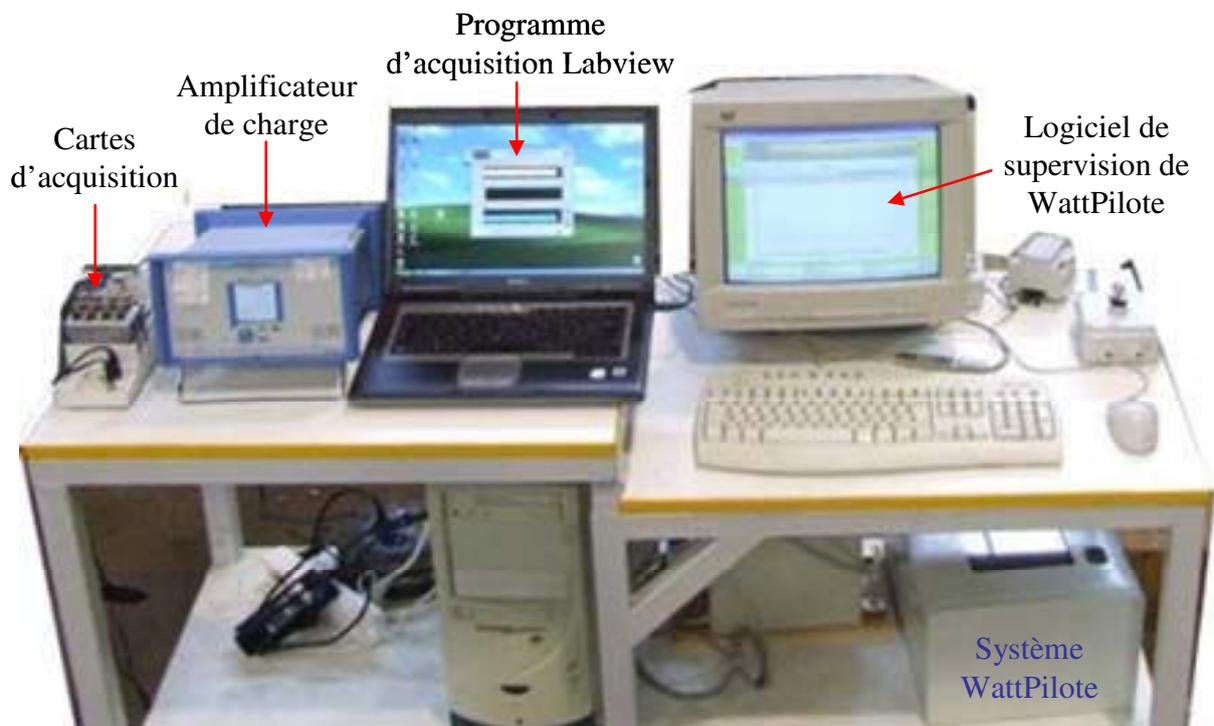


Figure IV-14. Matériels d'acquisition utilisés sur le banc

L'unité d'amenage a pour rôle de faire progresser les éprouvettes vers l'unité de déchiquetage et de maintenir constante la direction d'amenage du bois lors de la coupe. L'unité de déchiquetage est conçue pour assurer la coupe des éprouvettes et évacuer les plaquettes produites.

Les deux paragraphes suivants détaillent chaque unité et ses fonctionnalités :

IV.3.1 Unité de déchiquetage

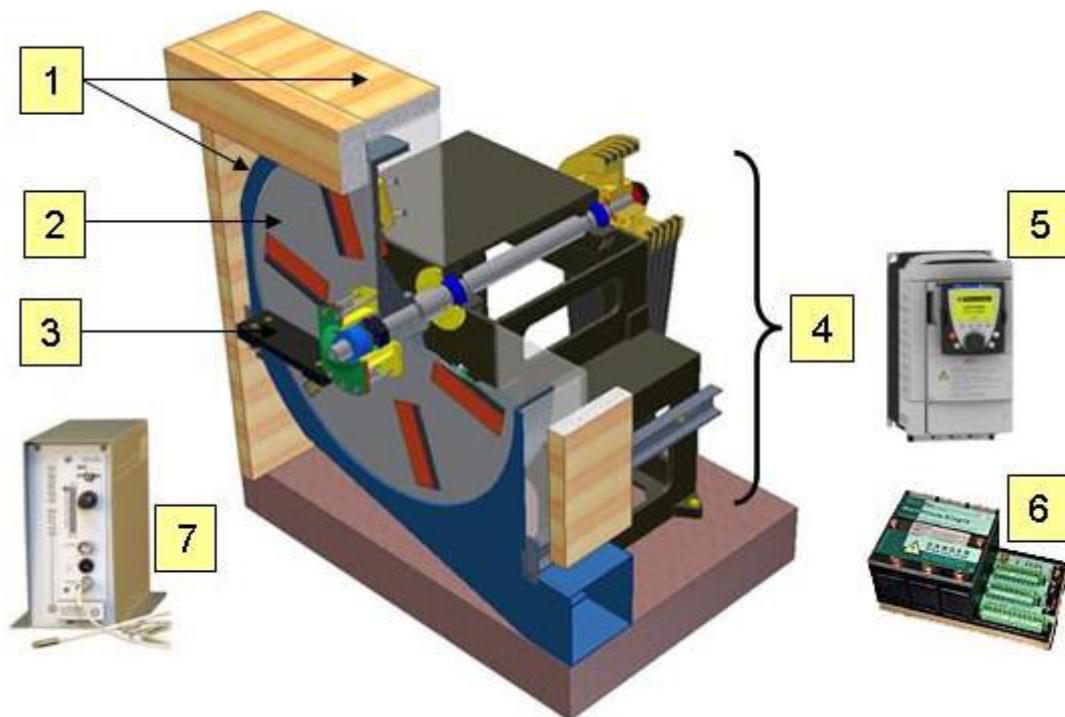


Figure IV-15. Unité de déchiquetage

Les composants de cette unité sont :

- 1 - Capot de récupération des plaquettes et protection en bois massif,
- 2- Disque de coupe, couteaux et lancettes,
- 3 - Contre couteau et 2 extensomètres,
- 4 - Système moteur (asynchrone 21 KW),
- 5 - Variateur de vitesse (Altivar 71),
- 6 - Système WattPilote,

7- Capteur capacitif (Lion Precision : Unité CPL 190 & électrode C1-A).

Le diamètre du disque est 950 mm pour un poids de 182 kg. Le disque est équipé de quatre porte-couteaux et de deux blocs de lancettes. Grâce au variateur de vitesse, il est possible de faire varier la vitesse de rotation du disque de 1 à 1000 tr/min, c'est-à-dire varier la vitesse de coupe de 0.03 jusqu'à 32.4 m/s (calculée au milieu du couteau). Par ailleurs, plusieurs angles de coupe sont possibles (45° , 50° , 52.5° et 55°) en utilisant les portes couteaux qui ont été usinés (Figure IV-16).

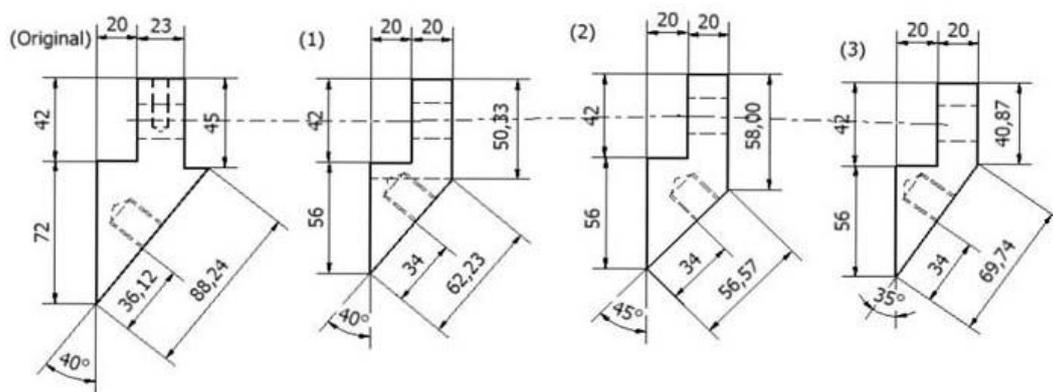


Figure IV-16. Trois portes couteaux accessibles

L'angle de taillant est plus facile à régler par l'affûtage du couteau. Concernant la saillie du couteau, elle est réglable en manipulant les fixations (5) et le réglage (4) (Figure IV-17).

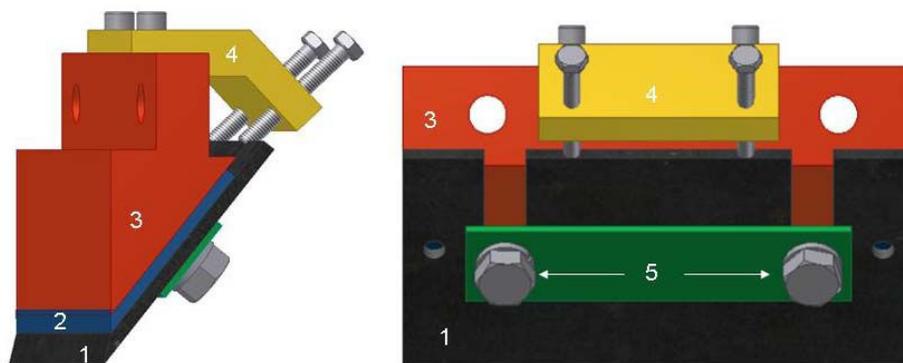


Figure IV-17. Porte - couteau

1- Couteau, 2- cale, 3- porte-couteau, 4- réglage, 5- plaque de fixation et vis.

IV.3.1.1 Problématique du contre couteau :

La position du couteau au moment de l'attaque du bois est variable en fonction du diamètre de l'éprouvette et la hauteur du contre couteau (Figure IV-18). En principe, la direction de l'effort de coupe total (F) suit la position du couteau. En conséquence, on peut déduire que la direction de l'effort de coupe au moment de l'attaque et de celui de la sortie du couteau, est variable en fonction de la hauteur du contre couteau.

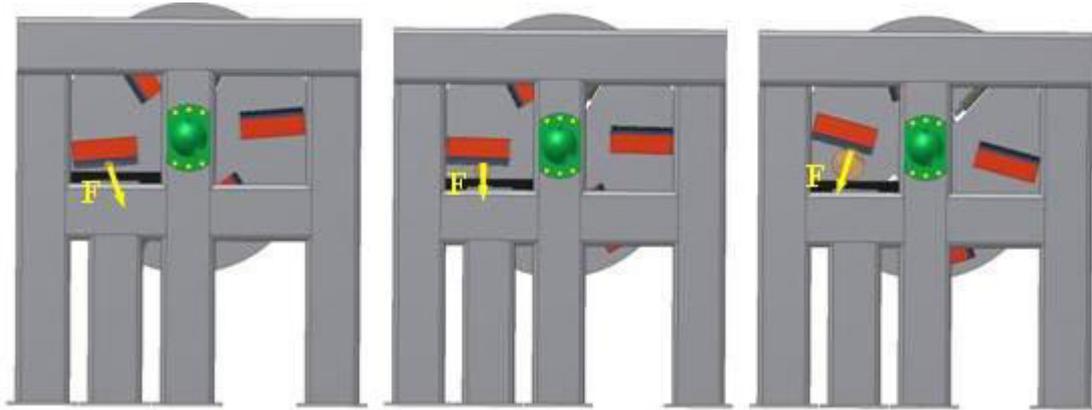


Figure IV-18. Directions d'effort de coupe au moment de l'attaque pour 3 diamètres de billon différents

Il existe plusieurs positions du contre couteau par rapport à l'arbre du disque (Figure IV-19). Dans la plupart des décheteteuses forestières, la position du contre couteau est sous le niveau de l'arbre (Figure IV-19-C), pour supporter convenablement les rondins et les maintenir durant le processus de coupe.

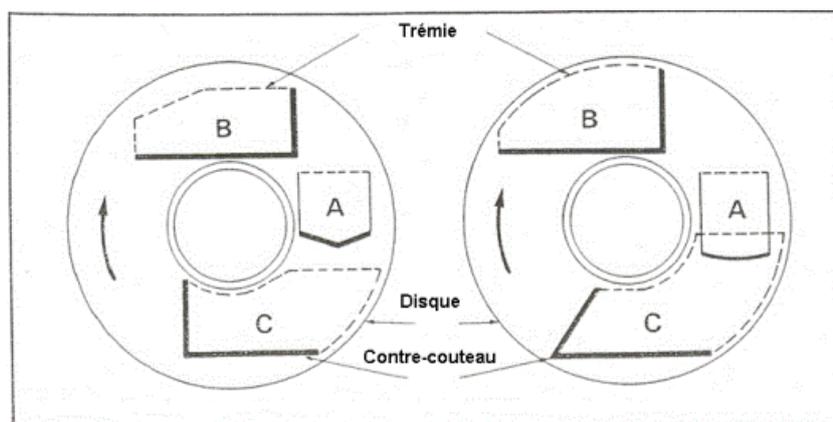


Figure IV-19. Quelques Positions et formes du contre-couteau [McLauchlan 1979]

La position et la forme du contre couteau dépendent de plusieurs facteurs, comme la taille de trémie d'amenage, la longueur et la forme du bois à décheteter, le type de l'amenage et la

conception du système de coupe. Selon Hartler [Hartler 1965] la position et la forme du contre couteau ont un effet très important sur les efforts de coupe et la formation des plaquettes. C'est pourquoi la conception du contre – couteau permet de modifier sa position en hauteur par rapport au bâti en plaçant des cales entre le contre – couteau et son support.

IV.3.2 Unité d'amenage

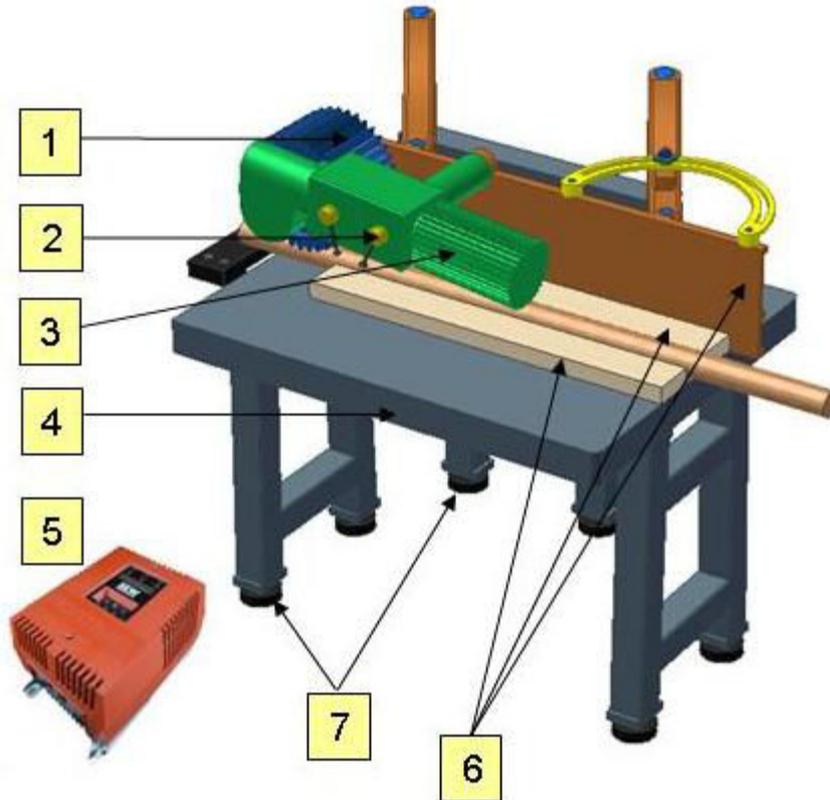


Figure IV-20. Unité d'amenage

Les composants de cette unité sont :

- 1- Rouleau ameneur,
- 2- Boîte de vitesse,
- 3- Moteur électrique (4 kW),
- 4- Table d'amenage,
- 5- Variateur de vitesse (Movitrac – SEW Eurodrive)
- 6- Pattes réglables,

7- Guides : ils conservent la direction d'amenage durant la coupe.

La conception du système d'amenage a plusieurs avantages :

- Le réglage de la vitesse d'amenage de 2 à 25 m/min est effectué grâce à six vitesses mécaniques disponibles par la boîte de vitesse (2) – (Figure IV-20), et au variateur de vitesse qui intervient directement sur le moteur électrique.
- Le contrôle de chaque unité est réalisé indépendamment l'un de l'autre, ce qui permet de mesurer de la consommation de puissance de coupe ou d'amenage sans perturbations, grâce à l'utilisation de deux moteurs distincts.
- La possibilité de changer la direction d'amenage dans les plans horizontal et/ ou vertical (Figure IV-21).

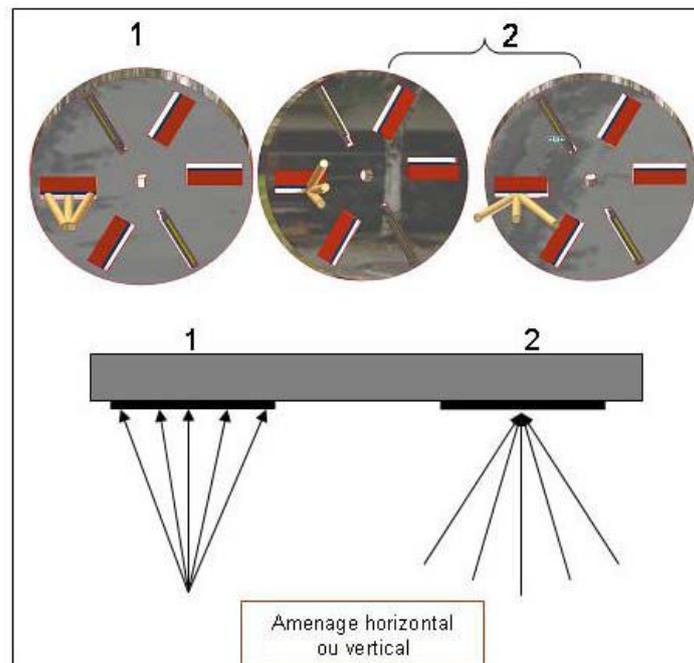


Figure IV-21. Directions d'amenage possibles

- Le maintien de la direction d'amenage durant le processus de déchetage grâce aux guides (6),
- et enfin le réglage de la hauteur de la table d'amenage grâce aux pattes réglables (5).

IV.3.3 Système de mesure de la vitesse du disque

Afin de pouvoir mesurer la variation instantanée de la vitesse de rotation du disque, l'unité de déchetage a été équipée d'un capteur de déplacement capacitif qui nous permet de mesurer la vitesse de déplacement des dents d'une courroie crantée colée à la périphérie du disque (Figure IV-22). La courroie est divisée en deux parties, chacune contient 125 dents en sachant que la première dent de chaque partie est alignée avec l'arête d'un couteau.

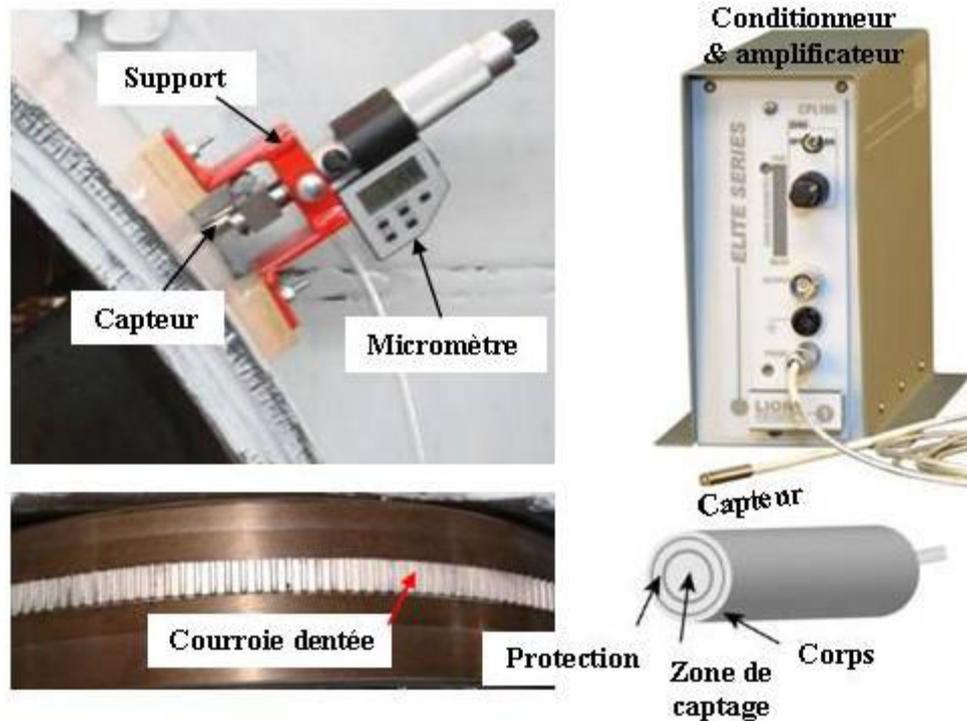


Figure IV-22. Dispositif de mesure du Capteur capacitif avec ses composants

Le principe de mesure utilisé est le suivant : le capteur capacitif donne en continu les valeurs de la distance entre l'électrode du capteur et les dents qui passent en face de lui. Après l'acquisition des données, on les traite par un programme qui détecte les fronts montants correspondant aux intervalles entre les dents. Le programme divise ensuite le temps mesuré entre deux passages de dents par la distance réelle entre celles-ci, ce qui nous permet d'obtenir une représentation graphique continue de la vitesse du disque.

Les mesures de la vitesse à vide ont donné de bons résultats (Figure IV-23). Hélas, les mesures prises durant le déchetage n'étaient pas exploitables à cause de la perturbation de mesure engendrée par le passage des poussières et des plaquettes entre l'électrode du capteur et la courroie. Des améliorations sur le système sont nécessaires pour y remédier. L'ajout de

*Chapitre V. Mieux maîtriser la granulométrie
des plaquettes forestières*

V.1 La formation des plaquettes

Le mécanisme de formation des plaquettes est fortement influencé par le mode de coupe du bois. Plusieurs recherches ont été réalisées pour comprendre les différents aspects concernant cette opération. En usinage traditionnel du bois, l'épaisseur des copeaux ne dépasse pas 1 mm contrairement au déchiquetage, où elle peut atteindre 20 mm. Cette différence très importante nous amène à analyser le mécanisme de formation des plaquettes dans les deux cas afin de distinguer les points communs et les différences de formation du copeau et pour effectuer un transfert de connaissances du domaine de l'usinage linéaire du bois vers celui du déchiquetage.

V.1.1 La formation du copeau lors l'usinage linéaire selon le mode de coupe B (90-0)

Les travaux de Franz [Franz 1958] sur la coupe instantanée linéaire ont distingué trois types de copeaux :

V.1.1.1 Type I – Copeau obtenu par fendage :

Le bois ayant une forte résistance à la flexion et une faible résistance à la traction perpendiculaire aux fibres favorise la formation de ce type de copeau. Un grand angle d'attaque, un faible coefficient de frottement et une forte profondeur de passe sont des conditions de coupe qui favorisent ce type de copeau (Figure V-1).

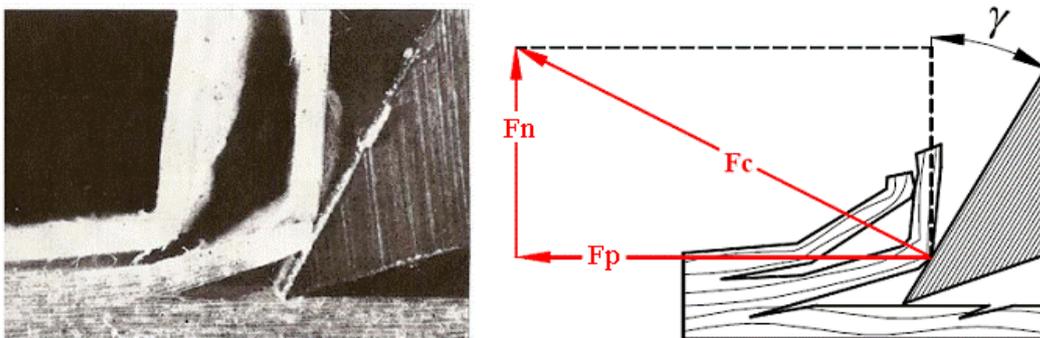


Figure V-1. Le copeau de type I [Franz 1958]

Ces conditions induisent un effort normal élevé qui engendre un angle important entre l'effort de coupe total et la direction de coupe et par conséquent la rupture par fendage (F_n est

supérieur à la cohésion de la matière). Les efforts de coupe associés à ce type de copeau évoluent de façon cyclique (Figure V-2) : au début de la coupe l'effort croît lorsque le bois est comprimé sur la face d'attaque puis une croissance rapide de l'effort parallèle F_p et une décroissance de l'effort normal F_n entraîne une autre forte compression parallèle aux fibres dans toute la section en avant de l'outil. Les efforts atteignent un maximum jusqu'à ce que le bois cède au fendage suivant le fil. Le copeau est ensuite déformé comme une poutre encastrée jusqu'au point de rupture et il glisse sur la face d'attaque. À ce moment, les efforts sont minimales jusqu'à la reprise d'un nouveau cycle.

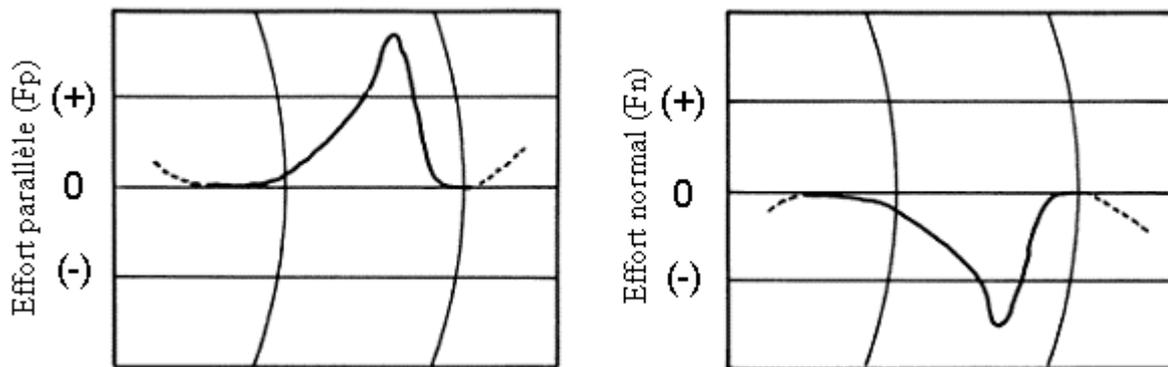


Figure V-2. Cycle de l'évolution des efforts pour le copeau de type I [Franz, 1958]

V.1.1.2 Type II - Copeau obtenu par compression faible :

Une humidité moyenne, une essence propice à la rupture en cisaillement diagonal ainsi qu'un ajustement de la géométrie de l'outil avec le coefficient de frottement sont des conditions de coupe qui favorisent le copeau de type II.

Le mouvement de l'outil de coupe comprime le bois en avant de la face d'attaque, puis crée des contraintes de cisaillement qui se traduisent par une rupture quand ils atteignent leurs valeurs critiques.

La rupture de bois se fait le long d'un plan allant de l'arête de coupe à la surface de travail.

La forme du copeau est d'une spirale dont le rayon de courbure s'accroît avec la profondeur de passe (Figure V-3).

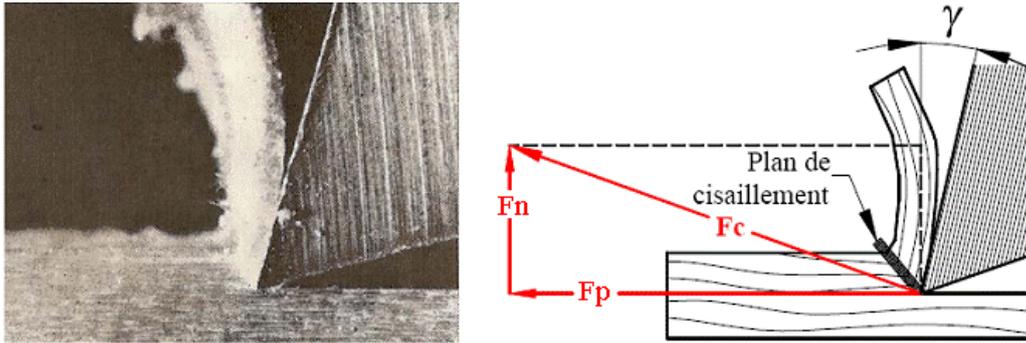


Figure V-3. Le copeau de type II [Franz 1958]

Les deux composantes de l'effort de coupe (F_p et F_n) sont positives et à peu près constantes (Figure V-4). L'effort de coupe est voisin de la direction des fibres, ce qui signifie que la composante normale doit être très faible.

A cause d'un coefficient de frottement important, la puissance nécessaire pour le même débit de copeau est supérieure à celle demandée pour la formation de copeau de type I.

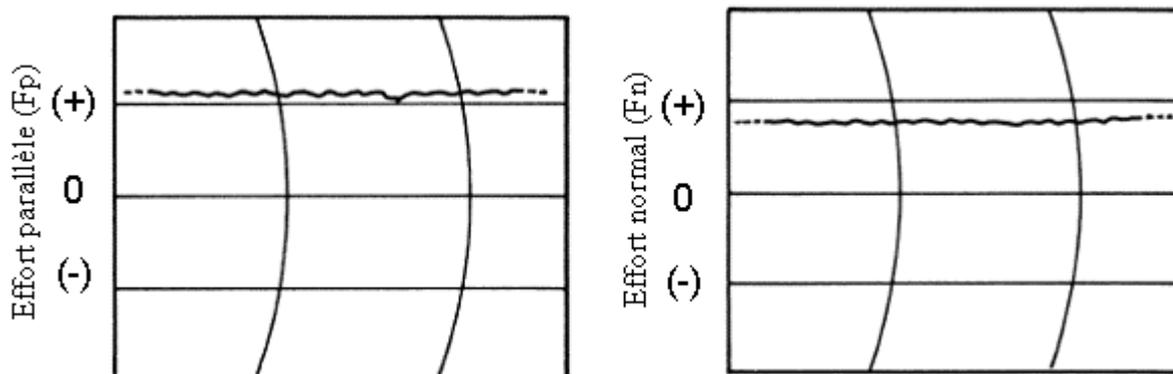


Figure V-4. Diagramme de l'évolution des efforts pour le copeau de type II [Franz 1958]

V.1.1.3 Type III – Copeau obtenu par flambage :

Un angle d'attaque faible ou négatif, une essence de bois ayant un coefficient de frottement élevé, une arête de coupe arrondie et une humidité élevée ou un bois très sec sont des conditions de coupe qui favorisent le copeau de type III (Figure V-5).

La formation de copeau de ce type est de nature cyclique comme pour le type I mais d'une manière totalement différente. Au début du cycle, le mouvement rotatif entre le copeau et la pièce conduit à une compression parallèle aux fibres et ensuite au compactage localisé du matériau contre la face d'attaque.

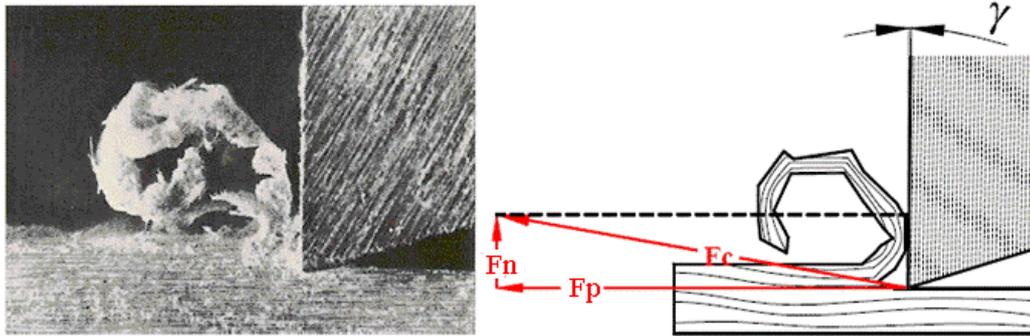


Figure V-5. Le copeau de type III [Franz 1958]

A la différence d'autres mécanismes, le bois ne s'évacue pas librement, mais il reste fixé sur l'outil créant ainsi une "arête rapportée". Au moment où l'extension du bois compacté devant la face d'attaque devient critique, le bois ne se comprime plus mais flambe, entraînant la rupture du copeau.

Concernant l'allure des efforts de coupe, au débit de chaque cycle les efforts augmentent lors de la pénétration de l'outil, ensuite les efforts restent quasiment constants durant la période de compactage jusqu'au flambage, puis les valeurs des efforts tombent et s'annulent (Figure V-6). Le cycle recommence lorsque l'outil atteint la dernière zone de rupture.

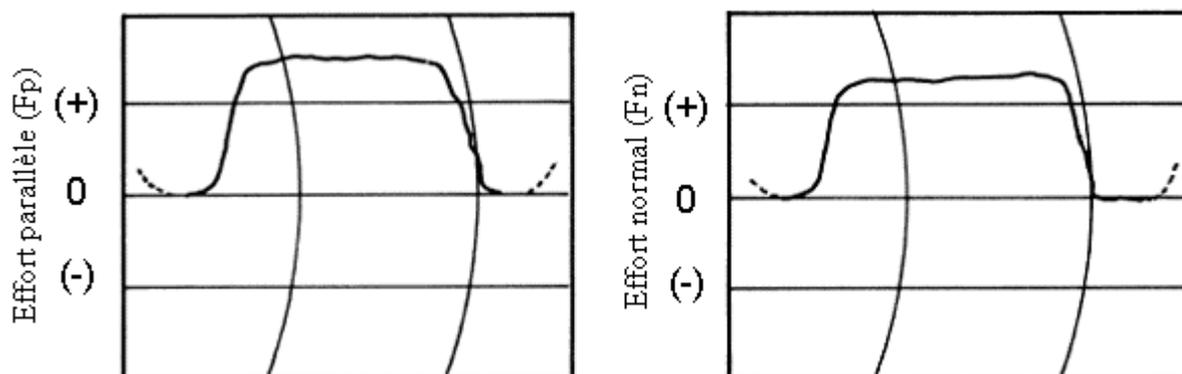


Figure V-6. Cycle de l'évolution des efforts pour le copeau de type II [Franz 1958]

L'amplitude et la direction de l'effort normal F_n indiquent la présence d'une composante de friction importante. Il apparaît aussi que le travail nécessaire à la formation de ce type de copeau sera important.

L'épaisseur de couteau et l'angle d'attaque ont une grande influence sur la forme de copeau comme constate précédemment. Le Tableau V-1 récapitule leurs effets.

		Angle d'attaque γ	
		Faible	Élevé
Épaisseur du copeau	Faible	Flambage	Fendage (peu d'éclats)
	Moyenne ou Élevé	Compression	Fendage (éclats nombreux et importants)

Tableau V-1. Influence de l'épaisseur de copeau et de l'angle de coupe sur la forme du copeau [Juan 1992]

V.1.2 La formation de copeau lors l'usinage linéaire selon le mode de coupe C (0 – 90)

En théorie, le copeau est formé sans que les fibres soient coupées. L'effort axial F_P comprime les fibres qui se désolidarisent les unes des autres, au niveau du plan de coupe, Figure V-7.

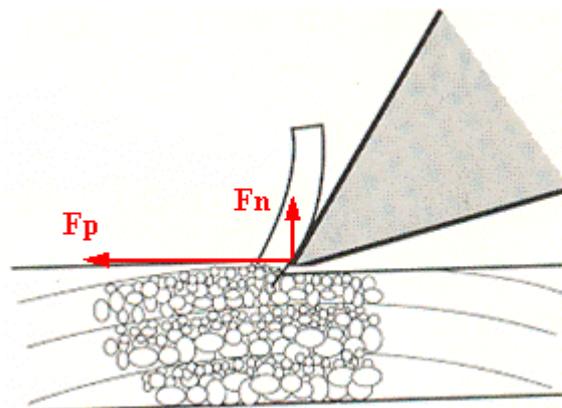


Figure V-7. La formation de copeau en mode coupe C

Un angle de coupe élevé (30° et plus) permet d'obtenir des copeaux long et parfois continu, avec des efforts de coupe réduits. Alors qu'avec un angle de coupe réduit (5 à 10°) les copeaux se fragmentent de part une force axiale F_P importante combinée avec une force normale F_n pouvant être négative [Marchal 1989; Déces Petit 1996]. Selon Leney [Leney 1960], trois zones critiques de contraintes apparaissent dans ce mode de coupe. Dans la zone 1 (Figure V-8) la traction est due à la flexion des fibres à coté de l'arête de coupe, la rupture se produit quand la flexion dépasse la valeur critique. Dans la zone 2 tout au long la face de coupe, la force de friction crée un plan de cisaillement horizontal dans les cellules compressées entre l'arête de coupe – l'interface de la plaquette et le bois résistant qui se trouve au dessus. Dans la zone 3 l'arête de coupe comprime les cellules de bois, une rupture peut se produire à cause de la contrainte de flexion au dessus ou au dessous le plan de coupe.

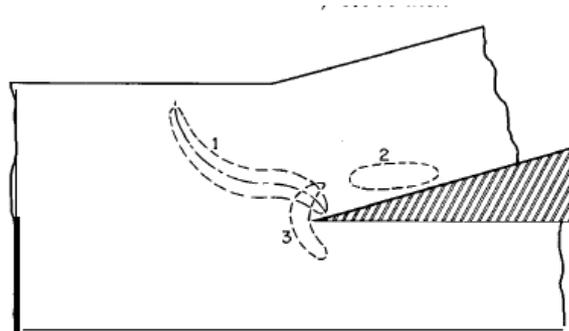


Figure V-8. Les zones de contraintes critiques durant le processus de tranchage

V.1.3 La formation du copeau en déchiquetage (mode A (90-90))

Nous allons présenter la bibliographie de ce mode de coupe pour faible profondeur de passe (> 1 mm), puis pour des profondeurs de passe plus importantes se rapportant plus du déchiquetage.

V.1.3.1 Formation de copeau pour de faibles profondeurs de passe :

L'épaisseur des copeaux produits dépend du nombre de fissures, de leur propagation, et bien évidemment des seuils de fissuration liés au mode de coupe et aux caractéristiques du bois. Selon Juan [Juan 1992], la coupe est effectuée par cisaillement lorsque la fibre est empêchée de fléchir par un contre couteau. Le bois peut être considéré comme un semi-élastique. Les fibres ne sont donc pas parfaitement encastrées. Trois cas de fissuration sont distingués sur la surface obtenue par le cisaillement, ces trois cas dépendent du rapport entre les efforts de coupe et la résistance mécanique de bois :

Quand la cohésion du bois est très forte, des rares fissures apparaissent lors du passage de l'outil. Ces fentes sont de dimensions réduites, et se referment sitôt l'outil passé (Figure V-9-a). Si les efforts de coupe sont bien plus importants que la cohésion inter-fibres, les fissures qui apparaissent sont plus profondes que celles du premier cas, et ne se referment pas après le passage de l'outil (Figure V-9-b).

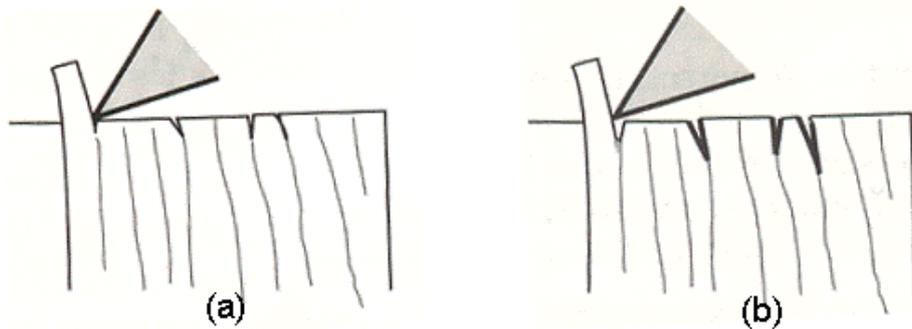


Figure V-9: Les fissures en coupe A quand la cohésion inter-fibres est relativement fort (Type I)

Quand la cohésion du bois est insuffisante, les fibres fléchissent et ne se cassent pas au niveau de l'arête de coupe, mais bien à côté, et si la flexion des fibres est très grande, un second plan de rupture peut se produire sous l'outil (Figure V-10). Le nombre de fissures et leurs profondeurs augmentent avec la diminution de l'angle de coupe et la diminution de la cohésion inter fibres (bois tendre), pendant que l'influence de l'épaisseur de copeau est assez faible.

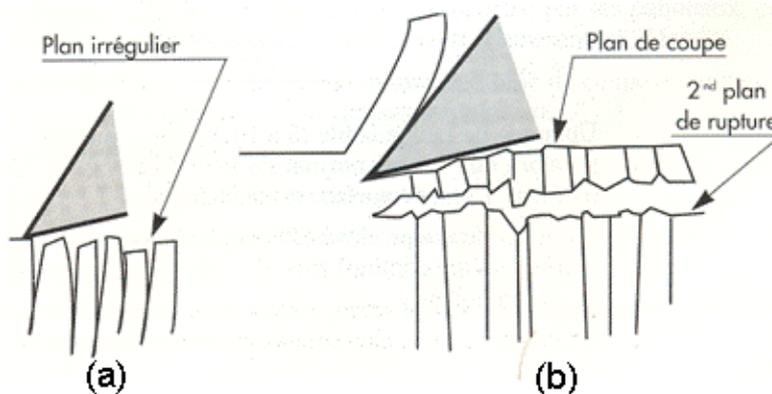


Figure V-10: Les fissures en Coupe A quand la cohésion inter-fibres est insuffisante (Type II)

Selon McKenzie [McKenzie 1961; McKenzie 1962], qui a étudié la formation du copeau en mode 90-90, l'arête tranchant fléchit les fibres avant la rupture de ces dernières. Il a identifié cinq zones dans lesquelles les fissures peuvent apparaître (Figure V-11).

La différence entre les type I et II réside dans l'apparition de rupture dans la zone 4 en type II. Après la première coupe, les efforts de coupe moyens dans le type I sont constants durant les opérations de coupe successives, tandis que ces efforts évoluent cycliquement en formant le copeau de type II.

Les efforts de coupe augmentent avec l'augmentation de la densité du bois pendant que les fissures tendent à changer de celles de type I-a à celles de type II-b.

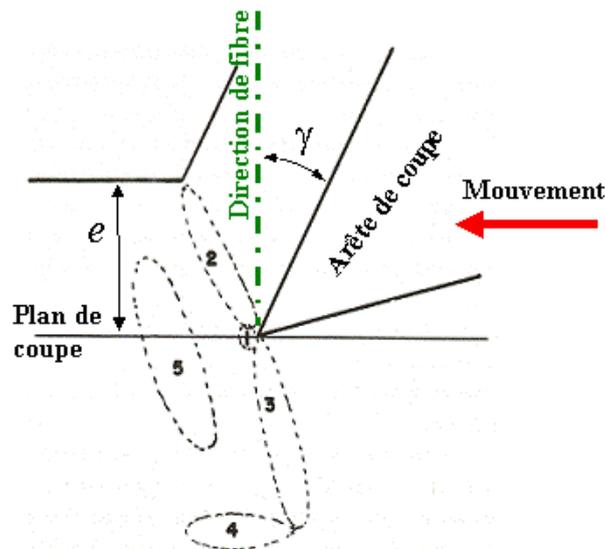


Figure V-11: Les zones de rupture potentielles en mode de coupe A [McKenzie 1961]

L'humidité a une grande influence sur la formation de copeau. Pour le bois saturé la rupture de type I-a est la dominante avec des fissures légères et les forces de coupe faibles et constantes. Pour une humidité de 5%, les fissures qui se trouvent en dessous du plan de coupe ont toujours des valeurs de profondeurs plus élevées que l'épaisseur nominale du copeau, entraînant une prédominance des ruptures de type II. Les efforts de coupe sont visiblement plus élevés que celles dans le bois saturé et la composante normale des efforts de coupe oscille.

Quand l'angle de coupe (γ) est grand (40°), la rupture des copeaux est soit de type I-b ou II-b en fonction de l'humidité du bois et de sa densité, mais dans les deux cas les copeaux produits sont de forme continue. La force de coupe (F_c) augmente et sa composante normale sur la face d'attaque (N) devient positive en diminuant l'angle de coupe. Avec des angles de coupe inférieurs à 20° , les fissures qui apparaissent sont irrégulières.

L'augmentation de l'épaisseur de copeau (e) mène à une rupture de type I-b au lieu d'une rupture de type I-a pour toute essence de bois saturé d'humidité, de moyenne et de faible densité. Pour le bois à 5% d'humidité et de densité élevée, la rupture tend à être de type II-b avec effritement de la matière.

McKenzie interprète les différentes zones de rupture par les contraintes mécaniques : les ruptures dans la zone 2, qui vont de l'arête à la surface de copeau, sont dues aux contraintes de cisaillement tout au long du fil dans les fibres fléchies et commencent à apparaître quand la force F_p atteint sa valeur maximale.

En considérant que l'arête de coupe n'a pas une acuité idéale, la rupture en zone 1, dite « zone compactée », est possible à cause de la séparation des fibres par traction selon le fil comme le montre la Figure V-12. On peut noter que cette séparation intervient dans la direction des fibres pour permettre au copeau et à la surface de coupe de se retrouver respectivement au dessus et en dessous de l'arête de coupe.

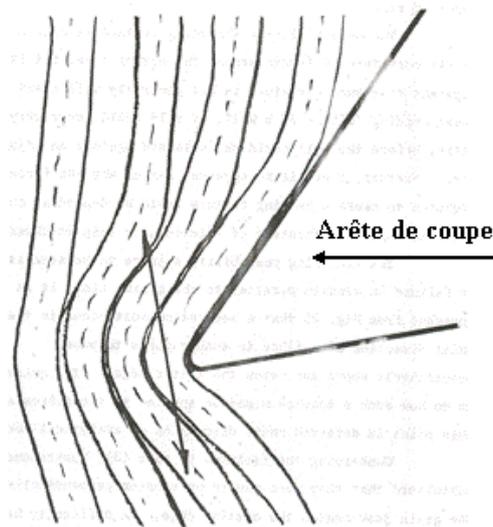


Figure V-12: La flexion des fibres devant l'arête de coupe et les ruptures en traction [McKenzie 1962]

Selon Voskresenski [Voskresenski 1955], les ruptures en zone 3 sont dues à des contraintes de traction perpendiculaire au fil et aux contraintes de cisaillement le long du fil identiques à celles qui génèrent les ruptures en zone 2. La contrainte de cisaillement à la proximité de l'arête est généralement beaucoup plus élevée que la tension de rupture dans le bois, sauf dans le cas où il y a une rupture de type II. La flexion de fibres dans cette zone dépasse le degré habituel où il y a une seule rupture. Dans la plupart des cas, la courbure se propage sur une certaine distance à l'avant de l'arête de coupe. On peut dire que les contraintes de cisaillement produisent uniquement les ruptures en zone 3 et 5 (Figure V-11).

La rupture de type II - (a) est une rupture par cisaillement apparaissant un peu avant l'arête de coupe. Une telle rupture crée une délamination sur une faible distance en dessous la surface

générée. Pour le type II -(b), la rupture se produit par une flexion moins forte que pour le type II – (a) et il n’y a pas de rupture par cisaillement entraînant des copeaux continus et pas de délamination en dessous du plan de coupe mais plutôt un détachement des parties de bois en dessous le plan de coupe.

Les ruptures en zone (4) sont dues à la flexion en avant de l’arête de coupe et s’étendent sur une distance infinie sous le plan de coupe.

Les contraintes de tension sont concentrées autour de l’arête et sont transférées vers une large zone située en dessous du plan de coupe. Les contraintes dues à la force axiale sont combinées aux contraintes de flexion dans la zone 3. Cet effet se traduit par l’apparition de deux pics sur la courbe qui représente la relation entre les contraintes de tension dans les fibres et la distance sous l’arête il y a deux pics, un proche de la distance zéro (zone 1) et l’autre à une distance égale à la courbure maximale des fibres en dessous de l’arête (zone 3), Figure V-13.

Dans la rupture de type II - (b), le pic en zone 3 est plus élevé que celui proche de l’arête, c’est pourquoi la rupture en zone 3 apparaît en premier.

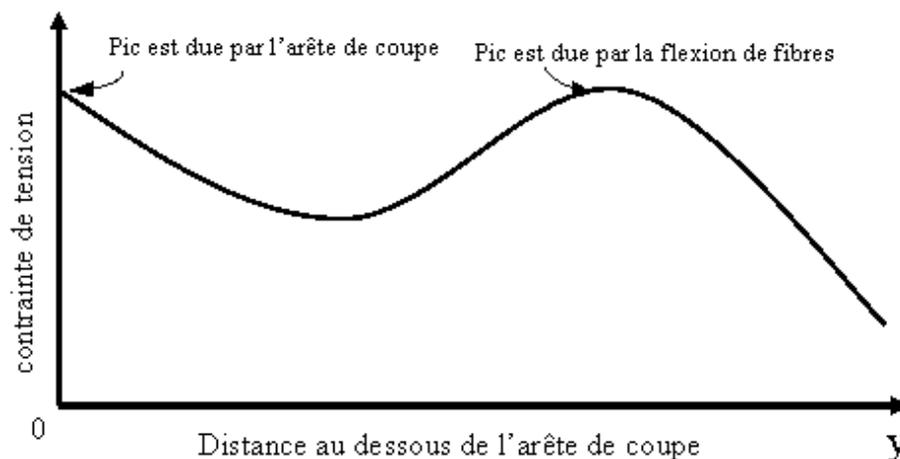


Figure V-13: L'hypothèse de la distribution des contraintes de tension sous l'arête de coupe [McKenzie 1961]

V.1.3.2 Le processus de formation des plaquettes pour une grande profondeur de passe :

Le mécanisme de la formation des plaquettes en déchiquetage est assez complexe, les plaquettes se forment à la fois sous l’effet de la contrainte de cisaillement mais également par

la propagation des fissures. Plusieurs chercheurs ont proposés des mécanismes de formation de copeau différents en voici les principaux.

Selon McLauchlan [McLauchlan 1979], une zone de contraintes en compression se développe à côté de la surface de coupe du couteau durant le processus de formation des plaquettes (Figure V-14). Des composantes de ces contraintes réagissent contre la résistance du bois au fendage¹ ou au cisaillement parallèle au fil du bois. Quand la résistance au fendage ou au cisaillement est vaincue, la rupture se produit et donc la formation d'une plaquette est réalisée. L'angle de coupe et les propriétés mécaniques du bois déterminent si la formation des plaquettes se réalise principalement par fendage ou par cisaillement.

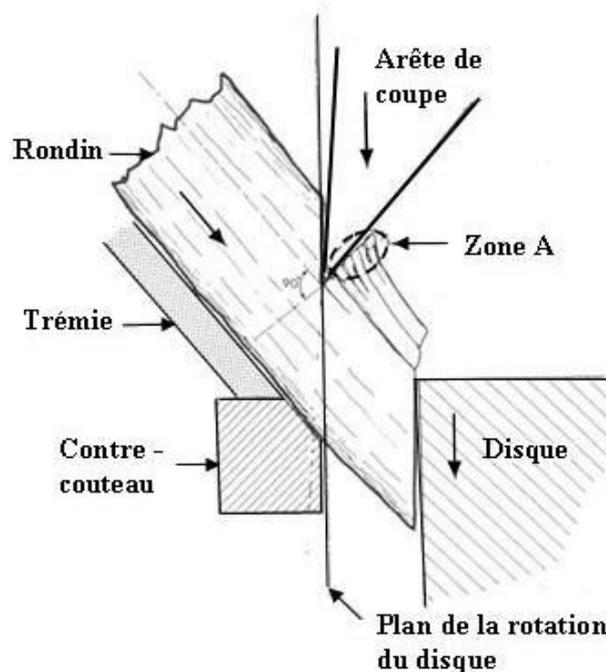


Figure V-14. La zone compressée en déchetage [McLauchlan 1979]

Hartler [Hartler 1963b] a divisé le processus de déchetage en trois mécanismes : la coupe, le cisaillement et la fracture (Figure V-15). La longueur des plaquettes est déterminée par la coupe, tandis que leur épaisseur est déterminée par le cisaillement et leur largeur est déterminée par la propagation des fissures. La contrainte de cisaillement consomme la majorité de l'énergie consommée par le processus de coupe, car la résistance du bois parallèlement aux fibres est plus importante que celle perpendiculaire, radiale ou tangentielle

¹ Division du bois par fissuration dans le sens des fibres.

aux fibres. Pour illustrer nos propos, si cette résistance au cisaillement est de 300 N/cm^2 perpendiculairement à la fibre, elle est de l'ordre de 1000 N/cm^2 parallèlement à la fibre. Selon Hartler, la propagation des fissures demande le moins d'énergie de coupe.

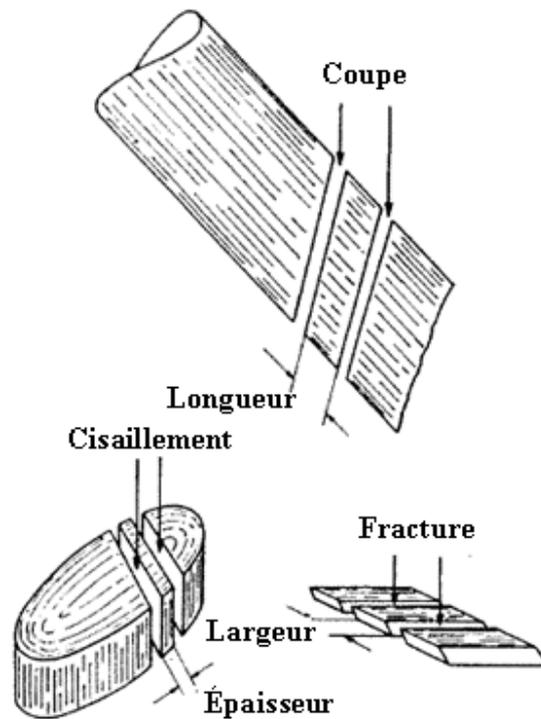


Figure V-15. La formation des plaquettes en trois mécanismes ; coupe, cisaillement et fissuration [Hartler 1963b]

Hellström [Hellström 2008a], a identifié trois types de la formation des plaquettes en fonction du niveau de frottement entre le bois et l'outil de coupe (Figure V-16). Le premier type "opening mode" se produit quand le frottement est faible, pendant que le troisième mode "remot opening mode" se produit lorsque le frottement est fort.

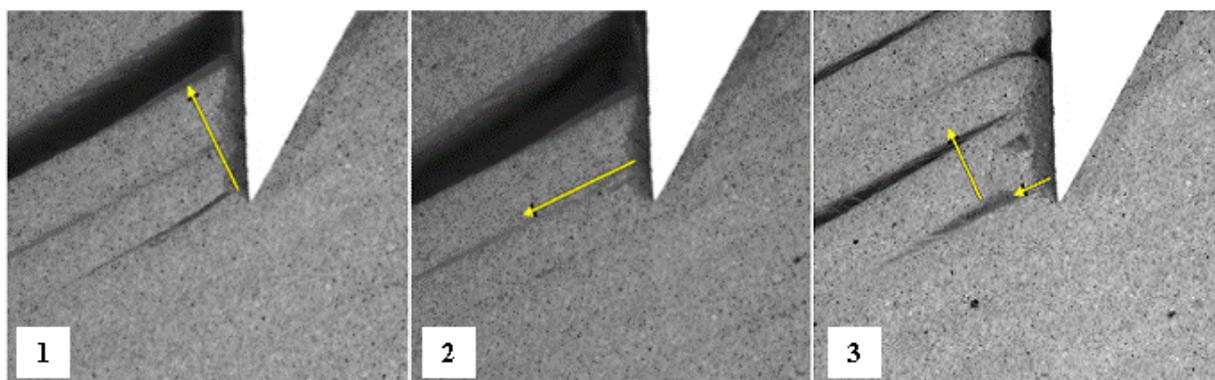


Figure V-16. Les trois modes de formation des plaquettes: 1- Opening mode, 2- Forward shear mode, 3- Remote opening mode [Hellström 2008a]

Enfin selon Uhmeier [Uhmeier 1993], la zone du bois densifiée ou mâtée, qui se forme en dessous de la face de coupe du couteau, se déplace devant le couteau lorsqu'il pénètre dans le bois. Des fissures se produisent juste devant l'arête de coupe ou quelques millimètres à l'arrière de cette dernière. Ces fissures, qui sont créées durant le "Opening mode" se propagent de deux manières différentes : tout d'abord de manière stable, où une énergie supplémentaire est fournie par le couteau en pénétrant dans le bois, ou de manière instable, où l'énergie de l'élasticité générée autour de la fissure est plus importante que celle qui est nécessaire pour fissurer le bois, entraînant la propagation de la fissure sans avancement du couteau. Uhmeier a remarqué que l'apparition des fissures de manière stable ou instable est imprévisible et sont par conséquent mélangées.

Après l'analyse de la formation des copeaux dans les différents modes de coupe en usinage linéaire (0-90 et 90-0) et en déchiquetage (90-90), on constate le rôle important de la propagation des fissures et des zones de contraintes dans la création de ces copeaux. Mais ce qui différencie cette formation dans les différents modes, c'est la direction de la propagation des fissures par rapport au fil du bois ainsi que les positions des zones des contraintes critiques qui varient d'un mode de coupe à un autre. En conséquence, dans le mode de coupe 90-90, le couteau parcourt souvent moins de distance dans le bois pour produire un copeau (plaquette) par rapport aux autres modes.

V.2 Facteurs influencent la granulométrie des plaquettes

Le domaine de la papeterie utilise le déchiquetage du bois (par disque ou par canter) afin de réaliser des plaquettes qui serviront au défilage. Le mode de coupe est très proche du mode de coupe des plaquettes forestières. J'ai effectué l'analyse bibliographique des études réalisées sur ces domaines, afin de trouver les facteurs influents et leurs effets sur la forme et les dimensions des plaquettes forestières. La seule différence entre les deux industries est l'intérêt porté par l'industrie papetière vers l'épaisseur des plaquettes par rapport aux autres dimensions, comme nous le montre Borlew [Borlew 1970] alors que les normes qui régissent la qualité des plaquettes destinées au bois-énergie s'intéressent uniquement à la longueur des plaquettes (par exemple : [ÖNORM M 7133] et [CEN/TS 14961]).

Selon Uhmeier [Uhmeier 1995] la formation des plaquettes dans le déchiquetage du bois est complexe, car l'interaction entre les différents facteurs est imprévisible. La nature du matériau bois rajoute d'autres difficultés à cette étude car le bois est à la fois anisotrope, hétérogène et

hygroscopique. J'ai choisi de ce fait de ne recenser dans un premier temps que les facteurs les plus mentionnés dans les différentes études, puis dans un deuxième temps de présenter les interactions entre certains de ces facteurs.

V.2.1 Ensemble des paramètres influents

A l'aide de la méthode "causes-effet" initiée par Ishikawa [Ishikawa 1985], la recherche de causes systématiques permet de recenser, de manière non exhaustive, différents facteurs agissant sur l'effet "forme et taille des plaquettes" produites par les déchiqueteuses forestières. Ces facteurs sont classés sur un diagramme en arête de poisson suivant cinq familles. Ces familles sont appelées les cinq M : Main d'œuvre, Milieu, Méthode, Matière et Matériel. La Figure V-17 présente le diagramme d'Ishikawa qui rassemble les différents facteurs influents possibles que nous avons recensé.

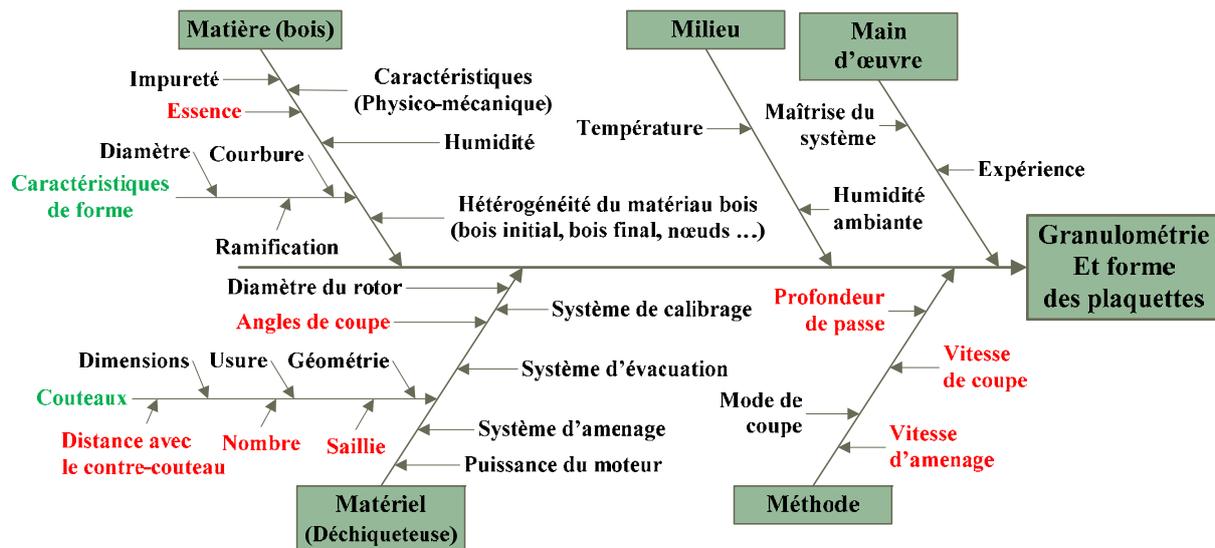


Figure V-17. Diagramme d'Ishikawa recensant les facteurs influençant la qualité des plaquettes

V.2.2 Vitesse de coupe :

Selon Engelgau, Stuart et Twaddle [Engelgau 1978; Stuart 1992; Twaddle 1992a], la vitesse de coupe a un effet important sur la qualité des plaquettes produites, et elle détermine également la productivité de la déchiqueteuse en tenant compte du nombre de couteaux et de la longueur des plaquettes. Engelgau insiste sur le fait que la qualité des plaquettes dépend

également des obstacles à franchir dans le système d'éjection, où les plaquettes sont soumises à des frottements et à des collisions.

Hartler et Twaddle [Hartler 1986; Twaddle 1992d] ont établi que l'augmentation de la vitesse de coupe, les autres facteurs restant constants, mène à l'augmentation du pourcentage de plaquettes de petite taille. Les expérimentations de Hartler ont montré que les fractions de fines et pin chips¹ augmente de 100% quand la vitesse de coupe est doublée (de 15 à 30 m/s).

Dans la déchiqueteuse par gravité, diminuer la vitesse de coupe pour ajuster la taille des plaquettes fait également baisser la productivité. Pour éviter cet inconvénient, Hartler [Hartler 1996] propose le réglage de l'angle (ϵ) et de dévier les couteaux de la position radiale, afin qu'ils forcent les rondins à se diriger vers le centre du disque où la vitesse de coupe est plus petite, et par conséquent minimiser l'effet du changement de cette vitesse.

Les travaux de Hernandez [Hernández 1997b; Hernández 1997a] sur le canter Swecan, ont notifié l'effet du changement de la vitesse de coupe sur la répartition granulométrique des plaquettes. La relation entre la vitesse de coupe et l'épaisseur des plaquettes est linéaire dans le domaine des vitesses choisies (18.9, 21.3, 24.2 et 27.1 m/s). De plus, une diminution du taux de variation de l'épaisseur des plaquettes est obtenue avec les valeurs élevées de la vitesse de rotation. Hernandez explique ses résultats par la façon de déterminer de l'épaisseur des plaquettes, obtenues au cours du fendage longitudinal du bois. Dans un premier temps, le couteau tranche le bois dans une certaine direction, ensuite la tranche du bois va glisser sur la face du contre-fer (la face d'attaque dans la déchiqueteuse) ce qui change sa direction. Ce changement de direction provoque une tension perpendiculaire au fil du bois. Cette tension est l'acteur principal de l'apparition des fentes longitudinales (Figure V-18).

¹ En papeterie la granulométrie des plaquettes est divisée en fractions suivantes : Oversized chips (retenus par un tamis possédant des trous ronds de 45 mm), overthick chips (passant de trous ronds de 45 mm et retenus par des fentes de 8 mm), accept chips, pin chips (passant des trous ronds de 7 mm et retenus par des trous ronds de 3 mm) et fines (passant des tous ronds de 3 mm).

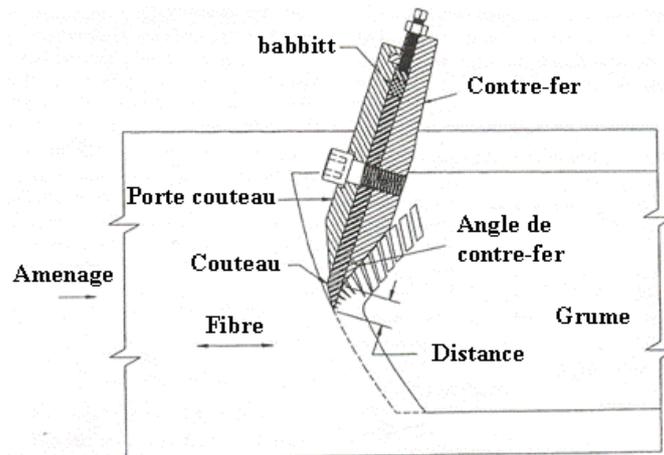


Figure V-18: le processus de déchetage par le couteau du Canter Swecan

Quand la vitesse de coupe augmente, la force de frappe du couteau et du contre fer augmente également. Par conséquent, la tension va aussi augmenter, ainsi que le nombre de fentes et, par conséquent, le pourcentage de fines particules.

En conclusion, à profondeur et largeur de coupe identiques, une vitesse de coupe plus grande produira des plaquettes plus fines.

Dans les déchetieuses dotées d'un système d'amenage, l'augmentation de la vitesse de coupe implique l'augmentation de la vitesse d'amenage, afin de conserver des plaquettes de même longueur, comme l'a montré LeBoeuf [LeBoeuf 1987].

V.2.3 Angles de coupe et direction d'amenage du bois

Dans la littérature, plusieurs désignations sont utilisées pour représenter les angles de coupe, rendant difficile la synthèse des différents articles. Je vais projeter ces différents angles sur les angles choisis indiqués dans le paragraphe III.2.5.1.4, afin de pouvoir analyser les effets de ces différents angles recensés dans la bibliographie, mais également pouvoir effectuer une comparaison avec nos résultats à la fin du chapitre.

Il est évident que le changement de la valeur d'un angle va modifier les valeurs d'autres angles, c'est pourquoi il est difficile d'analyser les effets de chaque angle séparément. Il existe une ancienne technique d'affûtage des couteaux, utilisé par Hartler [Hartler 1977], permettant de conserver un grand angle de taillant (β) sans affecter l'angle de coupe, et même d'augmenter la durée de vie du couteau. Cette technique consiste à ajouter un chanfrein supplémentaire (β') d'approximativement 20° et ne dépassant pas 1.5 mm de longueur (Figure V-19).

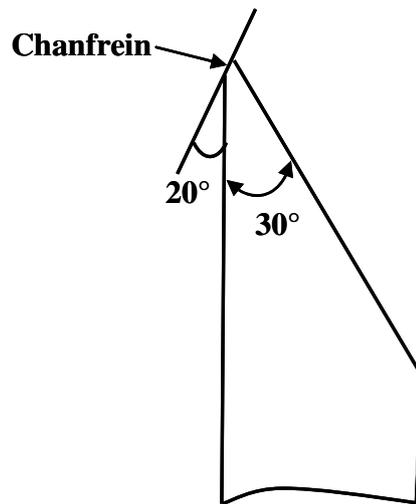


Figure V-19. Couteau avec un chanfrein supplémentaire

Monico [Monico 1979] a étudié le système de déchiquetage à disque d'une machine qui effectue un abattage des arbres puis les déchiquette. Il a analysé les angles de coupe visibles sur la Figure V-20.

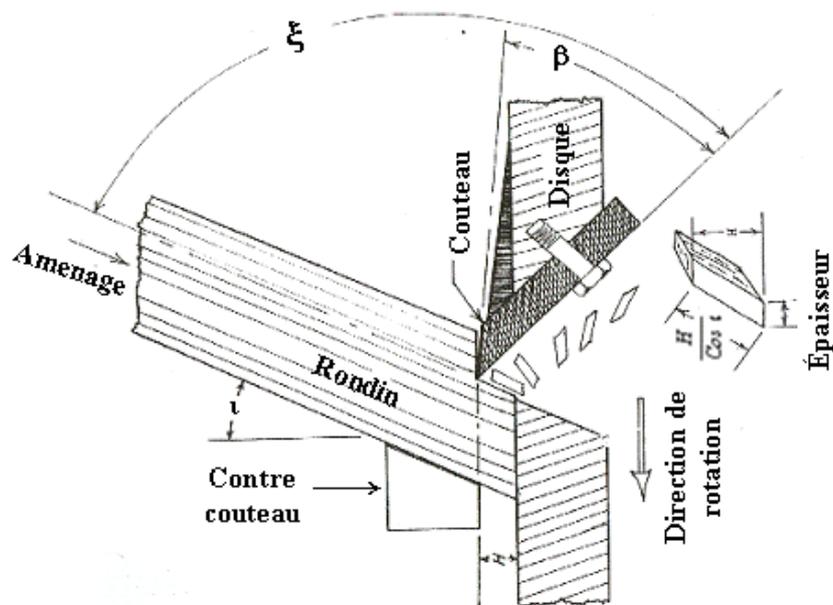


Figure V-20. Processus de déchiquetage et les facteurs influencent selon Monico [Monico 1979]

Selon son étude, les angles de coupe qui influencent la granulométrie des plaquettes sont :

- l'angle entre le fil du bois et la face d'attaque de couteau (ξ). Selon notre définition des angles de coupe III.2.5.1.4), c'est l'angle supplémentaire à l'angle de coupe réel (γ_r) dont la diminution mène à augmenter l'épaisseur des plaquettes. En effet, la force perpendiculaire au

fil du bois augmente, ce qui cause le retardement du fendage de bois. De ce fait les plaquettes produites sont plus épaisses.

- Le deuxième angle est celui du fil du bois par rapport à l'axe horizontal (ι), qui est, selon notre désignation, l'angle complémentaire à celui de l'inclinaison verticale (ε).

La longueur d'une plaquette est calculable par l'équation V-1 :

$$\text{équation V-1,} \quad L = \frac{H}{\cos \iota} \text{ Ou } L = \frac{H}{\sin \varepsilon}$$

Cette équation montre que la longueur des plaquettes croît avec l'augmentation de ι ou la diminution de ε .

Buchanan and Duchnicki [Buchanan and Duchnicki 1963] ont analysé par photographie l'opération de coupe de bois par couteau pour produire des plaquettes, avec une vitesse de coupe de 4 mm/s. Ils ont fait varier l'angle de taillant (β) et l'angle complémentaire (λ') sans changer les autres angles (Figure III-20). Selon leurs résultats la diminution de β et l'augmentation de μ (ou l'augmentation de l'angle γ_r) mène à augmenter le pourcentage des plaquettes produites par fendage et, par conséquent, des plaquettes plus fines. Ils expliquent ce phénomène par une orientation de l'effort appliquée favorisant le fendage du bois. Cependant l'augmentation de β et la diminution de γ_r mène à augmenter le pourcentage des plaquettes produites par tranchage, ce qui donne des plaquettes plus épaisses.

Les études expérimentales effectuées par Hartler sur les angles de coupe [Hartler 1962c; Hartler 1962a; Hartler 1962b] ont permis de consolider les connaissances sur le déchetage par un système à disque. Ces expérimentations ont été réalisées sur un banc d'essais capable de produire des plaquettes à une vitesse de coupe pouvant atteindre 30 m/s.

Selon Hartler, l'angle de l'inclinaison verticale (ε) a une grande influence sur la granulométrie des plaquettes. Avec l'augmentation de la valeur de ε et en fixant les valeurs de β et α , le taux des plaquettes de petite taille et leur épaisseur et leurs épaisseurs augmentent par comparaison avec des plaquettes de même longueur mais produites avec un angle ε plus faible. Il a également constaté l'augmentation de la proportion des fines particules.

L'argumentation de Hartler est la suivante : en changeant ε , les efforts de coupe vont également modifier leurs valeurs et leurs directions, mais surtout la composante de la force de

réaction NPI perpendiculairement à la direction des fibres qui est proche de s'aligner avec la surface de coupe du couteau (Figure V-21).

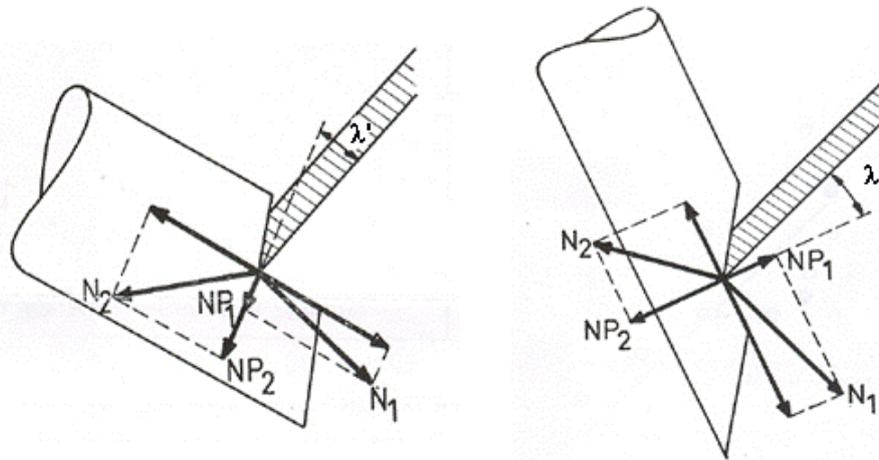


Figure V-21. Forces de réactions et leurs composantes dans deux cas : grande ε à droite et petite ε à gauche

En augmentant l'angle ε , cette force va changer son sens, passant d'une force de traction à une force de compression sur le rondin. Sa nouvelle direction est déterminée par l'angle λ' calculé ainsi ;

$$\text{équation V-2,} \quad \lambda' = 90 - (\alpha + \beta + \varepsilon)$$

Quand λ' est positif, NPI est une force de traction. De ce fait, durant la formation des plaquettes, NPI aide à enlever les plaquettes ou à les compresser et, par conséquent, retarder leur décollage par fissuration, ce qui explique l'augmentation de leur épaisseur. Cette augmentation est également due à l'augmentation de la vitesse de pénétration du couteau dans le bois car la valeur de NPI diminue, ce qui aide le couteau à pénétrer plus loin avant que la plaquette ne se détache par propagation d'une fissure. Hartler n'oublie pas de rappeler que l'effet de l'angle λ' est assez important parce ce qu'il est directement lié à l'angle γ_r , ce dernier étant décrit au sein de l'usinage du bois comme l'angle qui détermine l'épaisseur des plaquettes.

Un autre effet de ε est noté : pour une petite valeur de ε , la section de bois coupé est plus importante, ce qui limite le diamètre maximum des rondins à couper, avec un orifice d'alimentation généralement assez étroit.

L'angle de taillant (β) n'a pas une grande influence sur la granulométrie des plaquettes selon Hartler, sauf si la variation de l'angle β mène à changer la valeur d'autres angles comme λ' . Le seul effet visible est l'augmentation de la durée de vie du couteau qui la pièce la plus

exposée à l'usure, puisqu'il est en contact direct et qu'il génère la majeure partie des plaquettes. Plus l'angle β sera important, meilleure sera la résistance à l'usure.

L'angle de dépouille (α) n'a pas d'effet sur la granulométrie des plaquettes quand il a une valeur supérieure à $1^\circ - 2^\circ$. Quand cette condition est respectée, la face de dépouille ne frotte pas la face du bois coupé et la vitesse d'aménagement reste constante.

Enfin, on constate une cohérence entre les résultats des différentes études analysées. Cependant, il est à souligner que dans toutes les références analysées, les déchiqueteuses utilisées ont un aménagement du bois par gravité et le bois est toujours incliné avec un certain angle de la verticale (ε est entre 25° et 45°). D'où la nécessité d'étudier l'effet de ces différents angles sur les déchiqueteuses qui ont un système d'aménagement mécanisé et un angle ε droit.

V.2.4 Saillie des couteaux

La saillie du couteau (H) joue un rôle important sur la longueur des plaquettes (L), comme le montre l'équation V-1 qui détermine la longueur des plaquettes selon Buchanan et Monico [Buchanan and Duchnicki 1963; Monico 1979] ; $L = H / \sin \varepsilon$ ou $L = H / \cos \iota$.

Augmenter la saillie des couteaux contribue directement à l'augmentation de la longueur des plaquettes. Trois paramètres ont été modifiés sur une déchiqueteuse à disque de marque (Morbark 52") dans les travaux de Jones [Jones 2005] : la saillie des couteaux (16, 21 et 25 mm), l'angle du couteau (21° , 26° et 31°) et la longueur du contre couteau (57,2 et 63,5 mm). Le bois utilisé est le pin Radiata.

Jones a utilisé deux tamis vibrants possédant des trous ronds de 58 et 6 mm, afin d'éliminer les grands éclats et les petites particules.

Ses expérimentations ont montré que la longueur et l'épaisseur des plaquettes augmentent avec la saillie des couteaux de 16 à 25 mm. L'influence sur la longueur est plus importante que sur l'épaisseur, d'où l'augmentation du taux de queues de déchiquetage et la diminution du pourcentage des plaquettes de taille acceptable et de petite taille.

Les tamis ajoutés à la déchiqueteuse n'ont pas montré un effet sur le taux des plaquettes acceptables, alors que le taux des queues de déchiquetage augmente et celui des petites particules diminuent après le tamisage (Figure V-22).

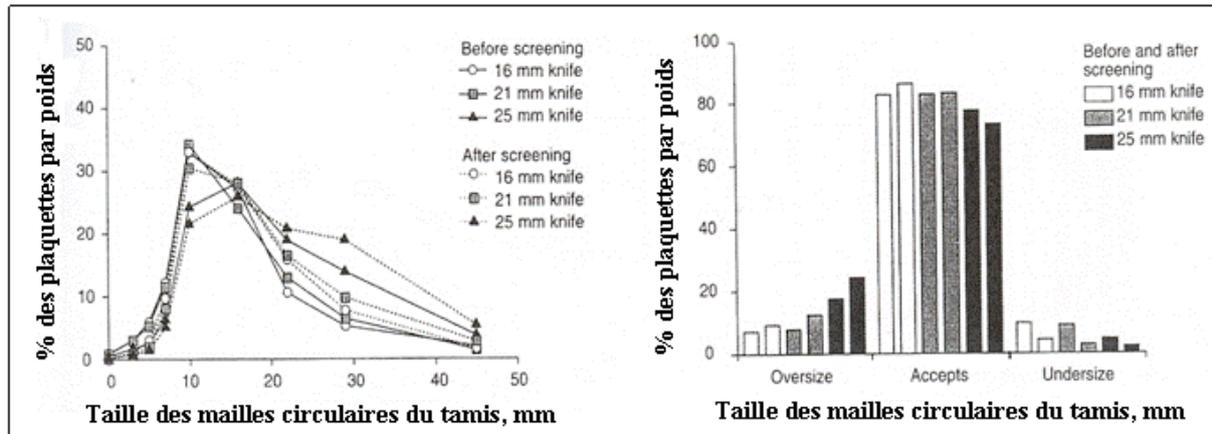


Figure V-22: L'influence de la saillie du couteau sur la longueur des plaquettes

V.2.5 Relation entre l'épaisseur et la longueur de plaquettes

Selon Engelgau [Engelgau 1978], l'épaisseur et la longueur des plaquettes diminuent ensemble, pour le bois tendre comme pour le bois dur comme le montre la Figure V-23.

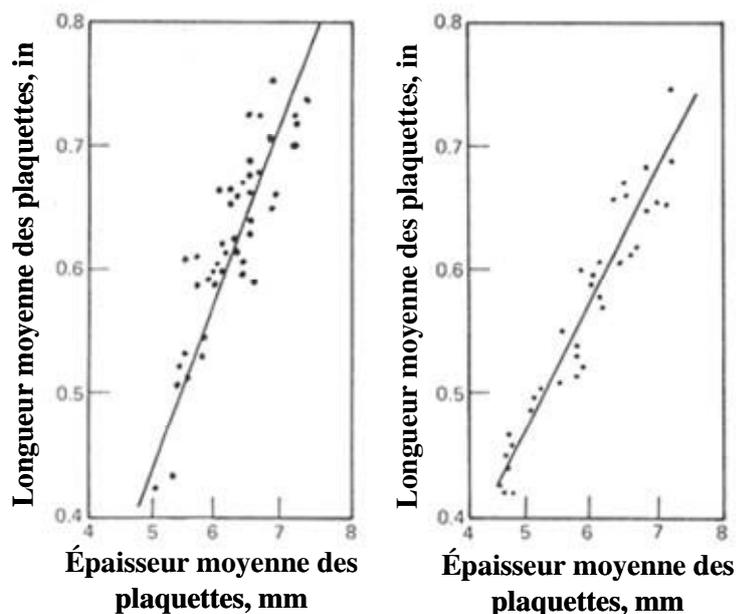


Figure V-23: Relation entre la longueur et l'épaisseur des plaquettes (calculées) ;
À gauche pour le pin, et à droite pour différents bois durs [Engelgau 1978]

La relation entre la longueur et l'épaisseur des plaquettes a également été vérifiée par Twaddle [Twaddle 1997], qui a mené ses expérimentations sur quatre essences de bois vert : pin taeda (*Pinus taeda*) qui est un bois tendre, et trois autres essences de bois dur : chêne rouge (*Quercus falcata*), storax américain (*liquidambar styraci-flua*) et noyer tendre (*Carya*

ovata). Les tests ont été réalisés sur un appareil de test (MTS servo-hydraulique) équipé d'un couteau pour une vitesse de coupe de 0.25 m/s.

Twaddle a montré que le rapport entre la longueur et l'épaisseur des plaquettes n'est pas identique entre les différentes essences de bois soumises aux mêmes conditions de test (Figure V-24). Ce rapport a de plus tendance à diminuer avec l'augmentation de la longueur des plaquettes.

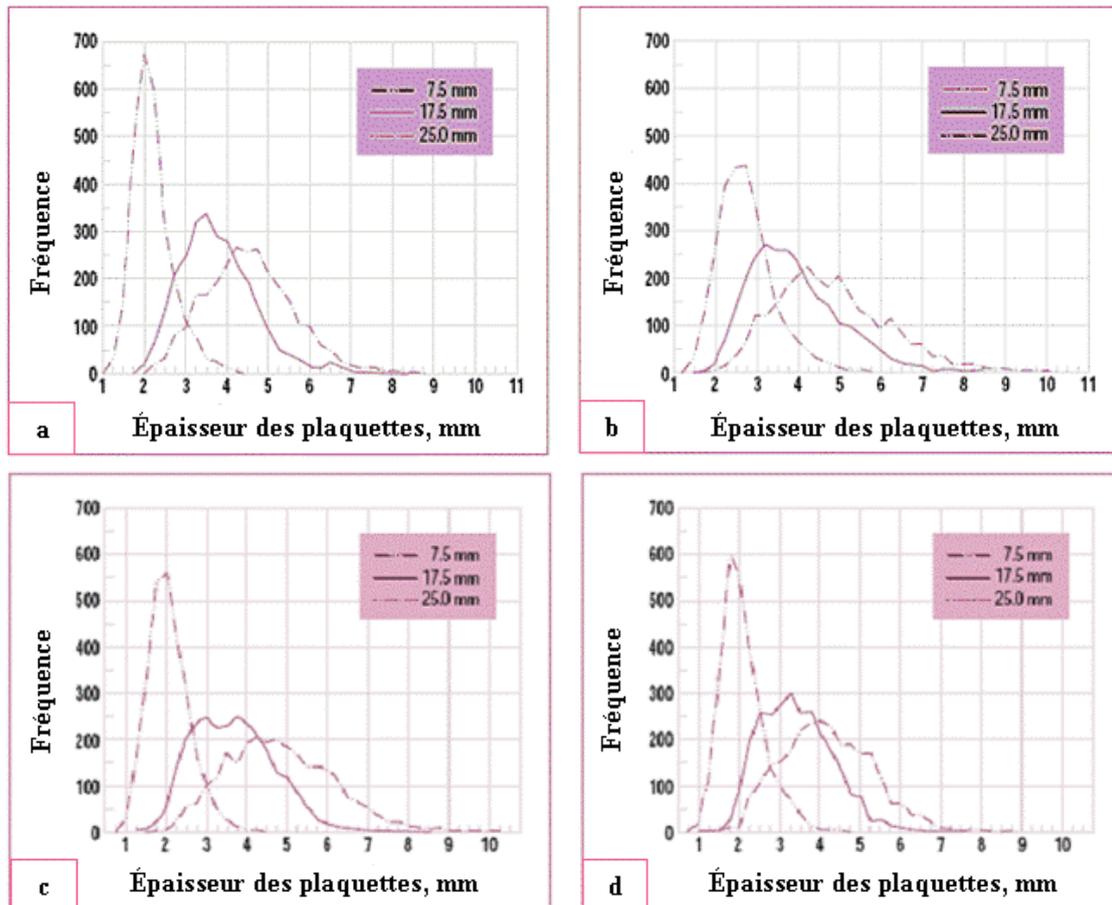


Figure V-24. Fréquence de distribution de l'épaisseur des plaquettes par rapport à leurs longueurs pour; a- le chêne rouge, b- le pin taeda, c- le noyer tendre, d- le storax américain [Twaddle 1997]

Twaddle propose une explication à l'augmentation non linéaire de l'épaisseur des plaquettes avec leur longueur : l'apparition des fissures est le résultat de la distorsion des fibres par la pénétration du couteau dans le bois et du frottement exercé par la face d'attaque du couteau sur le bois. Après l'initiation des fissures, un niveau critique d'énergie doit être fourni pour les faire progresser. Pour les plaquettes courtes, quand une fissure apparaît, l'énergie fournie par le couteau en comprimant le bois par la face d'attaque peut être suffisante pour faire

progresser la fissure à travers toute la plaquette, alors que le couteau continue son chemin dans le bois sur une petite distance. Quand la longueur des plaquettes augmente, une énergie plus importante doit être fournie pour produire la plaquette par fissuration, c'est pourquoi le couteau doit pénétrer plus profondément dans le bois pour fournir cette énergie. Par conséquent, l'épaisseur des plaquettes augmente.

Cependant, le transfert de l'énergie depuis la surface comprimée de la plaquette jusqu'au sommet de la fissure devrait être plus efficace parce que l'épaisseur de la plaquette augmente, ce qui n'est malheureusement pas le cas. C'est pour cette raison que l'épaisseur n'augmente pas linéairement avec l'augmentation de la longueur, et que les diverses essences testées se comportent différemment.

V.2.6 Diamètre et forme du bois déchiqueté

La qualité du bois déchiqueté joue un rôle important sur la forme et la granulométrie des plaquettes produites selon Fuller et Dubois [Fuller 1991; Dubois 1992]. En effet, moins il y a de ramifications et des courbures dans le bois à déchiqueter, plus homogènes seront les plaquettes. Les plaquettes produites à partir de longs rondins sont par ailleurs de meilleures qualités que celles obtenues à partir de bois courts [Twaddle 1992c].

Selon Monico [Monico 1979], le diamètre du bois détermine la largeur des plaquettes lors du déchiquetage de petites branches alors que pour du bois de grand diamètre, la largeur des plaquettes dépend de la façon par laquelle le bois se fractionne, ce qui est difficile à contrôler. En contradiction avec Monico, Twaddle [Twaddle 1992b] exclut toute influence du diamètre des rondins déchiquetés sur la taille des plaquettes produites.

V.2.7 Caractéristiques mécaniques du bois

La formation des plaquettes est influencée par les propriétés mécaniques du bois déchiqueté. Parmi ces paramètres, on distingue l'effet de la résistance au fendage, la résistance au cisaillement parallèle aux fibres et la résistance à la compression parallèle aux fibres. Avec une résistance à la compression plus élevée, une résistance au fendage ou une résistance au cisaillement plus faible, les plaquettes produites tendent à être plus fines [McLauchlan 1979].

La largeur des plaquettes dépend aussi de leurs caractéristiques puisque la fissuration et la fracture du bois en dépendent. Les caractéristiques mécaniques du bois sont variables selon

les différentes essences, la direction de coupe par rapport aux cernes de croissance, le taux d'humidité et la température [Hatton 1976; Hartler 1996; Twaddle 1997].

V.2.8 Température de bois et les variations saisonnières

Selon Hernandez et Hatton [Hatton 1977; Hernández 1997a], le taux de fines particules et de petites plaquettes diminue entre l'hiver froid et les mois les plus chauds d'été. L'effet de baisser la température de bois sur la dimension des plaquettes est similaire à celui d'augmenter la vitesse de coupe, c'est-à-dire produire des plaquettes plus fines.

Ce phénomène a été expliqué par différents travaux de recherches comme ceux de Mishiro et Koran [Koran 1979; Mishiro 1984b; Mishiro 1984a; Mishiro 1990]. Un changement des propriétés mécaniques du bois est lié à la baisse des températures. En effet, quand la température baisse de 0°C à -20°C, avec un taux d'humidité de 150% dans l'aubier, une augmentation de 120% du module de rupture (obtenu par test statique en flexion) est observé, une augmentation de 16% du module d'Young, et d'une augmentation de la tension transversale

Ce changement de propriétés du bois mène à modifier le rapport entre la résistance parallèle au fil du bois (en flexion) et la résistance perpendiculaire au fil (en cisaillement perpendiculaire). Ce rapport est plus important en hiver, ce qui provoque des plaquettes plus fines. Quand le taux d'humidité est élevé, l'effet du gel durant les saisons glaciales est plus grand sur les propriétés mécaniques de bois, le rendant plus facile à fragmenter.

V.2.9 Conclusion sur les facteurs influents

On constate après cet état de l'art du déchetage du bois que les facteurs influents sur la granulométrie des plaquettes sont la vitesse de coupe, l'angle de coupe réel, le mode de coupe, la saillie du couteau, la température ambiante, l'humidité du bois, les caractéristiques mécaniques et physiques du bois.

L'augmentation de la vitesse de coupe ou la diminution de la température du bois en dessous de zéro mène à augmenter la proportion des petites plaquettes et à diminuer leurs épaisseurs. Les angles de coupes sont complémentaires, mais l'angle de coupe réel (γ_r) est le plus important. Si le changement d'autres angles mène à augmenter γ_r , l'épaisseur des plaquettes produites va diminuer. Tandis que les effets de β et α n'ont pas une grande influence sur la

granulométrie des plaquettes. L'effet de ε est constaté sur la longueur des plaquettes, qui augmente avec la diminution de ε .

Selon la relation qui a été établie entre les longueurs des plaquettes et leurs épaisseurs, on peut dire que tous les facteurs qui influencent l'épaisseur des plaquettes ont également un effet sur leurs longueurs et réciproquement. Les caractéristiques mécaniques du bois ont un rôle important sur la taille des plaquettes, puisque le cisaillement et la fissuration du bois sont liés à ces caractéristiques. En dernier lieu, les dimensions du bois à déchiqeter et sa qualité modifient la granulométrie des plaquettes obtenues. Plus les rondins sont longs sans courbures ni ramifications, et plus homogènes et de bonne qualité seront les plaquettes produites. Le Tableau V-2 rassemble les effets des facteurs mentionnés précédemment et montre leurs des effets ou non sur la taille et la forme des plaquettes forestières produites.

Dimensions des plaquettes	Longueur	Épaisseur	Largeur	Forme et homogénéité
Vitesse de coupe : (+↗)	1 :-	1 :-	1 :-	?
Angles de coupe; α, β, γ_r : (+↗)	α et β : 0, γ_r : ?	α et β : 0, γ_r : 1 :-	α et β : 0, γ_r : ?	?
Direction de coupe; ρ, ε : (-↘)	ρ : ?, ε : 1 : +	ρ : ?, ε : 1 : +	ρ : ?, ε : 1 : +	?
Saillie du couteau : (+↗)	1 : +	1 : +	?	?
Forme et diamètre du bois : (+↗)	?	?	?	1 : +
Caractéristiques mécaniques : rés. Fendage et cisaillement : (-↘) rés. Compression : (+↗)	1 : ?	1 : -	1 : ?	?
Température : (-↘)	1 : -	1 : -	1 : -	?

**1: Influence 0: Sans influence ?: Inconnu + : Influence positive
- : Influence négative (+↗): Augmentation (-↘): Diminution**

Tableau V-2. Récapitulatif des facteurs influençant la granulométrie des plaquettes forestières

On constate que le tableau si dessus est loin d'être complet : l'effet de plusieurs facteurs n'a pas été étudié (Figure V-17). De plus, la plupart des études réalisées n'ont pas de conditions expérimentales approchant celles utilisées en déchiqetage des rémanents forestiers. Les principales différences sont énumérées ci après :

1. dans les différentes expériences, le bois déchiqueté était de qualité supérieure (tronc d'arbre), alors que les plaquettes forestières sont produites à partir du bois de qualité inférieure (branches, produits d'éclaircie et de trituration),
2. les éprouvettes utilisées n'ont pas toutes la forme du bois destiné au bois énergie, c'est-à-dire des rondins complets avec leurs écorces,
3. la plupart des études ont été réalisées avec des déchiqueteuses à aménagement par gravité, alors que les déchiqueteuses forestières ont un aménagement horizontal par un système mécanisé,
4. plusieurs études ont été réalisées avec des vitesses de coupes lentes de l'ordre de 0.001 à 1 m/s, alors que l'opération de déchiquetage est réalisée avec des grandes vitesses de coupe qui dépassent les 20 m/s.

Toutes ces raisons nous poussent à étudier l'opération de déchiquetage du bois forestier dans des conditions de coupe industrielles, afin de vérifier les tendances indiquées dans la littérature. Nous pourrions ainsi approfondir les connaissances sur la formation des plaquettes en déchiquetage et les facteurs influents sur la granulométrie de celles-ci.

V.3 Protocole expérimental de détermination des facteurs influents sur la granulométrie des plaquettes forestières

V.3.1 Introduction

Suite à l'étude bibliographique, nous avons choisi d'étudier dans un premier temps les effets de la variation des paramètres suivants sur la granulométrie des plaquettes forestières: avance par dent, vitesse de coupe, angle de coupe réel et angle de taillant.

V.3.2 Conditions de coupe

Lors de l'utilisation de notre banc d'essais au cours des campagnes d'essais présentées dans ce chapitre, les coordonnées du centre du contre-couteau (K) sont restées fixes dans le plan (OXY) (Figure V-25), avec O centre du disque. De ce fait, les efforts de coupes projetés dans le plan (OXY) ont toujours les mêmes directions, et les éprouvettes ont tendance à se diriger vers O selon l'axe OX quand elles ne sont pas bien maintenues par le rouleau ameneur.

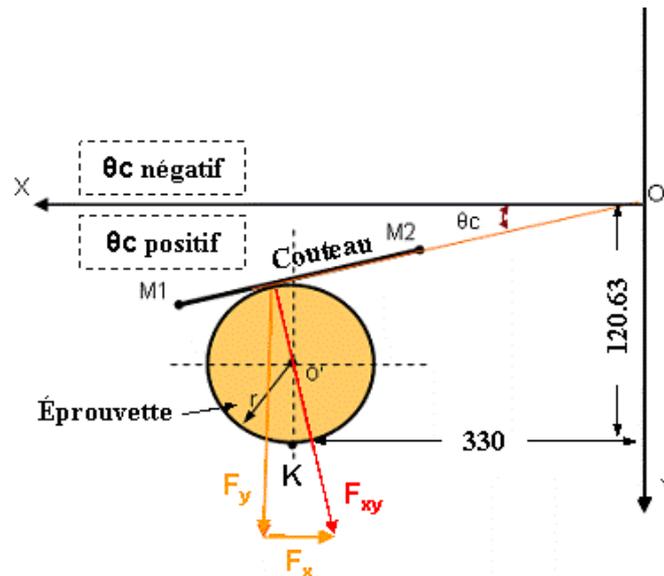


Figure V-25. Configuration de coupe pour un rondin de diamètre maximal 120 mm

Le mode de coupe utilisé durant les expérimentations est ($\rho = 90^\circ$, $\varepsilon = 90^\circ$), avec seulement 2 copeaux utilisés. Les facteurs testés sont : l'avance par dent (f_z), l'angle de coupe réel (γ_r) qui est à l'angle de coupe (γ) dans notre configuration de coupe (paragraphe III.2.5.1.4), l'angle de taillant (β) et la vitesse de coupe (V_c) calculée au milieu du copeau. Les valeurs de ces différents facteurs sont présentées dans le Tableau V-3.

f_z (mm)	γ ($^\circ$)	V_c (m/s)	β ($^\circ$)
3.5	45	19	25
4.8	50	26	34
6	52.5	32.4	
8	55		

Tableau V-3. Valeurs des facteurs testés

Trois essais ont été réalisés pour chaque condition de coupe. Les résultats analysés sont les valeurs moyennes de ces différents tests.

V.3.3 Caractéristiques des éprouvettes

Trois essences ont été choisies pour représenter la forêt française : le sapin et l'épicéa pour les conifères et le chêne pour les feuillus. Durant les expérimentations, nous avons décheté des centaines d'éprouvettes de bois vert coupées dans la forêt de Dogneville (Vosges). Les éprouvettes sont des rondins de diamètre moyen variant entre 90 et 115 mm, de défilement compris entre 1 et 10 mm/m et d'une longueur d'un mètre. Bien que toutes les éprouvettes

soient du bois dit «vert » leurs humidités varient entre 44% et 55 % pour les éprouvettes de résineux et entre 32% et 40% pour les échantillons de chêne. Les éprouvettes proviennent d'arbres différents, ce qui implique des propriétés mécaniques différentes et une morphologie variable.

V.3.4 Protocole expérimental pour l'analyse granulométrique

Afin d'être précis dans l'analyse granulométrique des plaquettes produites, j'ai établi après plusieurs pré-tests les étapes de ce protocole présenté ici :

Étape (1) : Identifier et mesurer les caractéristiques de l'éprouvette en termes de taille (longueur (mm), diamètre (minimal et maximal) en mm, section), de poids (g) et essence,

Étape (2) : Déchiqueter l'éprouvette,

Étape (3) : Récupérer toutes les plaquettes, notamment celles mal évacuées de l'unité de déchiquetage en utilisant une soufflette à air comprimé, puis les peser afin de comparer le poids des plaquettes récupérées avec le poids initial de l'éprouvette, et afin de mesurer l'humidité sur brut des plaquettes en suivant la norme française [NF B 51-004] décrite ici en quatre points :

I- Peser les plaquettes dont on souhaite mesurer l'humidité,

II- Déshydrater les plaquettes dans une étuve ventilée à 103°C jusqu'à stabilisation de leur masse (24 h),

III- Peser les plaquettes séchées à leur sortie de l'étuve afin d'éviter toute reprise d'humidité,

IV- L'humidité sur brut, notée (H_b), peut être évaluée comme le rapport de la masse d'eau sur la masse du bois humide :

$$H_b = \frac{m_{\text{bois.humide}} - m_{\text{bois.anhydre}}}{m_{\text{bois.humide}}} \times 100$$

équation V-3: Formule de calcul de l'humidité sur brut

- $m_{\text{bois.humide}}$ est la masse du bois humide en kg,
- $m_{\text{bois.anhydre}}$ est la masse du bois sec en kg,
- H_b est l'humidité sur brut.

Étape (4) : Attendre que les plaquettes soient sèches avant de procéder à l'opération de tamisage, afin d'avoir une humidité similaire entre tous les essais d'une même campagne.

Étape (5) : Peser les plaquettes sèches et les tamiser à l'aide du matériel et de la méthode décrits dans le paragraphe suivant, puis calculer chaque fraction granulométrique, et comparer le poids de l'ensemble des plaquettes triées par fraction granulométrique avec le poids initial des plaquettes avant tamisage pour consolider les résultats.

V.3.5 Procédure de tamisage

V.3.5.1 Tamis utilisés :

Trois tamis sont utilisés en parallèle pour diminuer le temps de tamisage :

- Tamis ALLGAIER :

Ce tamis est composé d'une trémie de chargement vibrante et d'une colonne de tamisage oscillante (Figure V-26), dans laquelle trois tamis sont placés en même temps. Ces tamis métalliques à mailles carrés ont un diamètre de 600 mm et la distance qui sépare un tamis de l'autre est 80 mm. Ce tamis a la particularité de distribuer les fractions granulométriques directement dans leurs récipients, ce qui ne nécessite aucun réglage du temps de tamisage. Quand la trémie est vide, on arrête le tamis et on le nettoie. La taille des mailles carrées des tamis utilisés sont (4, 6.3 et 8 mm).

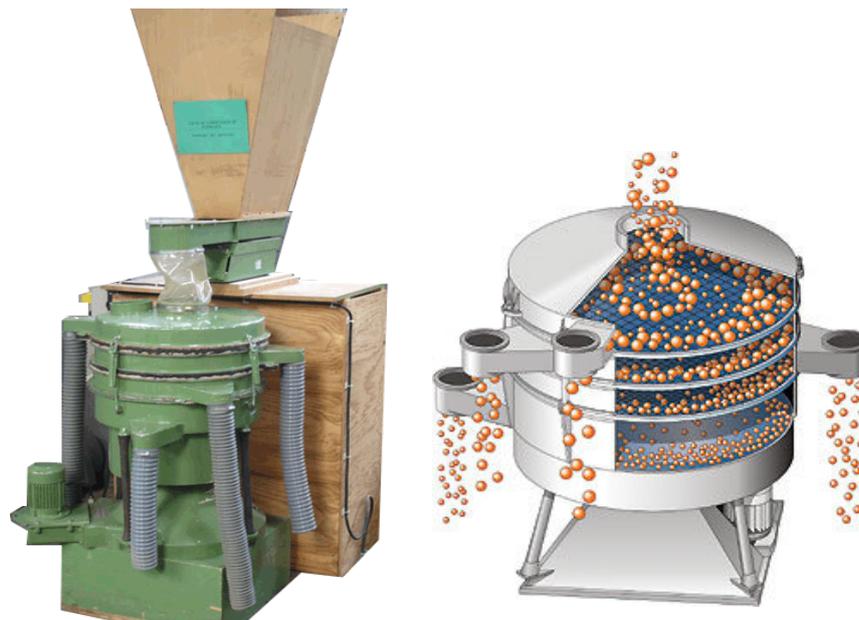


Figure V-26. Tamis oscillant (Allgaier)

- Tamis vibrant :

Le tamis vibre dans la direction latérale. L'inclinaison réglée à 5° permet aux particules qui ne passent pas par les mailles de tomber dans le récipient prévu (Figure V-27). Le tamis est rectangulaire (1000 x 600 mm) à mailles carrées de taille 1 mm.



Figure V-27. Tamis vibrant

- Tamis Fisher – Retsch AS 200 :

On utilise ce tamis quand il y a une petite quantité de plaquettes à tamiser (moins d'un litre). Les tamiseuses de séries AS 200 fonctionnent avec un système de propulsion électromagnétique qui assure un mouvement tridimensionnel répartissant l'échantillon régulièrement sur toute la surface du tamis et d'imprimant aux plaquettes un mouvement hélicoïdal (Figure V-28). Cinq tamis de 200 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur peuvent être superposés. Nous n'utilisons qu'un seul étage avec des mailles carrés de 10 mm.



Figure V-28. Tamis Retsch AS200

V.3.5.2 Analyse de la précision des tamis et de la méthode utilisée :

V.3.5.2.1 Conditions de déroulement des tests :

Les tamis utilisés se rapprochent de ceux conseillés par la norme [NF ISO 3310-2]. L'ouverture des mailles a été choisie en faisant un compromis entre la taille moyenne de nos plaquettes et la norme [CEN/TS 14961]. Les tamis ont les dimensions suivantes (1 – 4 – 6,3 – 8 – 10 mm).

La procédure de tamisage est menée en respectant les consignes données par la norme [NF ISO 2591-1]. Le tamisage se déroule sous conditions climatiques constantes, en prenant soin de calculer le rapport « poids du tas de plaquettes à tamiser » sur « somme des poids des plaquettes tamisées par catégorie ».

Le problème rencontré avec les tamis horizontaux concerne les particules longues et fines qui peuvent passer par les mailles quand elles ont une petite section et par conséquent être mal classées [Hartmann 2006].

V.3.5.2.2 Résultats de l'analyse :

Pour déterminer la fidélité de nos tamis, un test de répétabilité a été réalisé. Un tas de plaquettes de sapin (humidité de 14% sur brut) et un autre de chêne (humidité de 23% sur brut) ont chacun un volume de 21 L. Chaque tas est repassé quatre fois dans les tamis en respectant le même processus de tamisage : pesée des plaquettes, puis tamisage des plaquettes par le tamis Allgaier qui possède les mailles suivantes (4 – 6,3 – 8 mm), puis tamisage de la fraction (< 4 mm) par le tamis vibrant et la fraction (> 8 mm) par le tamis Fisher.

Après le tamisage, on obtient six fractions granulométriques (< 1) mm, (1 – 4) mm, (4 -6,3) mm, (6,3 – 8) mm, (8 – 10) mm, (> 10) mm.

Diviser le poids de chaque fraction par le poids total du tas permet d'exprimer la granulométrie en pourcentage. Les résultats sont rassemblés dans le Tableau V-4.

	Test	%	< 1 (mm)	1 - 4 (mm)	4 - 6,3 (mm)	6,3 - 8 (mm)	8 - 10 (mm)	> 10 (mm)	perte %
Sapin	1		3	27	34	23	8	5	0
	2		3	27	34	24	8	5	2
	3		3	27	34	24	8	5	0
	4		3	28	32	25	8	5	0
Chêne	1		1	24	52	20	3	0,3	0
	2		1	24	52	20	2	0,3	1
	3		1	25	52	19	2	0,3	1
	4		2	26	51	19	2	0,3	1

		< 1 (mm)	1 - 4 (mm)	4 - 6,3 (mm)	6,3 - 8 (mm)	8 - 10 (mm)	> 10 (mm)	
Sapin	variance	0,0	0,1	1,1	0,2	0,0	0,0	
	écart type	0,2	0,2	1,0	0,4	0,1	0,2	
Chêne	variance	0,0	1,1	0,1	0,3	0,1	0,0	
	écart type	0,0	1,0	0,3	0,5	0,3	0,0	

Tableau V-4. Résultats du test de répétabilité

Les résultats des tests montrent que l'incertitude de la mesure granulométrique est faible, avec un écart type compris entre 0 et 1 % et une perte de masse maximale de 2%. On peut aussi conclure que les matériels utilisés et le processus de tamisage mené ont une bonne précision.

V.3.6 Résultats et discussions

V.3.6.1 Observations générales sur le processus de déchetage :

Tout d'abord, la majorité des plaquettes produites par notre banc d'essais et avec les conditions de coupe choisies ont une forme carrée et une épaisseur régulière entre 1 et 3 mm. De plus, des grandes plaquettes sont produites à partir d'écorce ou des nœuds dans le cas du déchetage de sapin et d'épicéa (Figure V-29).

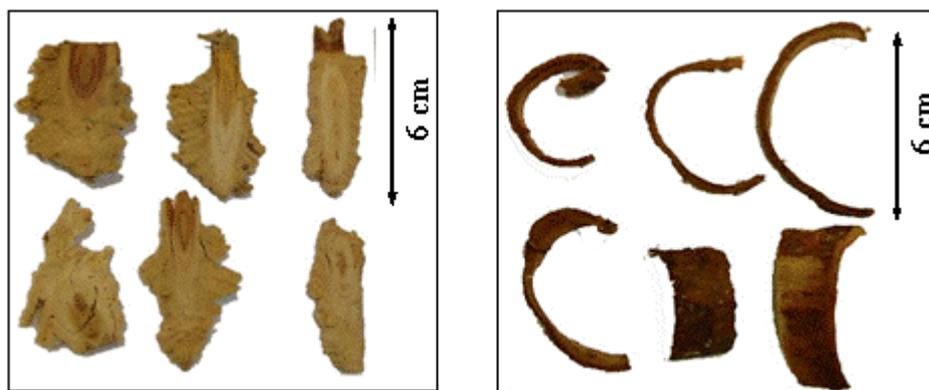


Figure V-29. Plaquettes grossières produites avec le déchetage d'épicéa et de sapin

En outre, nous avons observé que plus la distance entre le couteau et le contre-couteau est grande, moins efficace sera le processus de coupe ; la vitesse d'usure des couteaux et le bruit de coupe augmentent, la surface de coupe devient moins lisse et contient de nombreuses fissures.

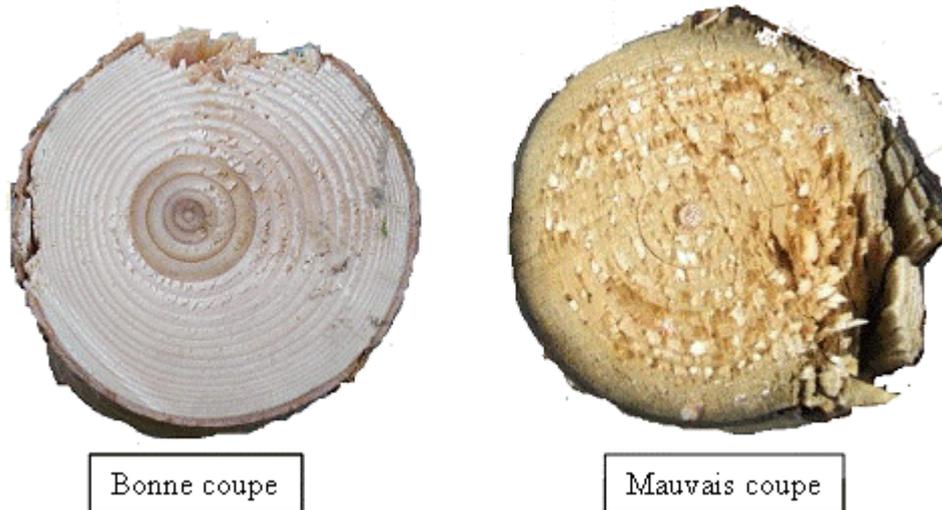


Figure V-30. Deux cas de la surface de coupe selon la distance entre le couteau et le contre-couteau

On estime qu'avec une distance supérieure à 1 mm, les contraintes se développent devant l'arête de coupe et des fissures de rupture apparaîtront dans la zone 4 désignée par McKenzie (Figure V-11). Les plaquettes sont par conséquent arrachées et la surface de coupe devient accidentée. En conclusion, le mouvement entre le couteau et le contre-couteau est similaire à celui de ciseaux, c'est pourquoi cette distance doit avoir la valeur la plus petite possible (entre 0.5 et 1 mm) afin d'éviter un mauvais processus de coupe.

V.3.6.2 Avance par dent (f_z) :

La longueur des plaquettes peut être calculée en utilisant l'équation V-1 : $L=H / \text{Sin}\epsilon$. Cependant cette équation n'est applicable que lorsque le bois amené touche la face du disque, comme dans le cas de l'amenage par gravité. Notre banc d'essais et la plupart des déchiqueteuses forestières ont des systèmes d'amenage mécanisés, qui permettent de contrôler la vitesse d'amenage (V_f). Le contact entre le bois et la face du disque peut être éliminé si la vitesse d'amenage est suffisamment lente par rapport à la vitesse de coupe, et dans ce cas l'équation V-4 remplacera l'équation V-1.

équation V-4,
$$L = \frac{f_z}{\sin \varepsilon}$$

f_z – Avance par dent (mm) ; $f_z = (V_f / Z * N) * 1000$,

V_f – Vitesse d’amenage (m/min),

Z – Nombre de couteaux,

N – Vitesse de rotation du disque (tr/min).

Pour vérifier l’équation V-4, nous avons choisi quatre valeurs de f_z (3.5, 4.8, 6 et 8 mm). La valeur de la vitesse de coupe est restée constamment à 26 m/s, l’angle de taillant et l’angle de coupe réel restant également fixes respectivement à 25° et 50°. Trois tamis de maille carré de 1, 2 et 4 mm sont choisis pour déterminer la distribution granulométrique. Les plaquettes sont par conséquent classées dans quatre catégories : (< 1mm), (1 à 2mm), (2 à 4mm), (> 4mm). Les résultats de tamisage sont représentés dans la Figure V-31 pour le chêne et sur la Figure V-32 pour le sapin.

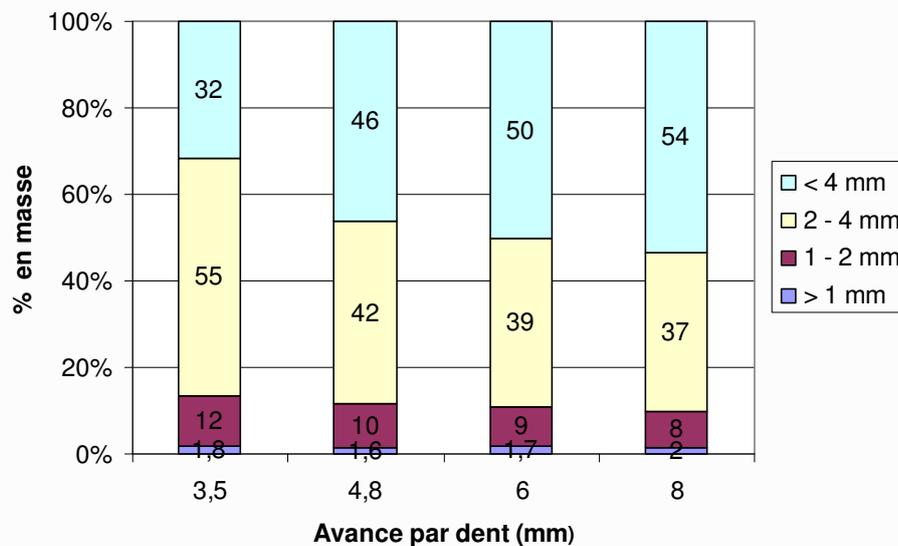


Figure V-31. Effet de la variation de l’avance par dent sur la distribution granulométrique – chêne

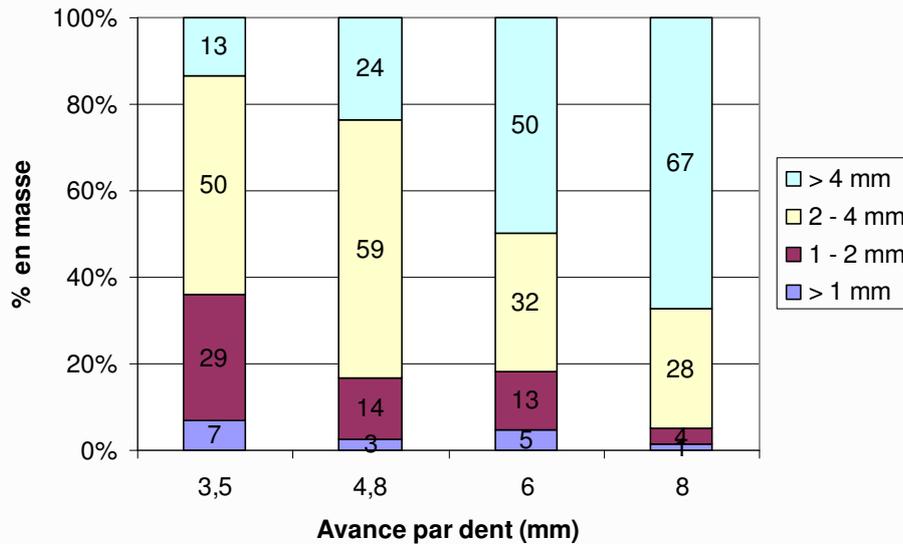


Figure V-32. Effet de la variation de l'avance par dent sur la distribution granulométrique – sapin

Nos expérimentations montrent que l'augmentation de la valeur de l'avance par dent mène à augmenter la taille des plaquettes pour les deux essences. Le pourcentage des plaquettes de la classe (> 4mm) croît alors que les pourcentages des plaquettes dans les autres classes granulométriques diminuent en augmentant l'avance par dent (f_z). De plus, la majorité des plaquettes ont au moins une dimension égale à la profondeur de passe, ce qui est une conclusion logique en accord avec l'équation V-4. La profondeur de passe (ou la longueur des plaquettes) est égale à l'avance par dent (f_z) et non pas à la saillie du couteau (H) d'où une variation linéaire de la taille des plaquettes avec l'avance par dent.

V.3.6.3 Vitesse de coupe (V_c) et l'angle de coupe réel (γ_r):

De part l'interaction entre les facteurs influents, une analyse multi factorielle est plus précise que celle basée sur un seul facteur. Nous avons choisi d'analyser deux facteurs en même temps ; la vitesse de coupe (V_c) et l'angle de coupe réel (γ_r), qui est égal à l'angle de coupe (γ) dans nos conditions de coupe. Quatre jeux d'angles de coupe (Tableau V-5) et trois vitesses de coupe (19.5 m/s, 26 m/s et 32.4 m/s) sont choisis pour tester dans un premier temps l'influence de la vitesse de coupe sur chaque jeu d'angle de coupe.

Jeu des Angles	α (°)	β (°)	γ (°)
Jeu 1	11	34	45
Jeu 2	6	34	50
Jeu 3	3.5	34	52.5
Jeu 4	1	34	55

Tableau V-5. Valeurs des jeux d'angles de coupe

L'avance par dent (f_z) est restée constante à 8 mm, entraînant des vitesses d'amenage (V_f) de 9.6 m/min, 12.8 m/min et 18 m/min respectivement pour les valeurs de la vitesse de coupe de 19.5 m/s, 26 m/s et 32.4 m/s. Cinq tamis à mailles carrées de 1, 4, 6.3, 8 et 10 mm sont choisis pour classer les plaquettes dans six catégories (Figure V-33).

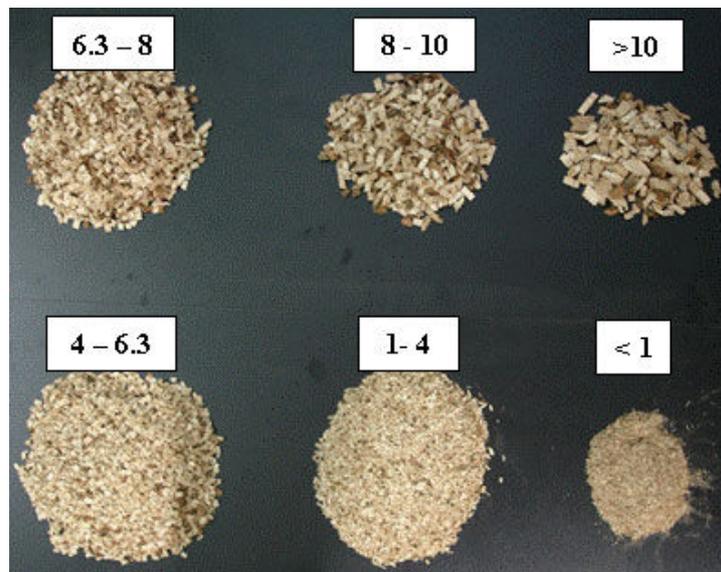


Figure V-33. Fractions granulométriques

Les résultats moyens de la distribution granulométrique sont représentés sur la Figure V-34 et la Figure V-36 pour le sapin, et la Figure V-35 et la Figure V-37 pour le chêne. Chaque colonne de l'histogramme représente une configuration de coupe et chaque partie de chaque colonne, le pourcentage d'une fraction granulométrique de cette configuration. Les plaquettes se concentrent dans les fractions (1 – 4), (4 – 6.3) et (6.3 – 8), les variations de pourcentage étant plus visibles dans les deux premières fractions. Durant l'analyse des résultats, le terme "petites plaquettes" sera utilisé pour représenter les fractions granulométrique suivantes : (< 1), (1 – 4) et (4 – 6.3), alors que l'utilisation du terme "grosses plaquettes" concernera les fractions : (6.3 – 8), (8 – 10) et (> 10).

L'effet de la variation de la vitesse de coupe sur la taille des plaquettes est représenté respectivement sur la Figure V-34 et la Figure V-35 pour le sapin et le chêne.

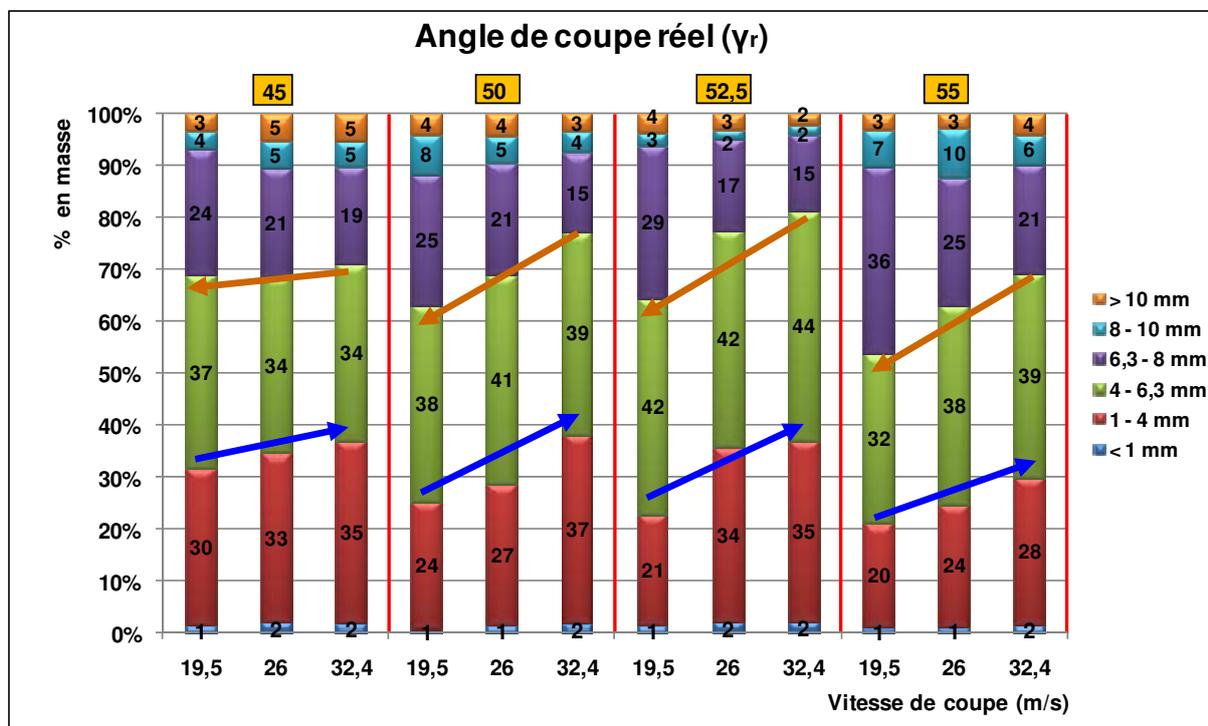


Figure V-34. Effet de la variation de la vitesse de coupe sur la distribution granulométrique – sapin

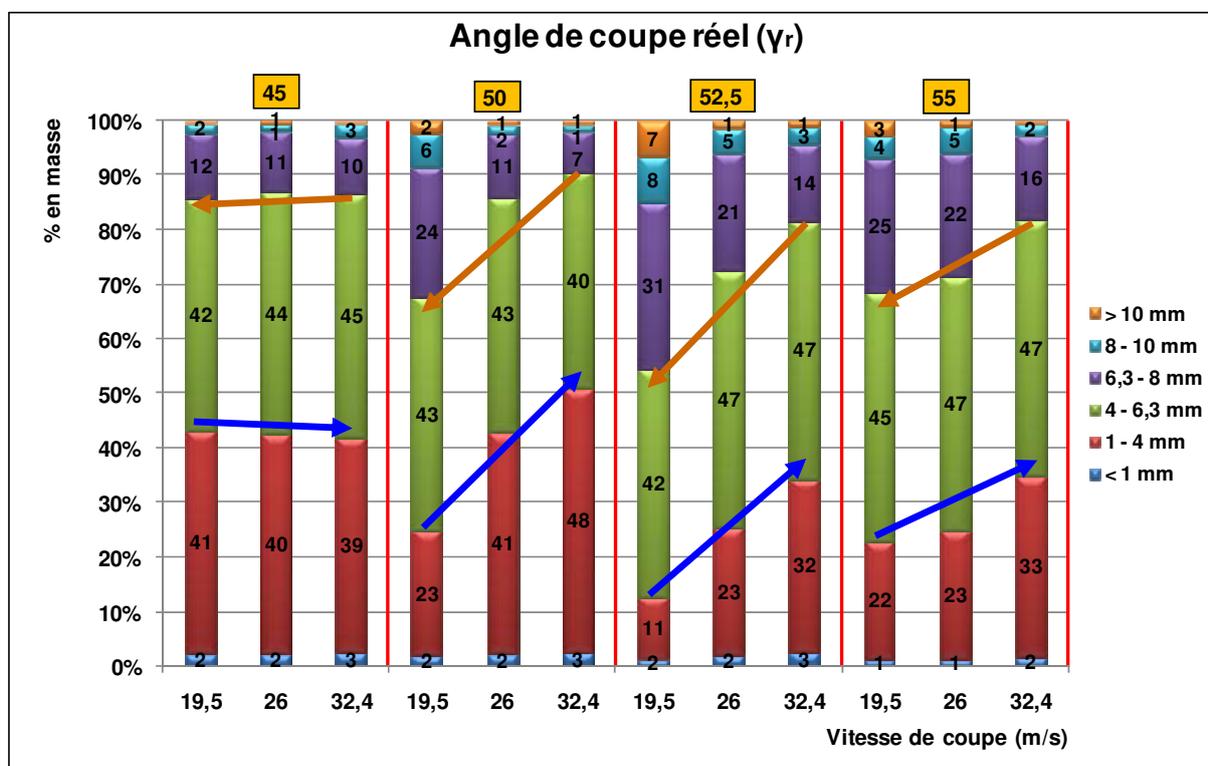


Figure V-35. Effet de la variation de la vitesse de coupe sur la distribution granulométrique - chêne

Quand la vitesse de coupe augmente le pourcentage des “petites plaquettes” croît aussi linéairement, alors que le pourcentage des “grosses plaquettes” diminue pour les deux essences et pour les différents angles de coupe. Le plus grand pourcentage des “grosses plaquettes” est produit avec la vitesse de coupe la moins importante, en accord avec la littérature sur les déchiqueteuses forestières. Cependant, baisser la vitesse de coupe n’est pas sans conséquences, notamment sur l’usure des couteaux, qui augmente dramatiquement si la vitesse de rotation du disque descend en dessous de 500 tr/min. Un compromis doit être trouvé entre la productivité et la durée de vie des outils.

L’effet de variation de l’angle de coupe réel sur la taille des plaquettes pour chaque vitesse de coupe choisie sont présentés sur la Figure V-36 pour le sapin et sur la Figure V-37 pour le chêne.

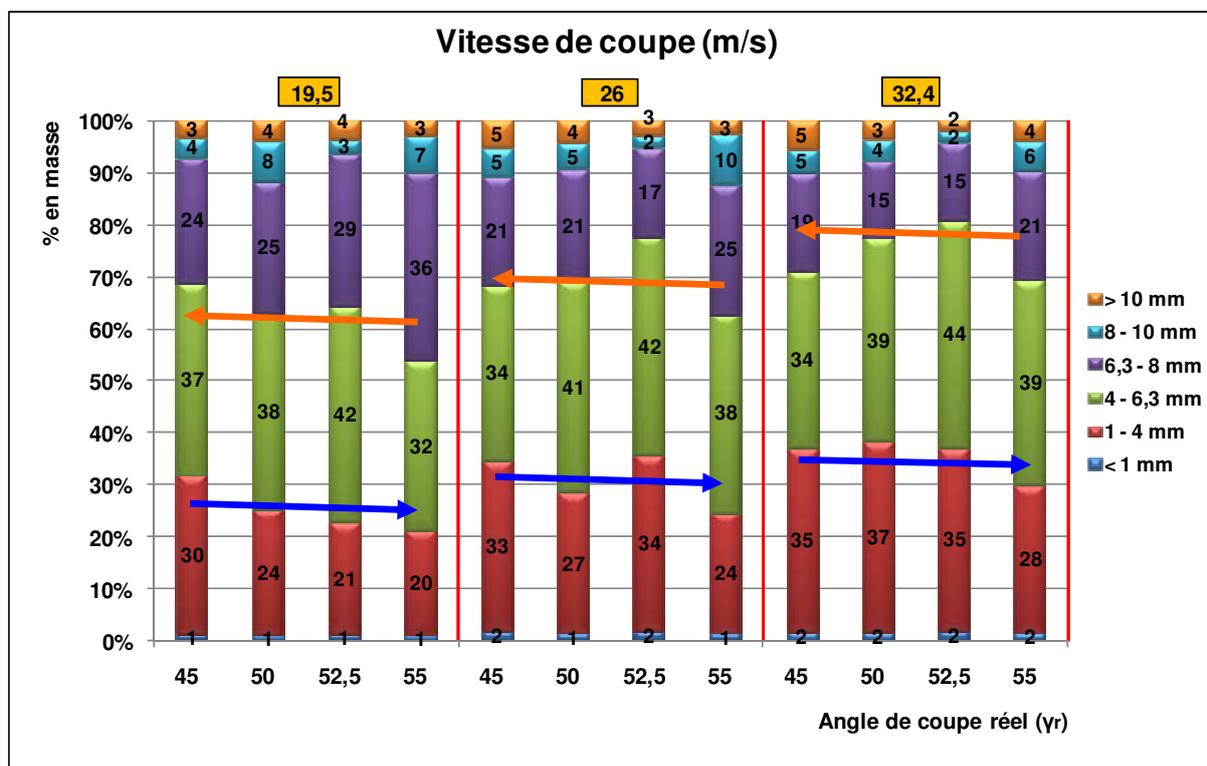


Figure V-36. Effet de la variation de l’angle de coupe réel sur la distribution granulométrique - sapin

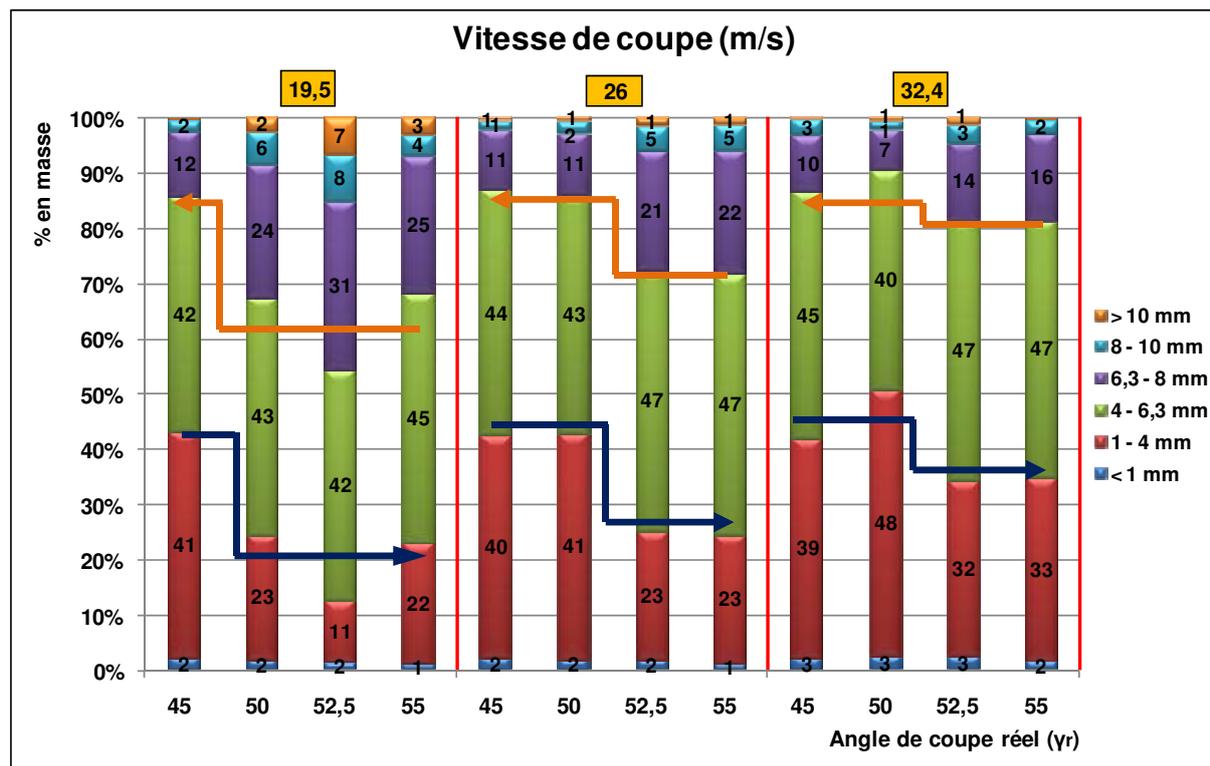


Figure V-37. Effet de la variation de l'angle de coupe réel sur la distribution granulométrique – chêne

Dans la première figure, il n'existe pas de tendance nette de la variation, alors que pour le chêne en mettant de côté le résultat pour (V_c : 19.5 m/s et γ_r : 52.5°), nous pouvons distinguer que le pourcentage des “grosses plaquettes” tend à croître de manière non linéaire quand l'angle de coupe réel augmente. Il y a un front montant entre l'angle 50° et l'angle 52.5°. Nous pensons que cette non-linéarité de variation trouve son origine d'une part dans le comportement mécanique du matériau bois qui est fortement non-linéaire [Holmberga 1999], et d'autre part dans le mécanisme de formation des plaquettes. D'après la littérature, ce mécanisme résulte d'une compétition entre la rupture du bois devant l'arête de coupe par cisaillement des fibres perpendiculairement au fil du bois et la propagation des fissures influencée par le frottement entre le bois et la face d'attaque du couteau.

La théorie de frottement-fissurations peut être résumée ainsi : l'initiation des fissures et leur propagation croissent fortement avec l'augmentation du frottement entre le bois et la face d'attaque du couteau. Dans notre configuration de coupe, le coefficient de frottement (μ) est estimé à partir de la force principale (F_p) et celle normale (F_n), représentées sur la Figure V-38 en utilisant l'équation V-5 :

équation V-5,
$$\mu = \tan(\arctan(F_n/F_p) + \gamma)$$

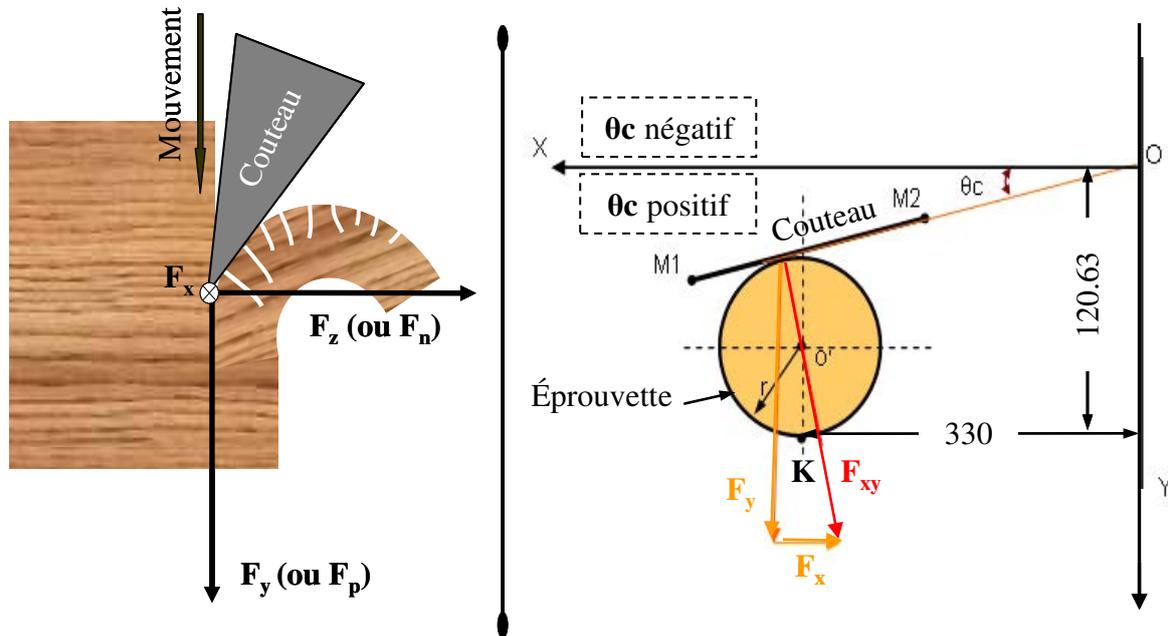


Figure V-38. Propagation des fissures et les efforts de coupe

Avec la variation de la valeur de l'angle de rotation instantané du disque θ_c (Figure V-38), la valeur du frottement change continuellement, de part les variations de F_y et F_z , influencées par la valeur de θ_c . Le frottement est en même temps affecté par la vitesse de coupe et le taux de l'humidité du bois [McKenzie 1968]. De plus, l'équation V-5 indique que le frottement évolue quand l'angle de coupe varie. Pour toutes ces raisons, on peut supposer que la non-linéarité de la variation en distribution granulométrique est due à l'effet du frottement sur l'apparition des fissures et de leur propagation.

V.3.6.4 Angle de taillant (β) :

Deux angles de taillant (25° , 34°) et deux essences (sapin et chêne) sont choisis pour l'expérimentation. Les autres paramètres sont : trois vitesses de coupe (19,5, 26 et 32,4) m/s et un seul angle de coupe (45°). Les tailles de maille des tamis choisis sont les mêmes qui sont utilisés pour l'étude les deux facteurs précédents : (1, 4, 6,3, 8 et 10) mm. Les résultats de tamisage sont présentés sur les Figure V-38 et Figure V-39 pour le sapin et le chêne.

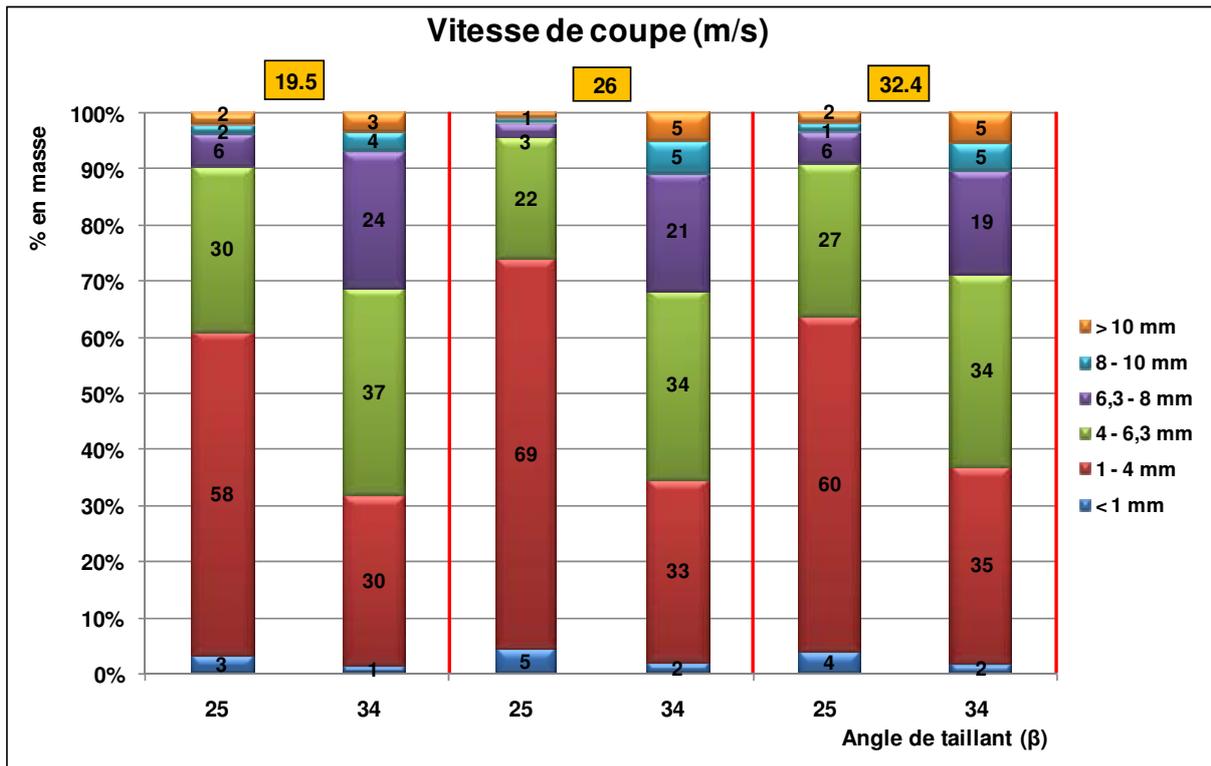


Figure V-39. Effet de la variation de l'angle de taillant sur la distribution granulométrique – sapin

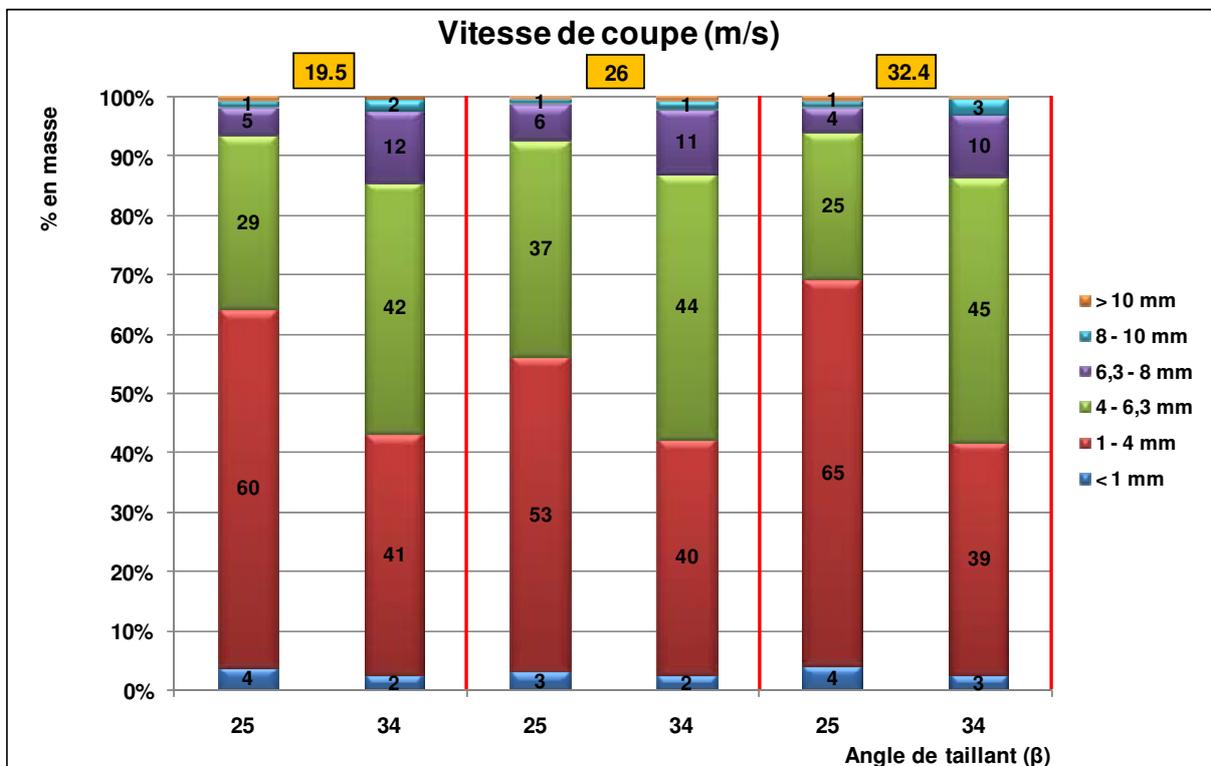


Figure V-40. Effet de la variation de l'angle de taillant sur la distribution granulométrique - chêne

Le pourcentage de “grosses plaquettes” et celui de la catégorie (6,3 – 8) est plus important avec l’angle 34° qu’avec l’angle 25° quelles que soient l’essence et la vitesse de coupe. On ne peut cependant pas préciser si cette variation est linéaire ou non, n’ayant testé que les deux angles de taillant 25° et 34°.

V.3.6.5 Observation à la loupe binoculaire des plaquettes produites:

Après une observation à la loupe binoculaire des plaquettes produites à partir des trois essences (sapin, épicéa et chêne), nous avons remarqué qu’il y a deux types dominants de plaquettes :

- Type 1 : les plaquettes se détachent dans le plan tangentiel à partir du duramen ou de l’aubier (Figure V-41).
- Type 2 : les plaquettes se détachent dans le plan transversal à partir du duramen (Figure V-42).



Figure V-41. Plaquette type 1; épicéa à gauche et chêne à droite



Figure V-42. Plaquette type 2 ; épicéa à gauche et chêne à droite

Les surfaces de ces deux types des plaquettes sont caractérisées de plusieurs façons selon l’essence. Dans le Tableau V-6, j’ai résumé mon diagnostic sur l’obtention de ces surfaces.

		Surfaces formées		
		Surfaces Radiales 	Surfaces tangentielles 	Surfaces transversales 
Type 1	Épicéa, sapin	Obtenues par des fissures sans direction privilégiée	Selon les cernes de croissance	Obtenues par des plans de cisaillement liée à la coupe
	Chêne	Obtenues par des fissures initiées et joignant les vaisseaux	Selon les cernes de croissance	Obtenues par des plans de cisaillement liée à la coupe
Type 2	Épicéa, sapin	Obtenues par des fissures sans direction privilégiée	Selon les cernes de croissance, présence de plusieurs cernes	Obtenues par des plans de cisaillement liée à la coupe
	Chêne	Obtenues par des fissures initiées selon les rayons "médulaires"	Selon les cernes de croissance, présence de plusieurs cernes	Obtenues par des plans de cisaillement liée à la coupe

Tableau V-6. Observations sur les surfaces des plaquettes

Après un triage manuel de la fraction granulométrique (6 – 8) mm d'épicéa, produite avec une vitesse de coupe de 19.5 m/s, une avance par dent de 8 mm, un angle de coupe de 50° et un angle de taillant de 34°, on a trouvé que la proportion des plaquettes de type 1 est la plus importante avec un pourcentage de 59 %, et un pourcentage de plaquettes de type 2 de 8 %. Le reste est constitué d'écorces et de particules longues et fines (Figure V-43).

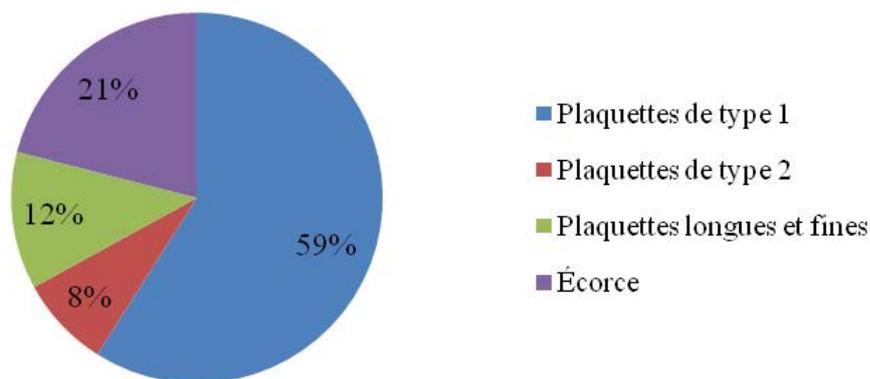


Figure V-43. Proportion des différents types des plaquettes dans la fraction (6 - 8) ; (épicéa, V_c : 19.5 m/s, f_z : 8 mm et γ : 50°)

La formation des plaquettes est compliquée parce qu'elle est composée de deux mécanismes ; le cisaillement perpendiculairement au fil du bois devant l'arête de coupe et la propagation

des fissures normalement et selon la face d'attaque. Comme montré sur la Figure V-44, l'effort de coupe (F_c) a trois composantes selon les axes ; \overline{OX} , \overline{OY} et \overline{OZ} .

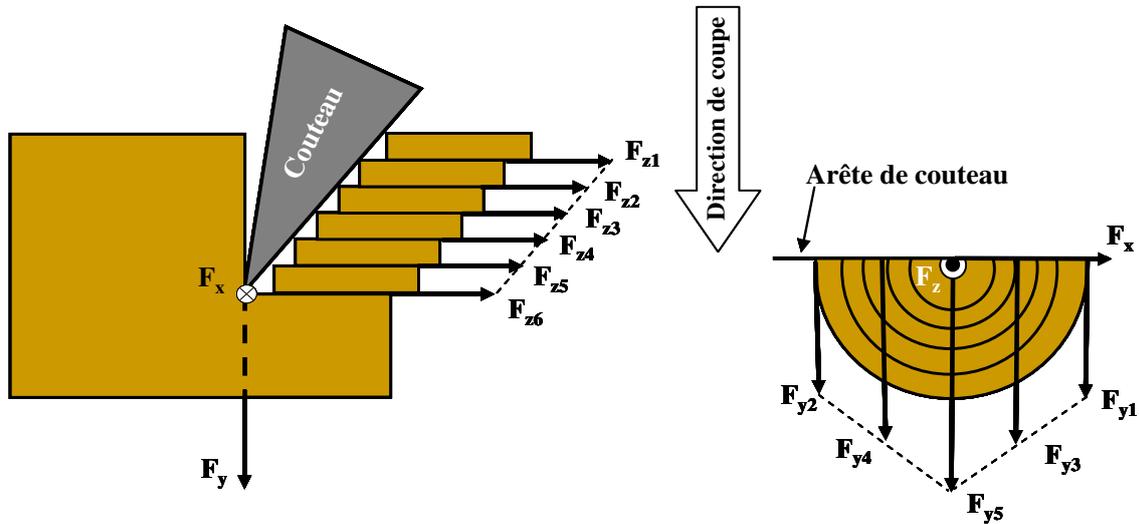


Figure V-44. Formation des plaquettes simplifiée et les efforts de coupe

Les deux composantes F_y et F_z jouent un rôle important dans la formation des plaquettes : F_y enfonce l'arête du couteau dans le bois qui sera coupé par cisaillement et propagation de fissures selon l'axe \overline{OY} , alors que F_z cisaille les plaquettes aux limites des cernes de croissance, en accord avec le mode II de rupture élémentaire mentionné par Triboulot [Triboulot 1981], (Figure V-45).

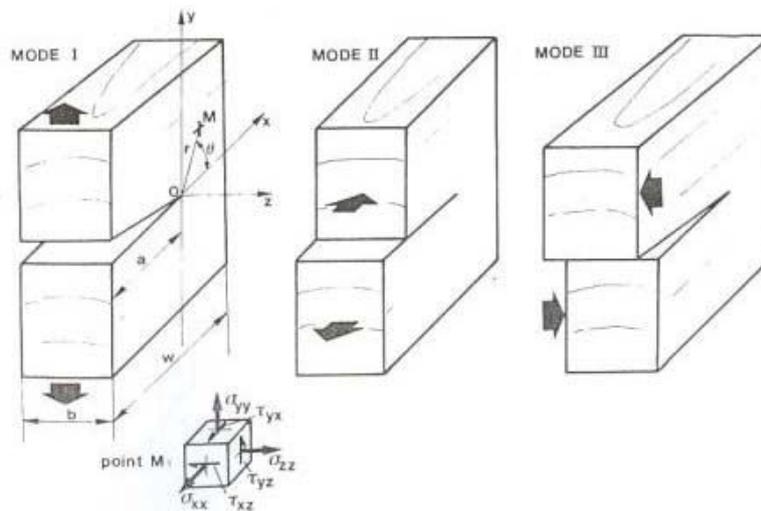


Figure V-45. Définition des trois modes élémentaires de rupture d'une plaque fissurée [Triboulot 1981]

F_y et F_z sont les résultantes de plusieurs composantes (équation V-6).

$$\text{équation V-6,} \quad \begin{cases} F_y = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + \dots + F_{yn} \\ F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + \dots + F_{zn} \end{cases}$$

La valeur de F_x et par conséquent ses effets sur la formation des plaquettes dépend de l'angle de rotation instantané du disque (θ_c) ; le premier est indésirable, il concerne le mouvement du rondin parallèlement à l'axe \overline{OX} , le deuxième est similaire mais de moindre importance à celui de la composante F_y , c'est-à-dire cisaillement et fissuration dans le plan de la coupe selon l'axe \overline{OX} . Concernant les fissurations qui déterminent la largeur des plaquettes, elles sont influencées par plusieurs facteurs comme c'était démontré dans le paragraphe V.3.6.3.

V.3.7 Conclusion

Dans cette étude expérimentale, nous avons analysé l'effet de quatre facteurs sur la granulométrie de plaquettes produites à partir du bois de seconde qualité par l'opération de déchiquetage à disque. Les résultats sont similaires pour les essences étudiées. Les proportions de petites plaquettes augmentent avec l'augmentation de la vitesse de coupe, alors que les proportions de grandes plaquettes augmentent avec l'avance par dent, l'angle de coupe réel et l'angle de taillant. Le Tableau V-2 se trouve enrichi de mes résultats (Tableau V-7).

Dimensions des plaquettes	Longueur	Épaisseur	Largeur	Forme et homogénéité
Vitesse de coupe : (\nearrow)	1 : - : linéaire	1 : - : linéaire	1 : - : linéaire	?
Angles de coupe; α, β, γ_r : (\nearrow)	$\alpha : 0, \beta : 1 : +$ $\gamma_r : 1 : +$	$\alpha : 0, \beta : 1 : +$ $\gamma_r : 1 : -$	α et $\beta : 0,$ $\gamma_r : ?$?
Direction de coupe; ρ, ε : (\searrow)	$\rho : ?, \varepsilon : 1 : +$	$\rho : ?, \varepsilon : 1 : +$	$\rho : ?, \varepsilon : 1 : +$?
Avance par dent : (\nearrow)	1 : + : linéaire	1 : + : linéaire	?	?
Forme et diamètre du bois : (\nearrow)	?	?	?	1 : +
Caractéristiques mécaniques : rés. Fendage et cisaillement : (\searrow) rés. Compression : (\nearrow)	1 : ?	1 : -	1 : ?	?
Température : (\searrow)	1 : -	1 : -	1 : -	?

1: Influence 0: Sans influence ?: Inconnu + : Influence positive - : Influence négative
 (\nearrow) : Augmentation (\searrow) : Diminution

Tableau V-7. Récapitulatif des facteurs influençant la granulométrie des plaquettes forestières enrichies de mes résultats expérimentaux

L'analyse de la formation des plaquettes est complexe, car elle résulte de la compétition entre deux mécanismes : le cisaillement et la propagation des fissures. Il y a de plus une interaction entre les facteurs influents. Cette étude a ouvert de nombreuses voies à confirmer ou à étudier pour de futures campagnes d'essais.

Dans le prochain chapitre, l'effet sur l'effort de coupe des facteurs influençant la granulométrie sera étudié afin de produire des plaquettes de bonne granulométrie pour un coût énergétique le plus faible.



*Chapitre VI. Efforts et puissance de coupe en
déchetage*

VI.1 Effort de coupe

VI.1.1 Introduction

En pénétrant dans le bois pour former une plaquette, l'arête du couteau doit exercer un effort supérieur à la cohésion du bois. Cet effort est la résultante de plusieurs efforts :

- l'effort nécessaire pour faire fléchir les fibres,
- l'effort de coupe par cisaillement,
- les frottements qui s'exercent sur les faces de l'outil.

Le mode de coupe (90 – 90) en coupe orthogonale est le mode de coupe décrivant le mieux la coupe exercée par un couteau du disque sur le bois à déchiqueter. La résultante des efforts exercés par le couteau durant une coupe orthogonale est la force F_c , qui est la réaction de la force exercée par le bois sur l'arête de coupe (R') comme représenté sur la Figure VI-1- a.

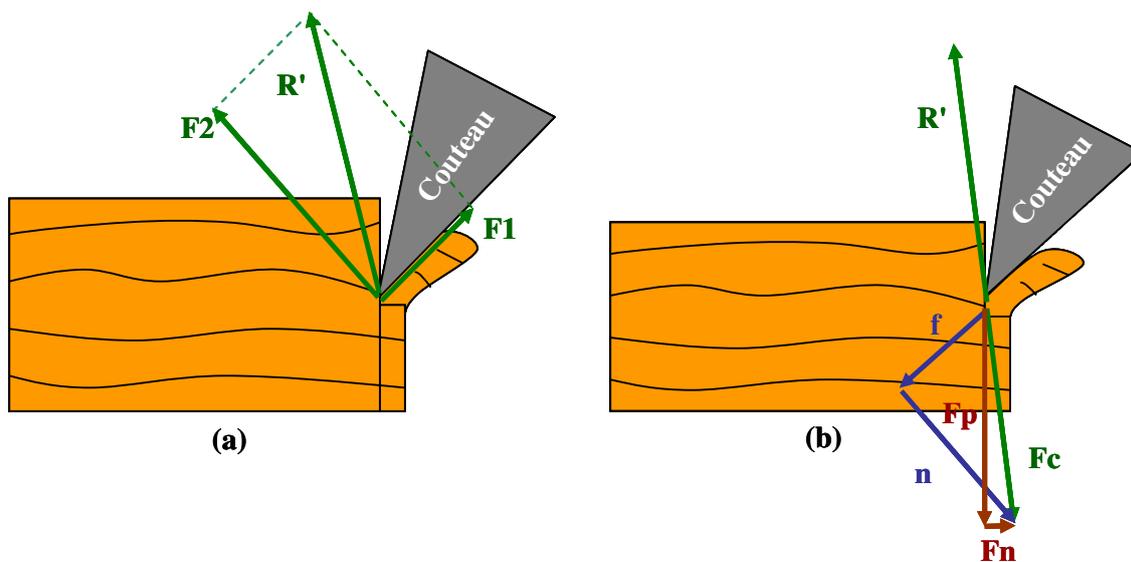


Figure VI-1. Représentation schématique des efforts en coupe orthogonale

R' est composé de deux composantes :

$F1$ – force due au frottement du bois sur l'outil,

$F2$ – force exercée par le bois sur l'outil, perpendiculaire à la face de coupe. Selon Franz [Franz 1958] ou la norme [NF E66-507], on peut décomposer (F_c) en deux systèmes indépendants (Figure VI-1- b):

- F_p et F_n : respectivement selon la direction de l'avance de l'outil et perpendiculairement à celui-ci.
- f et n : sont les réactions de $F1$ et $F2$, selon la direction tangentielle et normale à la face d'attaque.

Les valeurs et les directions de F_p et F_n influencent le processus de formation des plaquettes, comme constaté dans l'analyse de la granulométrie des plaquettes et les facteurs influents (V.1).

Les efforts de coupe totaux (F_c) suivent, selon Kivimaa [Kivimaa 1950], une fonction affine liée à l'épaisseur moyenne de copeau, semblable à l'équation VI-1, où e correspond à l'épaisseur moyenne de copeau en mm, b correspond à la largeur d'usinage en mm et F est l'effort de coupe total en Newtons.

$$\text{équation VI-1,} \quad F = (k_e + k_c \cdot e_{\text{moy}}) \cdot b$$

k_e et k_c sont les coefficients caractérisant la fonction affine. Le coefficient k_e est un coefficient d'arête représentant une force par unité de largeur de coupe exprimé en $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$. Ce coefficient représente la force minimale pour permettre à l'outil de pénétrer dans la pièce de bois et ce pour n'importe quelle épaisseur de copeau. k_e est directement lié à l'acuité de l'arête de coupe et donc à l'usure de l'arête : plus l'arête est usée, plus ce coefficient est élevé. Ce coefficient est donc aussi lié aux propriétés de dureté et de ténacité du matériau bois usiné, et aussi aux caractéristiques de frottements entre l'arête de coupe et le matériau usiné.

Le coefficient k_c quant à lui est un coefficient de coupe représentant une force par unité de surface de la section du copeau. Exprimé en $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$, il est directement lié à l'angle de coupe (γ). Il est aussi lié aux propriétés de flexion et de cisaillement du matériau bois et aussi aux frottements entre le matériau bois et la face de coupe.

Remarque :

Les différentes analyses utilisent souvent les différentes grandeurs de coupe (longueur, largeur et profondeur), représentées sur la Figure VI-2 afin de ne pas les confondre. La longueur de coupe, qui est la distance parcourue par le couteau depuis son contact avec le bois jusqu'à sa sortie, dépend du diamètre du rondin. La largeur de coupe représente la longueur de contact entre le rondin et l'arête du couteau. Elle varie de zéro au moment de l'attaque du couteau à la valeur du diamètre du rondin au milieu de la coupe, puis elle décroît jusqu'au

zéro au moment où l'arête du couteau quitte le rondin. Enfin, la profondeur de passe est la distance égale à la longueur des plaquettes (équation V-4) mesurée parallèlement à la direction des fibres.

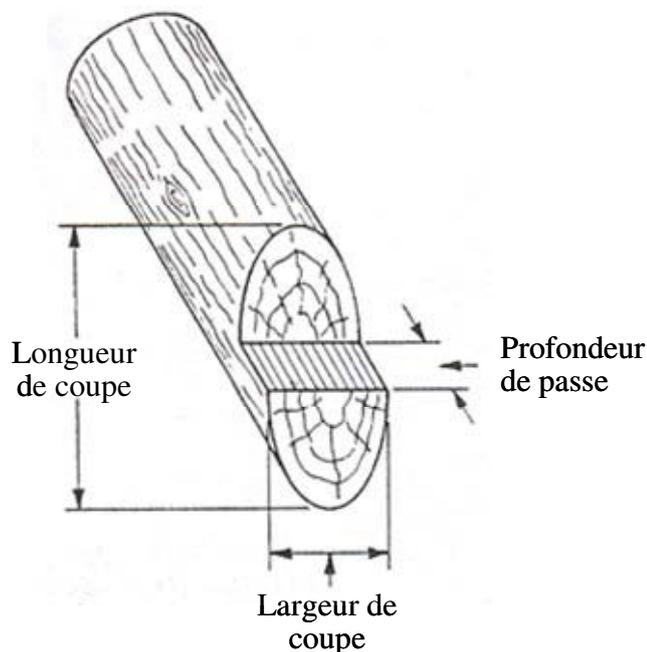


Figure VI-2. Grandeurs de coupe ; longueur, largeur et profondeur

VI.1.2 Répartition des efforts de coupe en déchiquetage par disque

Très peu d'études ont pris en compte l'analyse de l'effort de coupe en déchiquetage par disque. Selon Hartler [Hartler 1962c; Hartler 1962a], qui a analysé les efforts de coupe pour une déchiqueteuse à disque à aménagement par gravité, les efforts agissant sur le rondin sont au nombre de quatre : F , $P1$, $N1$ et $N2$ (Figure VI-3) :

F est le frottement entre le bois et la trémie d'aménagement,

$P1$ est le poids du rondin,

$N1$ est la force de réaction de la surface de coupe sur le bois perpendiculairement à la face de coupe. $N1$ peut être projetée parallèlement aux fibres ($NL1$) et perpendiculairement à celles-ci ($NP1$). L'angle de coupe réel (γ_r) a une grande influence sur les amplitudes de ces projections.

$N2$ est la force de réaction de la surface de dépouille sur le bois perpendiculairement à la face de dépouille. Les projections de $N2$ sont notées ($NL2$) et ($NP2$) respectivement parallèlement et perpendiculairement aux fibres. L'amplitude de $N2$ est influencée par l'angle de dépouille

(α), et prend une valeur faible quand α est positif alors qu'elle s'accroît lorsque α est nul ou négatif.

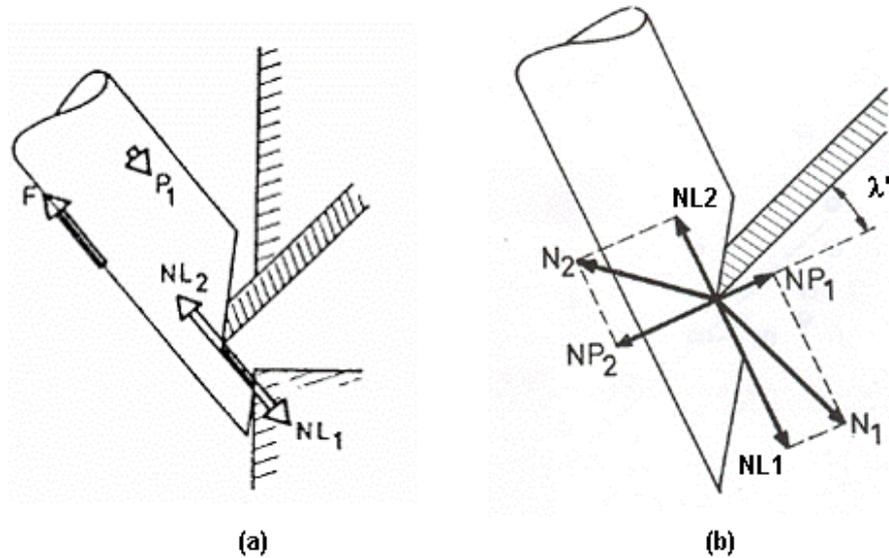


Figure VI-3. Efforts de coupe en déchiquetage par disque [Hartler 1962a]

Dans notre cas, avec un système de déchiquetage à aménagement horizontal mécanique, l'effort de coupe (F_c) a trois composantes F_x , F_y et F_z (Figure VI-4). F_x et F_y sont repérées dans le plan de coupe et leurs valeurs varient avec l'angle de rotation instantané du disque (θ_c), tandis que F_z est perpendiculaire au plan de coupe. Dans notre configuration de coupe, F_y et F_z représente respectivement F_p et F_n (Figure VI-1).

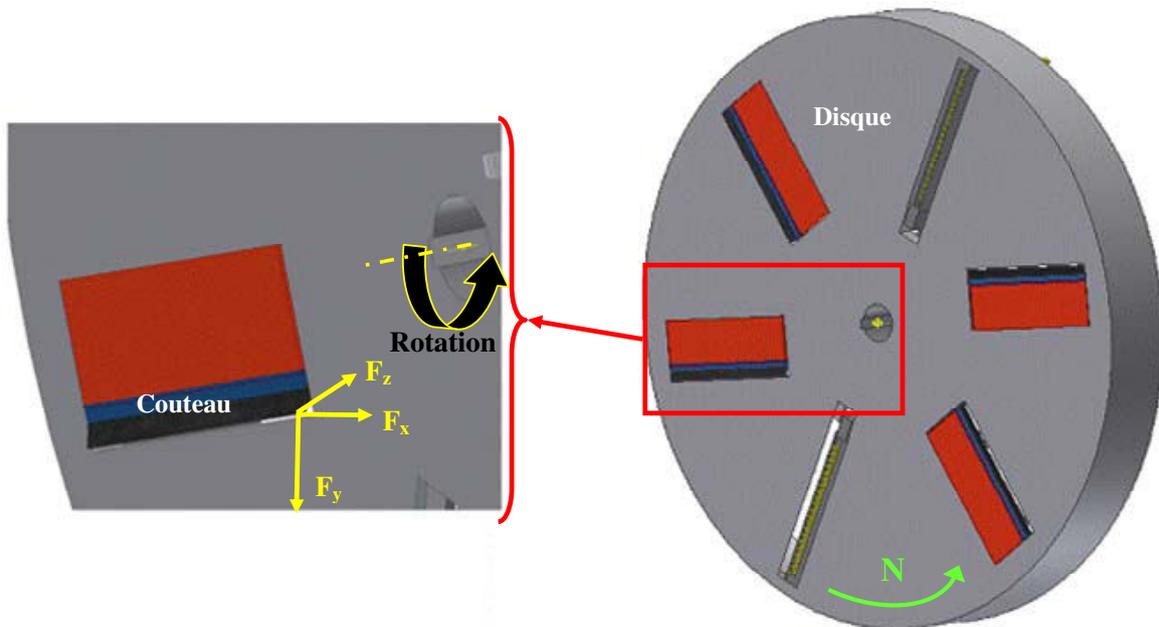


Figure VI-4. Composants de l'effort de coupe sur un couteau de disque

VI.1.3 Évolution des efforts de coupe

Selon [Uhmeier 1995] avec un déchiquetage pour une vitesse de coupe lente (0.08 m/s), la force de coupe augmente quand le couteau pénètre dans le bois jusqu'à l'initiation d'une fracture où cette force diminue. Si la fissure ne se propage pas, la force de coupe croît à nouveau jusqu'à l'apparition d'une nouvelle fissure comme le couteau continue à pénétrer dans le bois. Ces variations de l'effort de coupe continuent jusqu'à la formation d'une plaquette quand une fracture traverse le rondin (Figure VI-5).

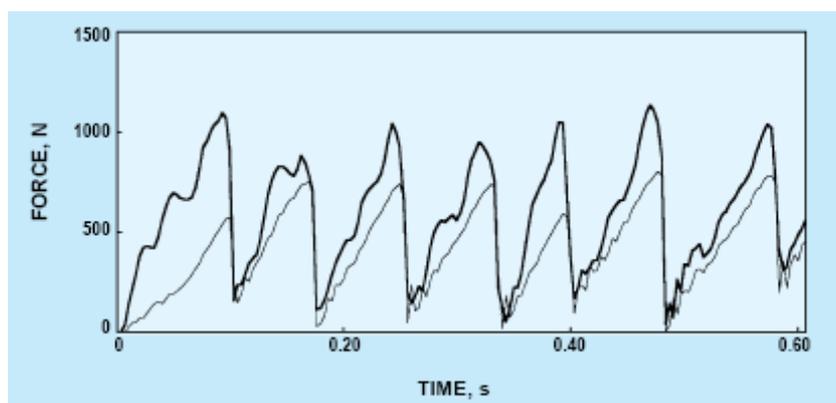


Figure VI-5. Variation des composantes parallèles et perpendiculaires de l'effort de coupe à vitesse de coupe lente [Uhmeier 1995]

Les explications de Uhmeier sont confirmées par Hellström [Hellström 2008a] qui a également étudié le déchiquetage du bois à vitesse de coupe lente (0.001 m/s) et a proposé la courbe présentée dans la Figure VI-6.

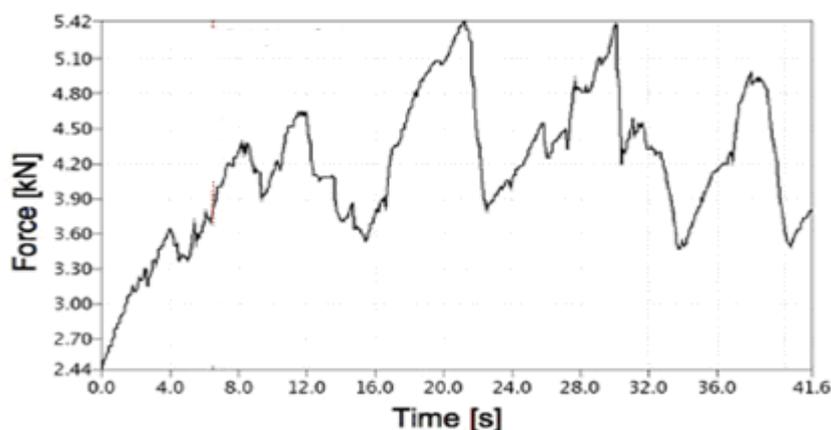


Figure VI-6. Variation de l'effort de coupe en déchiquetage à vitesse de coupe lente [Hellström 2008a]

Pour une vitesse de coupe plus élevée, entre 5 et 20 m/s, Hartler [Hartler 1963a] voit apparaître deux parties très distinctes de la courbe de variation de l'effort : une première partie

nommée « force impulsive » correspondant au choc de frappe du couteau quand il attaque le rondin, et une deuxième partie désignée « force de déchiquetage » correspondant à l'effet de pénétration de l'arête du couteau dans le bois (Figure VI-7).

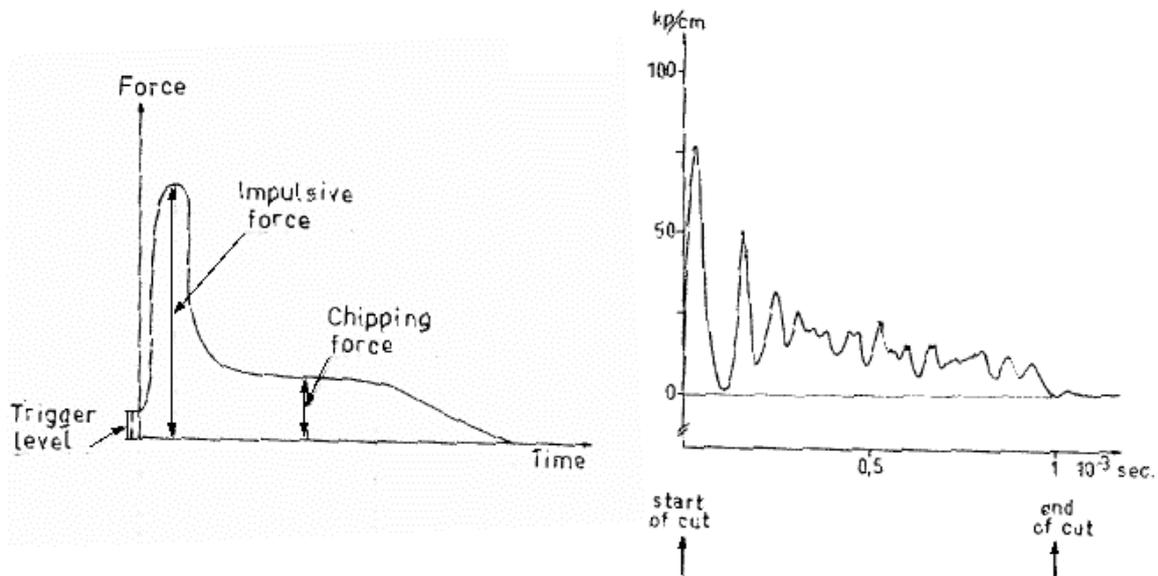


Figure VI-7. Évolution de l'effort de coupe F_y durant le passage d'un couteau [Hartler 1963a]: à gauche schéma explicatif, à droite mesure pour une vitesse de coupe de 20 m/s

VI.1.4 Facteurs influents sur les efforts de coupe

La coupe s'effectue en créant dans la matière des contraintes de compression et de cisaillement, caractérisant l'évolution des copeaux, l'effort et la puissance de coupe. Les facteurs influençant les efforts de coupe ont été rassemblés par Scholz [Scholz 2009], comme présentés sur la Figure VI-8.

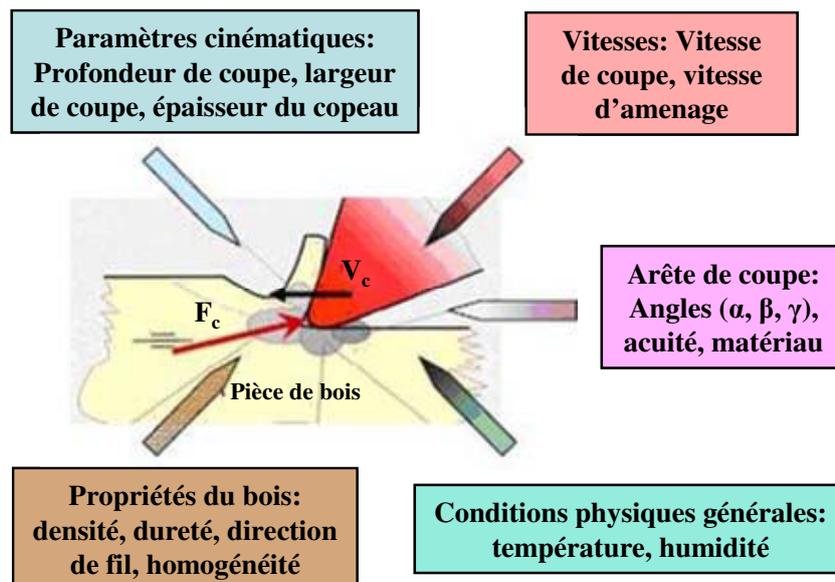


Figure VI-8. Facteur influençant les efforts de coupe [Scholz 2009]

Les facteurs peuvent être regroupés en 3 catégories en fonction de leur lien avec l'outil de travail, les conditions de travail ou le matériau usiné. La majorité de ces facteurs influencent les efforts de coupe en déchiquetage et usinage rectiligne du bois. Ces facteurs ont fait l'objet de nombreuses études en usinage traditionnel du bois (Annexe D). En déchiquetage, peu d'études ont analysé les effets de ces facteurs sur les efforts de coupe. J'ai récapitulé leurs résultats comme nous allons le montrer ici.

VI.1.4.1 Angles de coupe :

Selon Hartler [Hartler 1963a], l'angle de taillant influence uniquement la force impulsive et pas celle de déchiquetage (voir § VI.1.3). En effet, la force impulsive croît avec l'augmentation de (β) et il ajoute que si l'arête est émoussée, l'effort croît sensiblement pour toutes les étapes du processus de coupe.

Selon Uhmeier [Uhmeier 1995] qui a étudié expérimentalement à vitesse lente l'opération de déchiquetage avec des planches d'aubier d'épicéa (*Picea abies*), les deux composantes F_p et F_n des efforts de coupe (Figure VI-9), respectivement parallèle et perpendiculaire au mouvement du couteau croissent avec l'augmentation de l'angle de dépouille (α) et l'angle de chanfrein supplémentaire (β'), mais leurs influences sont sensiblement différentes et ils dépendent des conditions de coupe.

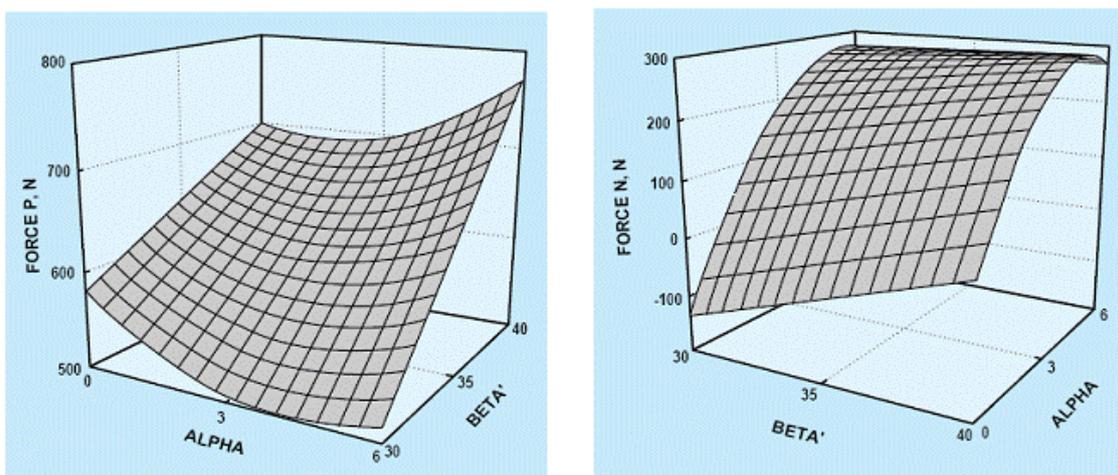


Figure VI-9. Variation des composantes parallèles et normales des efforts de coupe en fonction de l'angle de dépouille et celui de chanfrein supplémentaire pour une vitesse de coupe lente (0.08 m/s) [Uhmeier 1995]

Zhengping [Zhengping 2002], qui a étudié le déchiquetage à vitesse de coupe rapide (720 tr/min), a montré que l'augmentation de (ε) entraîne un accroissement de l'effort de coupe

exercé par unité de longueur du couteau, et par conséquent que la diminution de l'angle de coupe réel (γ_r) augmentera les efforts de coupe puisque augmenter (ε) mène à diminuer (γ_r).

VI.1.4.2 Longueur des plaquettes

Uhmeier [Uhmeier 1995] a étudié l'influence de la longueur des plaquettes sur l'effort de coupe à vitesse lente. Son étude a révélé qu'avec une longueur de plaquette plus importante, l'effort de coupe augmente (Figure VI-10), mais l'énergie demandée pour déchiqueter un volume constant de bois va diminuer. Zhengping [Zhengping 2002] qui a étudié expérimentalement le déchiquetage à grande vitesse, a confirmé les résultats de Uhmeier, alors que Hellström [Hellström 2008b], qui a étudié le déchiquetage à vitesse de coupe lente et sur la même essence de bois que Uhmeier a utilisé (*Picea abies*), n'a trouvée aucun effet de cette longueur sur les efforts.

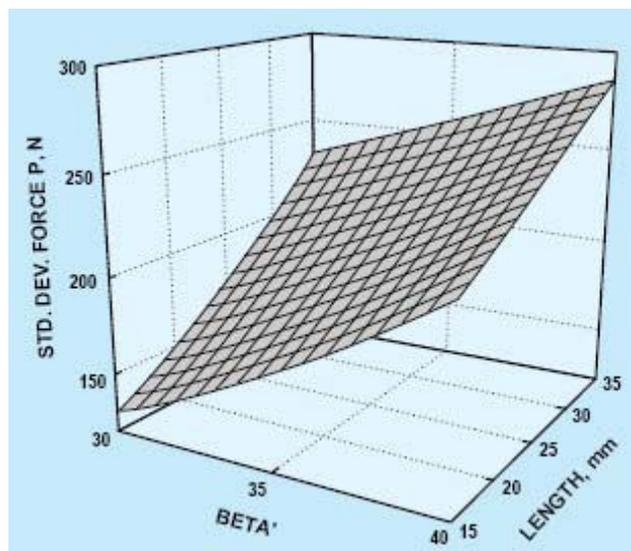


Figure VI-10. Écart-type du component parallèle de l'effort de coupe en fonction de l'angle de chanfrein supplémentaire β' et la longueur des plaquettes [Uhmeier 1995]

VI.1.4.3 Vitesse de coupe :

Hartler [Hartler 1963a] est le seul qui a analysé l'effet de la vitesse de coupe sur l'effort. Il a trouvé que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à augmenter la force impulsive et celle de déchiquetage. Selon lui cela est dû à la propriété viscoélastique du bois.

VI.1.4.4 Humidité et température du bois :

Hartler [Hartler 1963a] a démontré en variant l'humidité entre 40% et 10% que la diminution du taux d'humidité conduit à augmenter l'effort, il a expliqué cela à l'augmentation de la

résistance au cisaillement du bois avec la diminution de l'humidité. En même temps il n'a pas trouvé une influence de la température sur les efforts de coupe dans la plage de 5 à 50°C avec un taux d'humidité entre 40 et 10%.

VI.1.4.5 Frottement :

En utilisant la méthode des éléments finis, Uhmeier [Uhmeier 1997] et Hellström [Hellström 2009] ont pris en compte dans leurs études sur opération de déchiquetage le frottement entre la face d'attaque du couteau et les plaquettes glissant sur celle-là. Dans leurs modèles, on voit clairement l'importance du frottement sur le processus de déchiquetage en ce qui concerne la formation des plaquettes et les efforts de coupe, le coefficient de frottement (μ) augmente avec l'augmentation de l'angle de taillant (β) d'après eux. Tout les deux conseillent de diminuer le frottement afin d'éviter les mauvais résultats engendrés par ce dernier.

VI.2 Puissance de coupe et la consommation d'énergie

VI.2.1 Méthodes utilisées pour l'estimation de la puissance

La déchiqueteuse est la machine dominante dans la chaîne de production des plaquettes forestières, puisqu'elle possède le taux de production le plus important avec un coût horaire le plus élevé par rapport aux autres machines dans la chaîne (abatteuse, ébrancheuse, débardeuse, camions...), d'où l'importance de mesurer et maîtriser sa consommation d'énergie.

Peu d'études ont été menées afin de trouver un moyen d'estimer la puissance utilisée en déchiquetage. Rogers [Rogers 1948] estime que l'énergie demandée est en grande partie consommée par le cisaillement parallèle aux fibres. Il propose une méthode analytique pour calculer la puissance demandée en déchiquetage en se basant d'abord sur la relation entre la pression exercée par le couteau et la valeur de cisaillement, et également sur les valeurs de contrainte de cisaillement pour des différentes essences, ces dernières sont mesurées sur un appareil de test mécanique avec une vitesse de coupe lente (1 m/s en maximum). Son calcul prend en compte plusieurs paramètres, qui sont : le diamètre du disque, la vitesse de rotation, le nombre des couteaux, la longueur des plaquettes, les essences et le taux d'humidité. Rogers calcule la puissance demandée en multipliant le taux de production (m^3/sec) par l'énergie spécifique de coupe ($\text{hp}\cdot\text{sec} / \text{m}^3$). Selon le calcul de Rogers, l'énergie spécifique de coupe est approximativement de 8 $\text{hp}\cdot\text{sec}/\text{m}^3$ pour les résineux et de 11 $\text{hp}\cdot\text{sec}/\text{m}^3$ pour les feuillus.

Stokes [Stokes 1978] a établi deux équations et deux abaques pour estimer la puissance du moteur demandé pour les grandes et les petites déchiqueteuses en fonction du nombre de rondins à déchiqeter simultanément et de leur diamètre. Stokes a estimé la puissance du moteur à partir de la pression du carburant et de la vitesse de rotation du moteur de deux déchiqueteuses d'une seule et même marque, ce qui ne permet pas de généraliser sa méthode.

Papworth [Papworth 1966] estime la puissance de coupe en mesurant le moment de torsion directement sur l'arbre du disque puis en le multipliant par la vitesse de rotation. Dans une autre étude [Papworth 1968], il mesure l'énergie électrique consommée par le moteur en utilisant un wattmètre. Ensuite, il divise la valeur mesurée sur le volume du bois coupé afin d'avoir l'énergie spécifique de coupe.

VI.2.2 Facteurs influents sur la puissance et l'énergie spécifique de coupe

Afin de diminuer la consommation d'énergie en déchiquetage du bois, plusieurs chercheurs ont essayé d'analyser l'effet des différents paramètres sur la puissance de coupe et la consommation d'énergie. Selon ces différentes études, la puissance de coupe demandée augmente avec l'accroissement de la densité du bois, du diamètre des rondins, du nombre de couteaux montés sur le disque et leurs usures [Rogers 1948; Papworth 1966; Stokes 1978]. Selon les mêmes chercheurs, la puissance demandée diminue avec l'augmentation du taux d'humidité, de la longueur des plaquettes et également avec la diminution de l'angle de taillant. L'effet de déchiqeter un bois gelé donne une augmentation de l'énergie spécifique de coupe de 8 à 10% [Kivimaa and Murto 1949; Mckenzie 1970]. Cependant, il n'y a pas de variations significatives liées à la variation de l'angle d'inclinaison verticale (ϵ), alors que diminuer l'angle d'inclinaison latérale (ρ) mène à diminuer l'énergie spécifique de coupe [Kivimaa and Murto 1949; Papworth 1968]

VI.3 Synthèse de l'état de l'art sur les facteurs influençant l'effort et la puissance de coupe en déchiquetage

En usinage rectiligne, des facteurs comme l'angle de taillant ou la vitesse de coupe, n'ont pas d'influence sur l'effort. En déchiquetage, ces facteurs influencent cet effort. Ce qui nous conforte dans l'hypothèse d'un processus de coupe en déchiquetage différent de celui en usinage rectiligne du bois. En comparant les effets des facteurs étudiés, on trouve une

convergence de ses effets sur les efforts et la puissance de coupe. En principe, les facteurs augmentant les efforts de coupe sont supposés influencer la puissance de même façon, étant donné la relation entre l'effort et la puissance.

Certains chercheurs ont étudié les effets des facteurs sur la puissance de coupe, tandis que d'autres ont analysé l'énergie spécifique de coupe. La puissance de coupe sert à dimensionner le moteur et l'énergie spécifique de coupe donne la valeur de l'énergie demandée pour couper un certain volume de bois. Le fait d'augmenter la vitesse de coupe et la longueur des plaquettes conduit à augmenter les efforts de coupe mais pas l'énergie spécifique. Malheureusement, il n'y a pas assez d'études sur ce sujet afin de pouvoir mettre en évidence les effets des différents paramètres sur les efforts, la puissance et l'énergie spécifique de coupe en même temps, d'où la nécessité d'approfondir l'analyse sur les facteurs influents pour mieux comprendre et maîtriser ce processus de coupe du bois.

VI.4 Mesure de l'effort de coupe

La connaissance des efforts de coupe permet d'optimiser les paramètres de coupe, d'étudier la formation des plaquettes, de suivre l'usure des couteaux et enfin de contrôler de manière continue la qualité de l'opération de déchiquetage, d'où l'importance de mesurer ces efforts de coupe.

VI.4.1 Méthodes existantes pour la mesure des efforts :

L'analyse des méthodes de mesure des efforts de coupe en usinage du bois ou du métal est nécessaire pour mettre en avant les spécificités de chaque méthode. Leurs avantages et limites nous permettent de choisir une méthode appropriée pour notre système de coupe donnant une meilleure précision de mesure. Les deux problèmes spécifiques posés par la mesure des efforts en déchiquetage proviennent de la rotation du disque et de la coupe discontinue caractéristique de cette opération. En effet, la rotation du disque rend son instrumentation difficile car la force centrifuge risque d'éjecter les capteurs et un système de transmission entre le capteur et le système d'acquisition doit être embarqué. La discontinuité de la coupe nécessite l'utilisation des harmoniques de la raie à la fréquence de passage du couteau pour décrire convenablement les efforts de coupe. Ainsi, des capteurs possédant une bande passante très élevée, c'est-à-dire très supérieure à la fréquence de passage de la dent, doivent être utilisés.

Les méthodes de mesure utilisées peuvent être divisées en deux catégories : la première correspond aux méthodes de mesure indirecte et la deuxième correspond aux méthodes de mesure directe des efforts de coupe. Pour évaluer la performance des différents méthodes, on choisit la précision de leurs réponses aux sollicitations dynamiques comme facteur d'évaluation ainsi que leur étendu de mesure. En effet, si la fréquence des vibrations dynamiques de l'ensemble outil de coupe/pièce/capteur/ machine dépasse la bande passante du système de mesure, il y aura des erreurs importantes dans l'interprétation des efforts.

VI.4.1.1 Méthodes de mesure indirecte des efforts :

Ces méthodes de mesure cherchent à ne pas introduire des capteurs susceptibles de modifier le comportement dynamique de l'ensemble outils/pièce/machine.

Les travaux d'Altintas [Altintas 1992] peuvent être classés dans cette catégorie. En effet, il a utilisé le courant consommé par le moteur d'avance à courant continu d'un axe d'une fraiseuse pour effectuer une surveillance continue des efforts de coupe. Le courant du moteur d'avance est proportionnel au couple du moteur, qui doit compenser l'énergie consommée par la mise en rotation du rotor de la broche et doit vaincre les efforts de frottement et de coupe. La méthode d'Altintas est fiable pour des fréquences de passage de la dent (ou du couteau) comprises entre 0 et 20 Hz, qui est la bande passante du capteur de courant.

Kim [Kim 1996; Kim 1999] a appliqué la méthode développée par Altintas aux moteurs à courant alternatif synchrone à aimants permanents. Il a prouvé que cette méthode de mesure indirecte est fiable pour des fréquences de passage de la dent comprises entre 0 et 62 Hz.

Sur un centre d'usinage, Jeong [Jeong 2002] a utilisé le courant du moteur de l'axe d'avance à l'arrêt pour déterminer l'effort de coupe selon l'axe perpendiculaire à la direction d'avance. En plus, il a choisi un capteur de courant de bande passante plus élevée qui atteint 130 Hz.

En se basant sur la mesure des tensions de commande des paliers magnétiques actifs de la broche d'une fraise, Auchet [Auchet 2004a] a réussi à estimer les efforts de coupe à grande vitesse. Avec cette méthode de mesure, il a atteint une fréquence de mesure de 4 KHz. La limite de cette méthode est l'implantation des paliers actifs dans la broche, où le balourd de la broche est un facteur perturbant sur les tensions de commande.

Les travaux d'Albrechta [Albrechta 2005] sur la mesure de effort de une façon indirecte, lui ont permis d'atteindre une fréquence de mesure de 1 KHz. Albrechta a utilisé la méthode de la fonction de réponse en fréquence (FRF) pour lier aux efforts de coupe en bout d'outil le déplacement du flasque de la broche. Les efforts ont été mesurés par une platine dynamométrique et le déplacement par un capteur de déplacement capacitif.

La dernière méthode de mesure indirecte est l'instrumentation d'outils de coupe. Chung et Spiwak [Chung 1994; Spiwak 1995] ont proposé un outil de fraisage instrumenté (Figure VI-11) à l'aide d'un accéléromètre à trois composantes qui est utilisé comme capteur des efforts de coupe. Les signaux mesurés sont traités par deux filtres afin d'obtenir les flexions de la broche qui sont proportionnelles aux efforts de coupe. Ce système de mesure a montré une bonne performance de mesure (jusqu'à 3000 Hz), mais il ne permet pas de mesurer les forces statiques ou quasistatiques.

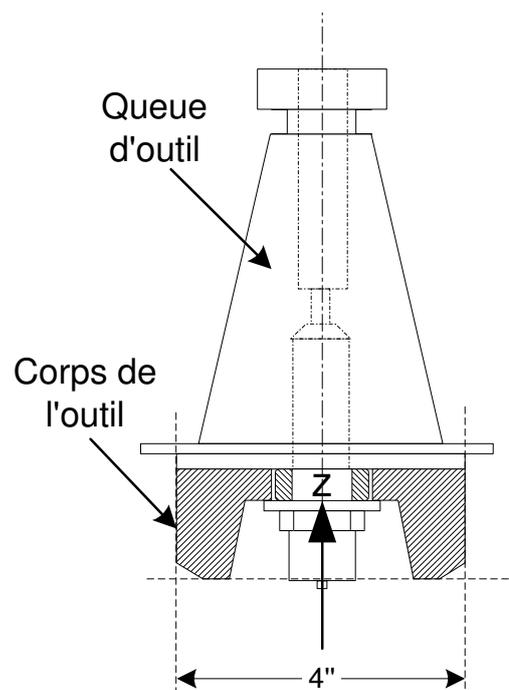


Figure VI-11. Schéma de l'outil de coupe instrumenté

VI.4.1.2 Méthodes de mesure directe des efforts :

Le principe de cette deuxième catégorie de méthodes de mesure est l'introduction d'un dynamomètre indépendant du système d'usinage afin de mesurer les efforts de coupe. Ces capteurs sont basés sur la technique des jauges de déformation ou des capteurs piézoélectriques.

Korkut [Korkut 2003] a développé un dynamomètre basé sur des jauges de déformation capables de mesurer les trois composantes d'effort en cours d'usinage par l'intermédiaire de 16 jauges. Le dynamomètre de Korkut est composé de quatre anneaux octogonaux (Figure VI-12). Les jauges sont collées sur chaque anneau et connectées à des ponts extensométriques. Les facteurs sensibilité, rigidité, précision et facilité de calibration ont été pris en compte lors de la conception. Les anneaux sont vissés entre deux plaques formant la partie inférieure et supérieure du capteur. Ce dynamomètre peut mesurer les forces jusqu'à une valeur maximale de 4500 N, mais sa bande passante s'étend uniquement jusqu'à 192.2 Hz, ce qui est très faible pour être utilisable pour les mesures dynamique d'usinage. L'intégration de capteurs piézo-électriques dans la conception de platines dynamométriques, qui est le deuxième type de dynamomètre, permet d'obtenir un moyen de mesure des efforts dont la bande passante est beaucoup plus élevée (jusqu'à 3 KHz).

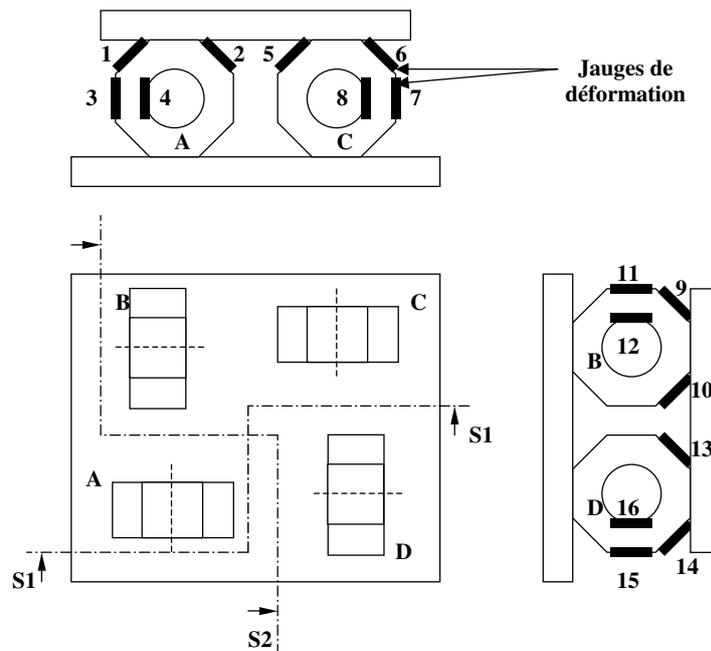


Figure VI-12. Implantation des anneaux octogonaux [Korkut 2003]

Un capteur de force piézoélectrique est composé de deux paires de quartz sensibles au cisaillement pour la mesure des efforts radiaux F_x et F_y et une paire de quartz sensible à la pression pour mesurer des efforts axiaux F_z . Leur empilement est présenté sur la Figure VI-13-a. Les trois paires de quartz sont intégrées dans un boîtier qui forme le capteur piézoélectrique à trois composantes d'effort (Figure VI-13-b).

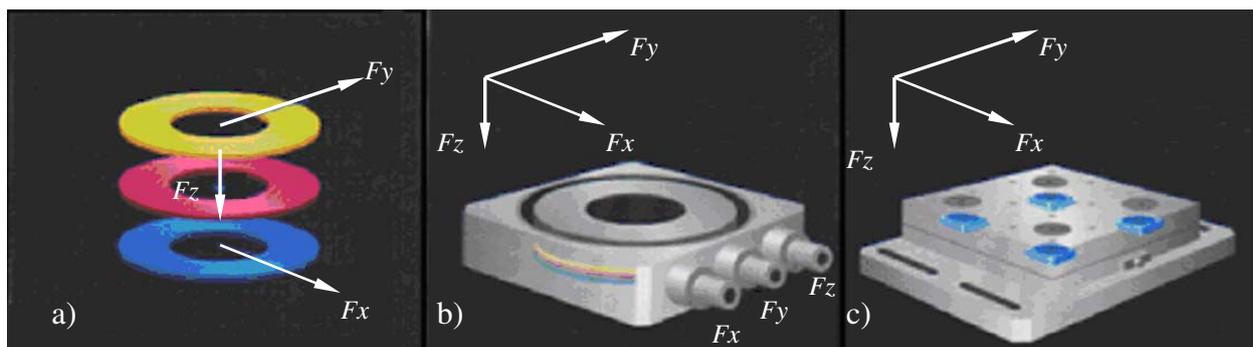


Figure VI-13. Dynamomètre Kistler 9225B, a) trois paires de quartz, b) capteur piézoélectrique à trois composantes, c) implantation des capteurs

Le dynamomètre de Kistler 9225B (Figure VI-13-b) se compose de quatre capteurs de forces à trois composantes montés sous précontraintes élevées entre une plaque de base et une plaque de recouvrement. Les signaux recueillis au niveau des quatre capteurs sont des charges électriques qui sont ensuite transformées en tensions au moyen d'un amplificateur de charge. Ce dynamomètre est un système très rigide qui possède une fréquence propre élevée d'environ 3 kHz si la platine est isolée. Cependant, cette fréquence propre diminue lors du montage de la platine sur la table de la machine outil ainsi que lors du montage de la pièce sur la platine, pour se situer aux environs de 1,9 kHz, limitant la bande passante de ce capteur à environ 600 Hz.

VI.4.2 Méthode pour mesurer l'effort de coupe sur le banc d'essais

Après l'analyse de différentes méthodes existantes, la méthode choisie repose sur la mesure indirecte en instrumentant le contre-couteau au plus proche du phénomène d'usinage. Cette méthode permet de ne pas modifier le comportement dynamique de notre structure, d'obtenir une bande passante de mesure très élevée de l'ordre de 3 kHz et des valeurs d'effort très importantes.

VI.4.2.1 Optimisation de l'épaisseur du contre-couteau :

Le principe de notre méthode est basé sur un contre-couteau déformable sous les chocs dynamiques encaissés par ce dernier durant le processus de coupe (Figure VI-14).

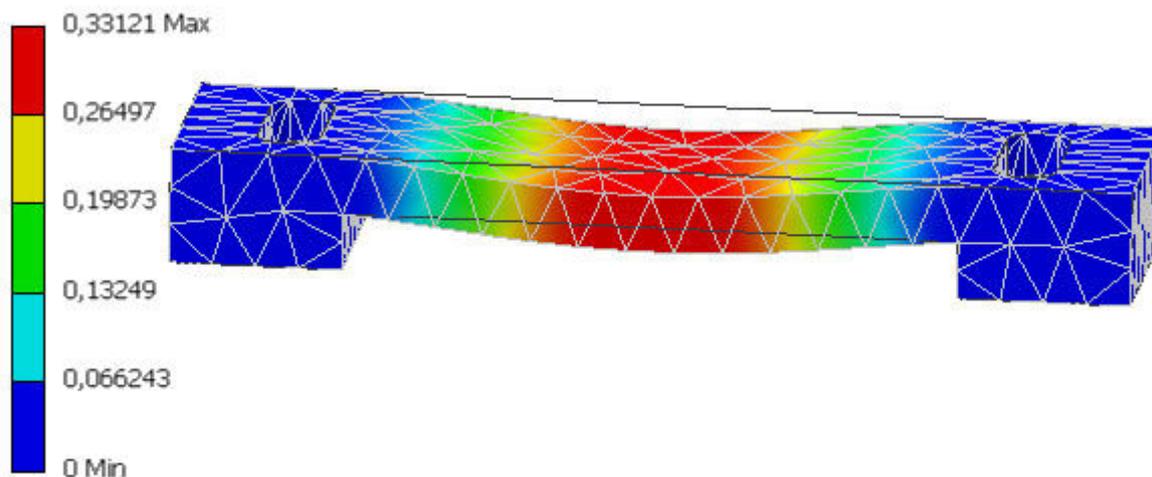


Figure VI-14. Contre couteau déformé sous l'effet de l'effort de coupe
(unité de déformation : mm, échelle : 0.5/1)

Deux extensomètres de surface (KISTLER – 9232A) ont été placés au milieu de la face inférieure du contre – couteau (Figure VI-15). Ces extensomètres sont basés sur le principe piézo-électrique et ont une haute sensibilité (- 300 ... 300 $\mu\epsilon$). Avec ces extensomètres, il est possible de mesurer les forces dynamiques s'exerçant sur la surface supérieure du contre couteau, en envoyant des charges électriques correspondant aux déformations, qui sont bien évidemment proportionnelles aux efforts exercés. La haute sensibilité ainsi que la conception à accélération compensée du capteur permettent une surveillance précise du processus de coupe.



Figure VI-15. Fixation des extensomètres sur le contre couteau

Afin d'avoir des mesures exploitables en dynamique, il est impératif que les vibrations du contre-couteau, qui sont engendrées lors de passage d'un couteau, s'annulent avant le passage du couteau suivant pour que ces vibrations ne faussent pas les mesures en se cumulant lors des coupes successives exercées par les couteaux. D'un autre côté, il ne faut pas que le contre-couteau soit trop rigide car dans ce cas la déformation du contre-couteau ne sera pas assez

importante pour être bien visualisée, d'où l'importance de bien choisir l'épaisseur du contre-couteau pour trouver un compromis entre ces deux phénomènes.

L'amortissement est un facteur important à prendre en compte, parce qu'il détermine la durée des vibrations et leurs amplitudes. Plus le contre-couteau est amorti, plus les vibrations consécutives à un coup décroîtront rapidement. En sachant que le contre-couteau est en acier commercial (S235JR), nous avons fait deux études statistiques sur la déformation du contre-couteau sous l'effet des efforts perpendiculaires. Ces études expérimentales et théoriques ont permis d'estimer que l'épaisseur de 22 mm est une dimension appropriée pour la partie déformable du contre-couteau (Figure VI-16).

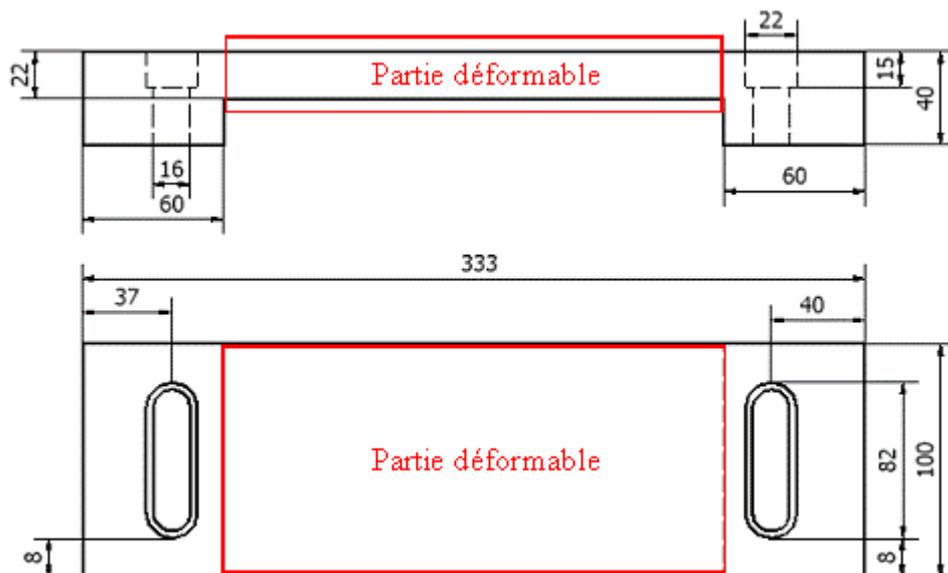


Figure VI-16. Dimension du contre-couteau

Nous avons choisi d'écrire l'amortissement du contre-couteau au moyen des coefficients de Rayleigh (α' et β')¹ qui peuvent être identifiés expérimentalement. La matrice d'amortissement $[D]$ est décrite comme une combinaison linéaire des matrices de masse $[M]$ et de rigidité $[K]$:

$$\text{équation VI-2,} \quad [D] = \alpha' [M] + \beta' [K]$$

¹ Les symboles de coefficients de Rayleigh sont α et β , mais pour ne les confondre pas avec les angles de coupe nous les avons différenciés par une prime.

Les coefficients α' et β' sont calculés à partir de l'amortissement modal ξ_i de chaque mode i . Chaque ξ_i peut être obtenu pour un i donné en divisant la bande passante Δf_i à $-3dB$ de la courbe de raideur par la fréquence f_i du mode considéré (Figure VI-17).

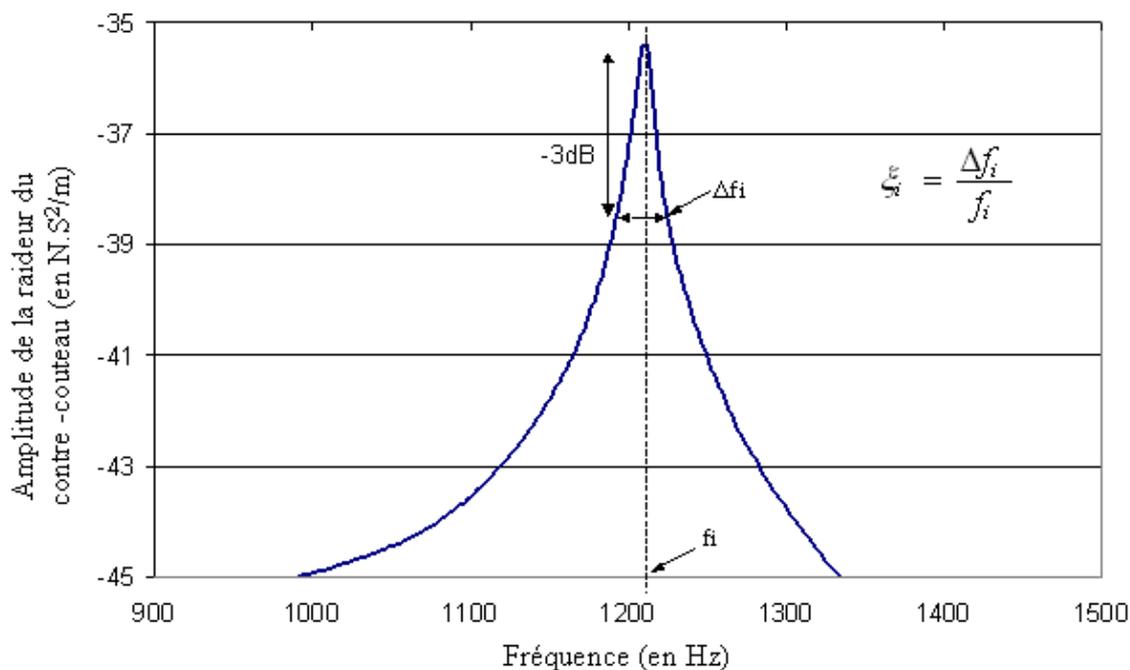


Figure VI-17. Calcul des facteurs d'amortissement modaux ξ_i

Les facteurs d'amortissement modaux ξ_i sont reliés aux coefficients de Rayleigh par l'équation VI-3 :

$$\text{équation VI-3,} \quad \xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha'}{2\pi f_i} + \beta' \times (2\pi f_i) \right)$$

Il est ainsi possible de déterminer α' et β' à partir d'un couple de facteurs d'amortissement modaux et de vérifier que les coefficients α' et β' calculés sont proches de ceux obtenus avec les autres couples de facteurs d'amortissement modaux [Christian 1999; Chowdhury 2009].

Pour effectuer cette détermination expérimentale des coefficients d'amortissement, le dispositif expérimental représenté dans la Figure VI-18 est utilisé.

Les trois accéléromètres et le marteau d'impact sont les moyens utilisés pour obtenir la fonction de réponse en fréquence (FRF) en trois points, le capteur d'effort situé à l'extrémité du marteau mesurant l'effort appliqué sur le contre-couteau lors de l'impact.

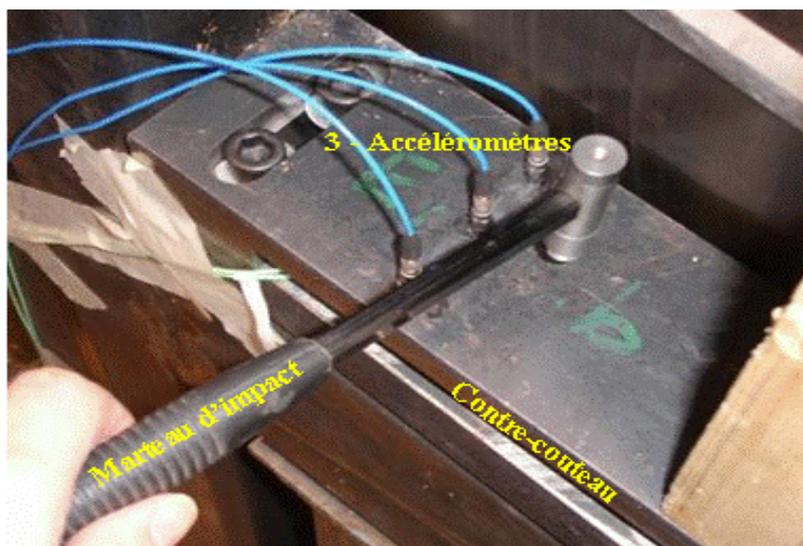


Figure VI-18. Dispositif expérimental destiné à estimer le facteur d'amortissement

L'application de la méthode de détermination des coefficients de Rayleigh sur les trois courbes de *FRF*, obtenues en trois points d'impact sur le contre-couteau, nous a donné les valeurs moyennes $\alpha' = 400$ et $\beta' = 5 \times 10^{-7}$.

Les résultats de l'optimisation de l'épaisseur du contre couteau est visible sur la Figure VI-19 où les vibrations du contre-couteau s'annule avant le passage d'un couteau suivant.

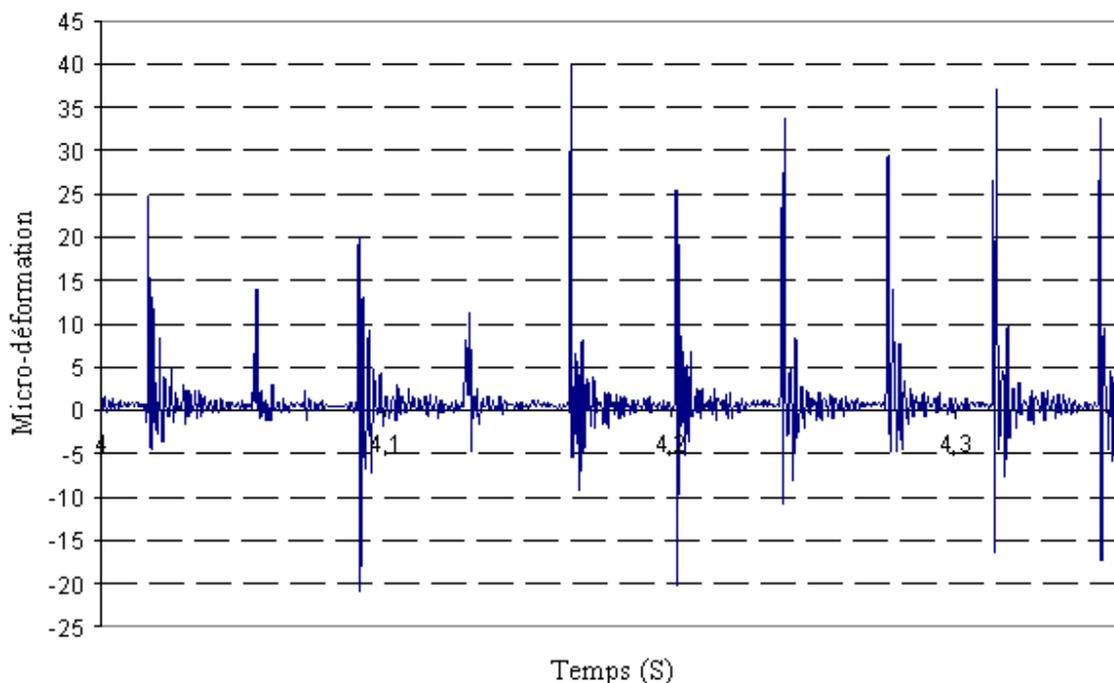


Figure VI-19. Déformation et vibration du contre-couteau sous l'effet des chocs exercés par les couteaux

VI.5 Mesure de consommation d'énergie électrique

Le contrôleur de puissance "WattPilote" est implanté sur notre banc d'essai afin de mesurer la variation de la consommation d'énergie électrique par le moteur de l'unité de déchiquetage jusqu'à une puissance maximale de 64 kw. Ce système mesure la puissance active du moteur, c'est-à-dire la puissance utile sur l'axe du moteur (en négligeant le frottement des roulements et la perte due aux échauffements). Il est implanté en série dans le circuit d'alimentation du moteur entre le convertisseur de fréquence et la broche du moteur (Figure VI-20).

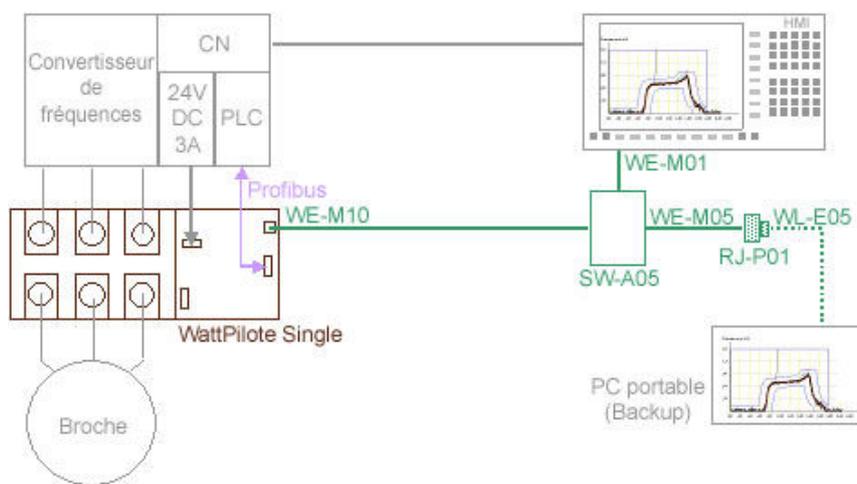


Figure VI-20. Système "WattPilote" – schéma de câblage

Le "WattPilote" est équipé d'une sortie analogique qui nous permet de choisir la fréquence d'échantillonnage et la durée d'acquisition en étant synchronisé avec nos autres moyens de mesure, notamment d'effort de coupe.

VI.6 Étalonnage dynamique et traitement des signaux

VI.6.1 Méthodologie de mesure des efforts de coupe

Le contre couteau présenté dans le paragraphe VI.4 permet de mesurer l'effort de coupe vertical grâce aux deux extensomètres de surface placé sous celui-ci. Durant le processus de déchiquetage, les extensomètres mesure la déformation longitudinale de la face du contre couteau suite aux impacts des couteaux lors de la coupe. L'effort de coupe F_y en N est obtenu à partir de ces deux signaux de microdéformations notés S_1 et S_2 . Deux fonctions de réponse en fréquence (*FRF*) complexes permettent de faire le lien entre les mesures de déformations du contre couteau et l'effort de coupe F_y à l'origine de ces déformations. Cette méthode d'étalonnage dynamique a été utilisée par plusieurs chercheurs pour corriger les mesures

d'efforts dynamiques parce qu'elle permet d'identifier leurs composantes dans le domaine fréquentiel [Tounsi 2000; Castro 2006].

VI.6.1.1 Nature des signaux mesurés par les extensomètres :

Un exemple de signaux représentatifs des microdéformations S_1 et S_2 est présenté sur la Figure VI-21.

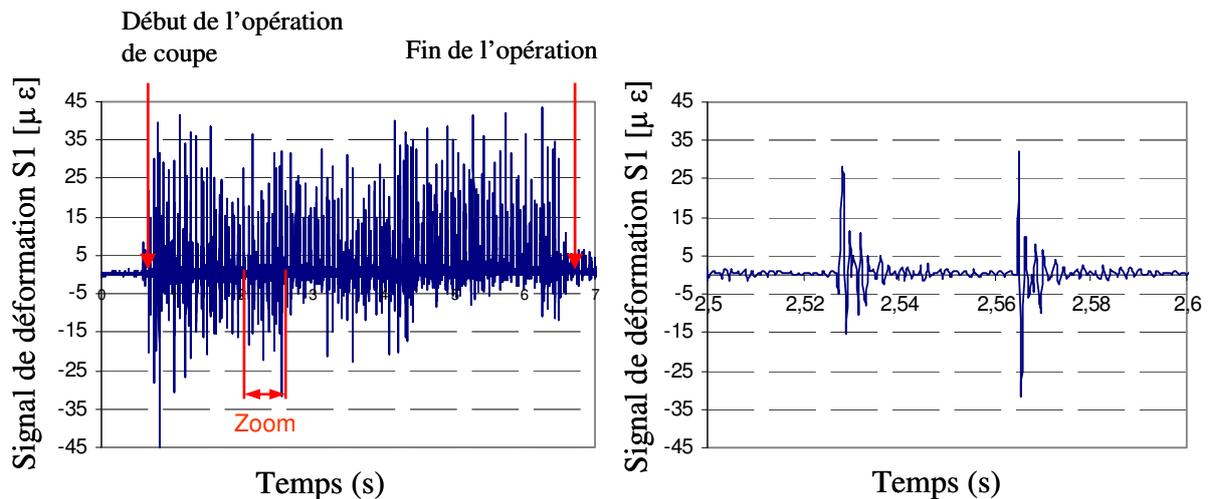


Figure VI-21. Évolution des signaux représentant les microdéformations au cours de l'opération de déchiquetage (épicéa, $f_z=8$ mm, $\omega=800$ tr/min, $D_{moy}=85$)

S_1 et S_2 sont mesurées dans le domaine temporel, c'est pourquoi il est nécessaire de passer dans le domaine fréquentiel afin de pouvoir les exploiter. Les signaux étant continus, il est nécessaire d'appliquer un fenêtrage de type Hanning à chaque échantillon avant d'appliquer la transformée de Fourier Discrète (*TFD*) afin d'éviter les problèmes de fuite d'énergie. $S_1(j\omega)$ et $S_2(j\omega)$ sont les spectres fréquentiels obtenus, où ω représente la fréquence. La Figure VI-22 présente les différents traitements subis par les signaux.

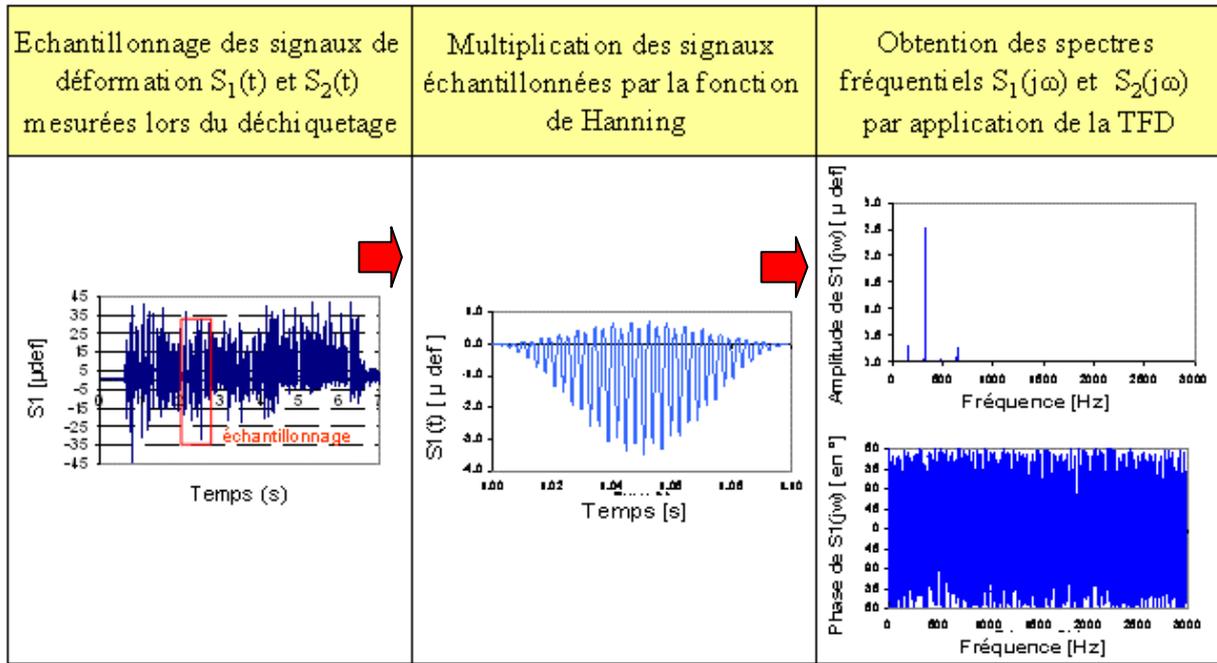


Figure VI-22. Démarche d'obtention des spectres fréquentiels de chaque échantillon de déformation S_1 et S_2

VI.6.1.2 Fonctions de réponse en fréquence déformation du c-couteau/ effort de coupe :

Les fonctions de réponse en fréquence de la déformation du contre-couteau soumis à un effort de coupe sont obtenues en mesurant simultanément l'amplitude d'un impact appliqué perpendiculairement à la surface du contre-couteau selon la direction Y et les deux réponses $S_1(t)$ et $S_2(t)$. L'effort et les déformations sont mesurés dans le domaine temporel, puis transportés dans le domaine fréquentiel en utilisant la **TFD**. Les deux fonctions de réponse en fréquence complexe que nous obtenons pour chaque point de frappe sont définies par :

$$\text{équation VI-4,} \quad H_{ij}(j\omega) = \frac{S_i(j\omega)}{E_j(j\omega)}$$

Où $i = 1, 2$ désigne une de deux déformations du contre-couteau mesurées lors de la coupe du bois et $j = 1, 2$ et 3 représente un des trois points de frappe (Figure VI-23).

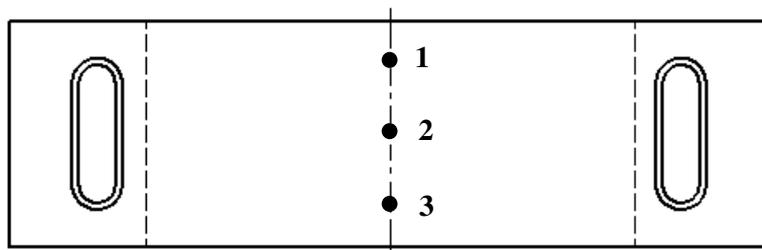


Figure VI-23. Trois points de frappe sur la face supérieure du contre-couteau

Les fonctions $H_{11}(j\omega)$ et $H_{21}(j\omega)$ sont obtenues simultanément en mesurant les variations des déformations (S_1 et S_2 en microdéformation) dues aux impacts appliqués selon l'axe Y au point 1 du contre couteau par un marteau d'impact (Figure VI-18). E_1 représente l'évolution de l'effort appliqué sur le contre-couteau par le marteau au point 1 selon la direction Y. les fonction de réponse en fréquences ($H_{12}(j\omega)$, $H_{22}(j\omega)$) et ($H_{13}(j\omega)$, $H_{23}(j\omega)$), qui sont utilisées pour déterminer E_2 et E_3 (efforts selon l'axe Y en points 2 et 3 respectivement), sont calculées expérimentalement par la même procédure utilisée pour déterminer E_1 .

La Figure VI-24 représente les différentes étapes permettant d'obtenir une des six fonctions de réponse en fréquence de la déformation du contre-couteau / effort de coupe lors d'un impact appliqué sur le contre-couteau.

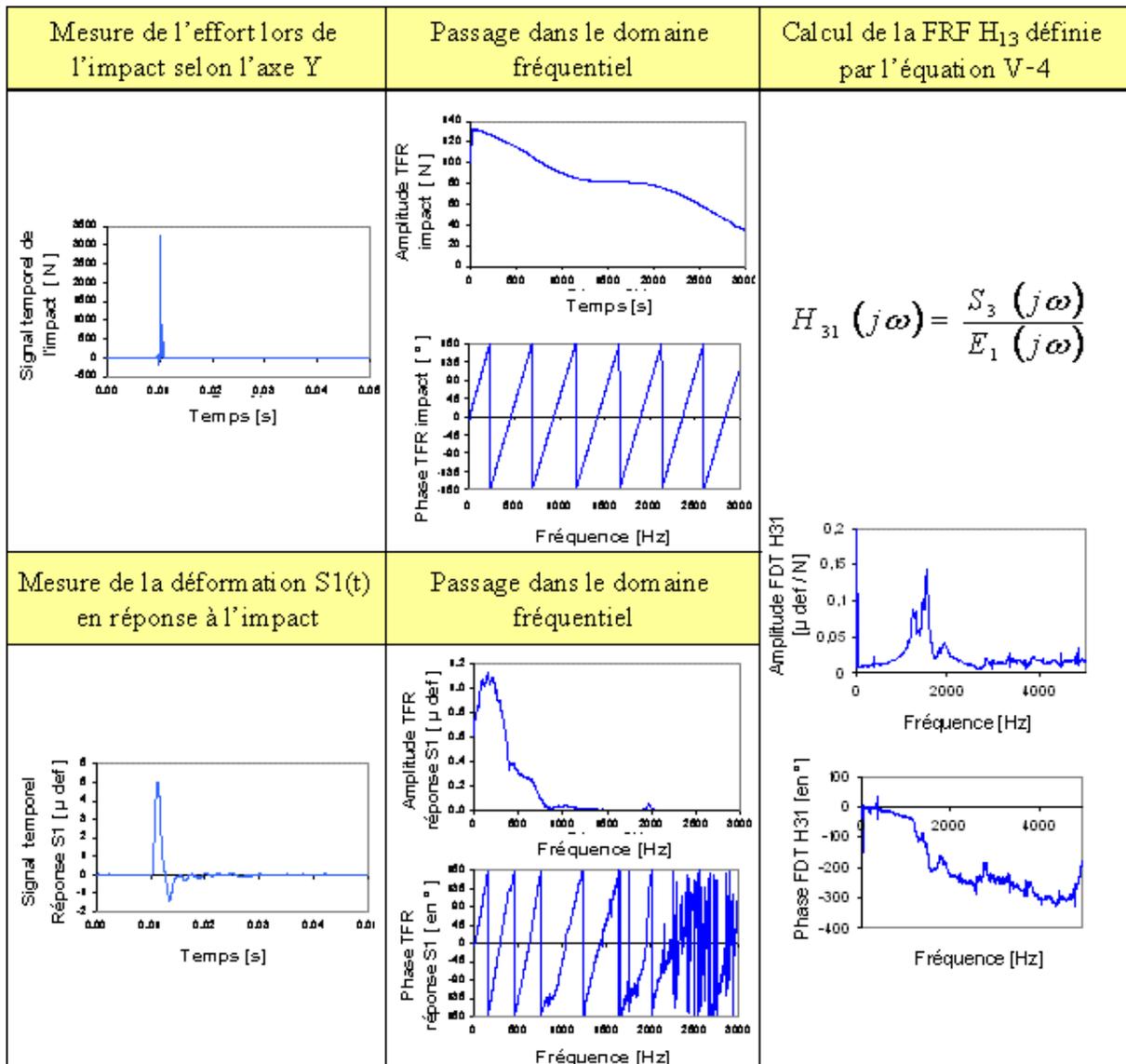


Figure VI-24. Démarche d'obtention d'une fonction de réponse en fréquence déformation du contre-couteau / effort de coupe H_{31}

VI.6.1.3 Méthodes de calcul de l'effort de coupe (Fy) :

Dans ce paragraphe, nous présentons les méthodes de calcul de l'effort de coupe (Fy). Comme mentionné précédemment, les fonctions de réponse en fréquences complexes relient les déformations mesurées par les extensomètres aux efforts exercés par les couteaux :

$$\text{équation VI-5,} \quad \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \end{bmatrix} (E_1)$$

$$\text{équation VI-6,} \quad \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} \\ H_{22} \end{bmatrix} (E_2)$$

et

$$\text{équation VI-7,} \quad \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{13} \\ H_{23} \end{bmatrix} (E_3)$$

Nos systèmes d'équations (équation VI-5, équation VI-6, équation VI-7) se résolvent en multipliant à gauche chaque membre du système d'équation par la transposée de la matrice rectangulaire des fonctions de réponse en fréquence. Cependant, comme chaque terme des matrices est une fonction complexe, il convient d'utiliser la transposée hermitienne de la matrice rectangulaire à la place de la transposée courante. La transposée hermitienne consiste à remplacer chaque terme de la matrice de fonctions complexes par son terme conjugué, avant d'opérer la transposée de la nouvelle matrice. Ainsi, la transposée $[H]^H$ de la matrice de fonction complexe $[H]$ s'écrit $[H]^H = [\bar{H}]^T$ où le terme conjugué de la fonction complexe H_{ij} est noté \bar{H}_{ij} . Par conséquent $[H]^H [H]$ est une matrice carrée si $[H]$ a deux colonnes et plus, ou une fonction complexe quand $[H]$ possède une seule colonne (comme c'est notre cas).

Pour l'équation VI-5, on obtient l'équation VI-8:

$$\text{équation VI-8,} \quad \begin{pmatrix} \bar{H}_{11} & \bar{H}_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{H}_{11} & \bar{H}_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{11} \\ H_{12} \end{pmatrix} (E_1)$$

La résolution de l'équation précédente donne la valeur de Fy au point 1 et par la même méthode, on obtient la valeur de l'effort aux points 2 et 3 :

$$\text{équation VI-9, } \left\{ \begin{array}{l} E_1 = \frac{\overline{H}_{11}S_1 + \overline{H}_{21}S_2}{\overline{H}_{11}H_{11} + \overline{H}_{21}H_{21}} \\ E_2 = \frac{\overline{H}_{12}S_1 + \overline{H}_{22}S_2}{\overline{H}_{12}H_{12} + \overline{H}_{22}H_{22}} \\ E_3 = \frac{\overline{H}_{13}S_1 + \overline{H}_{23}S_2}{\overline{H}_{13}H_{13} + \overline{H}_{23}H_{23}} \end{array} \right.$$

Les fonctions $E_1(t)$, $E_2(t)$ et $E_3(t)$ sont obtenues en appliquant une **TFD** inverse aux fonctions $E_1(j\omega)$, $E_2(j\omega)$ et $E_3(j\omega)$, puis en divisant les signaux temporels ainsi obtenus par la fonction caractéristique de la fenêtre de Hanning pour enlever l'influence de ce fenêtrage nécessaire pour faire passer un signal continu du domaine temporel vers le domaine fréquentiel, comme le montre la Figure VI-25.

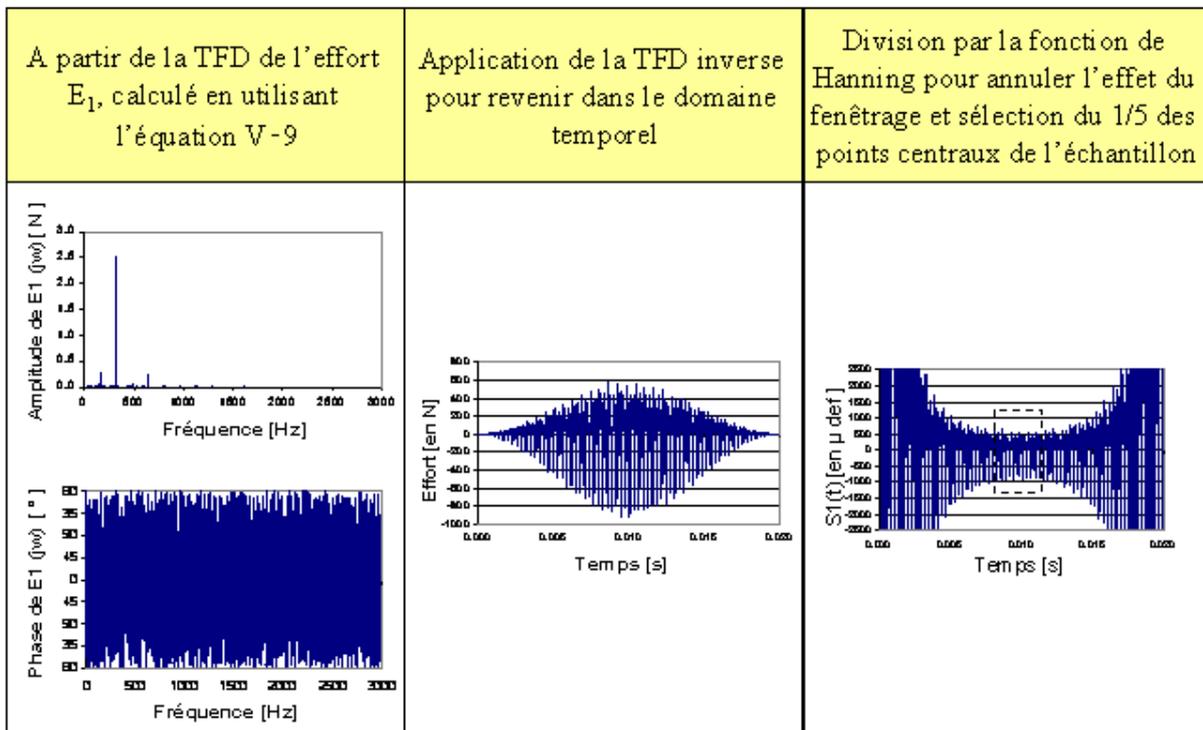


Figure VI-25. Obtention du signal temporel de l'effort de coupe E_1 à partir de sa TFD

VI.6.1.4 Validation de la méthode de mesure :

Plusieurs indicateurs assurent la précision et le bon fonctionnement de la méthode de mesure proposée pour mesurer les efforts de coupe.

VI.6.1.4.1 Étalonnage dynamique représentatif :

Lors de l'acquisition des fonctions expérimentales de réponse en fréquence nécessitant l'utilisation du marteau d'impact, la qualité de l'excitation du contre-couteau est surveillée afin de délivrer le maximum d'énergie à la structure sur une plage de fréquence la plus grande possible. Selon Ewins [Ewins 2000], un bon impact est représenté par une amplitude de TFD due l'impact qui reste importante jusqu'à une fréquence élevée, comme montré sur la Figure VI-26, qui représente une de nos frappes avec le marteau. On remarque sur cet impact que l'énergie apportée par le marteau lors de l'impact reste importante à toutes les fréquences jusqu'à 4000 Hz.

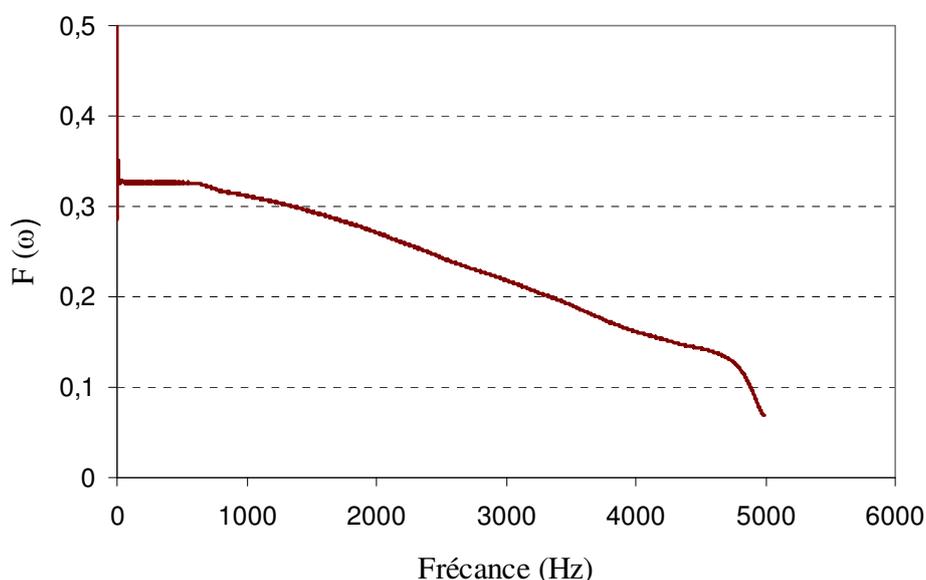


Figure VI-26. Spectre d'un impact dans le domaine fréquentiel

La qualité des **FRF** (H_{ij}), ayant servi à calculer la matrice de **FRF** [H], est essentielle pour la précision de la méthode. La courbe de cohérence, compris entre 0 et 1, permet de juger de la qualité d'une **FRF**. Une cohérence de 1 signifie que le rapport signal sur bruit est bon, c'est-à-dire que l'énergie mesurée au niveau de la réponse est bien l'image de l'énergie fournit au système via l'excitation déformée par le comportement mécanique du système. La Figure VI-27 montre que la FRF a un faible signal sur bruit sur la totalité de 5000 Hz souhaitée. Les pertes de cohérence surviennent aux fréquences modales où le phénomène de résonance fait s'effondrer la cohérence.

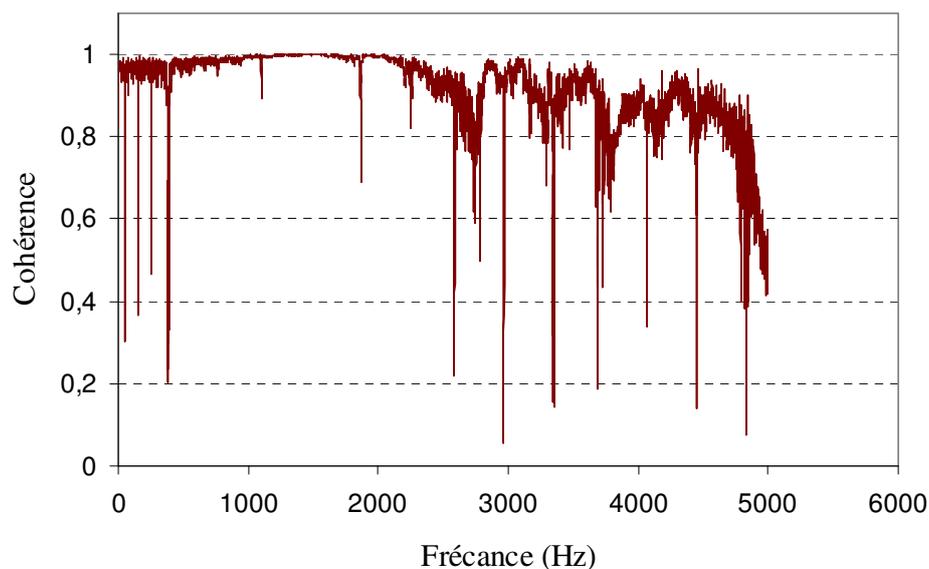


Figure VI-27. Cohérence d'une FRF

La Figure VI-28 compare l'effort obtenu après l'étalonnage dynamique à la déformation du contre-couteau. On observe une réponse correcte qui suit les déformations correspondant à la coupe mais pas les déformations parasites causées par les vibrations du contre-couteau.

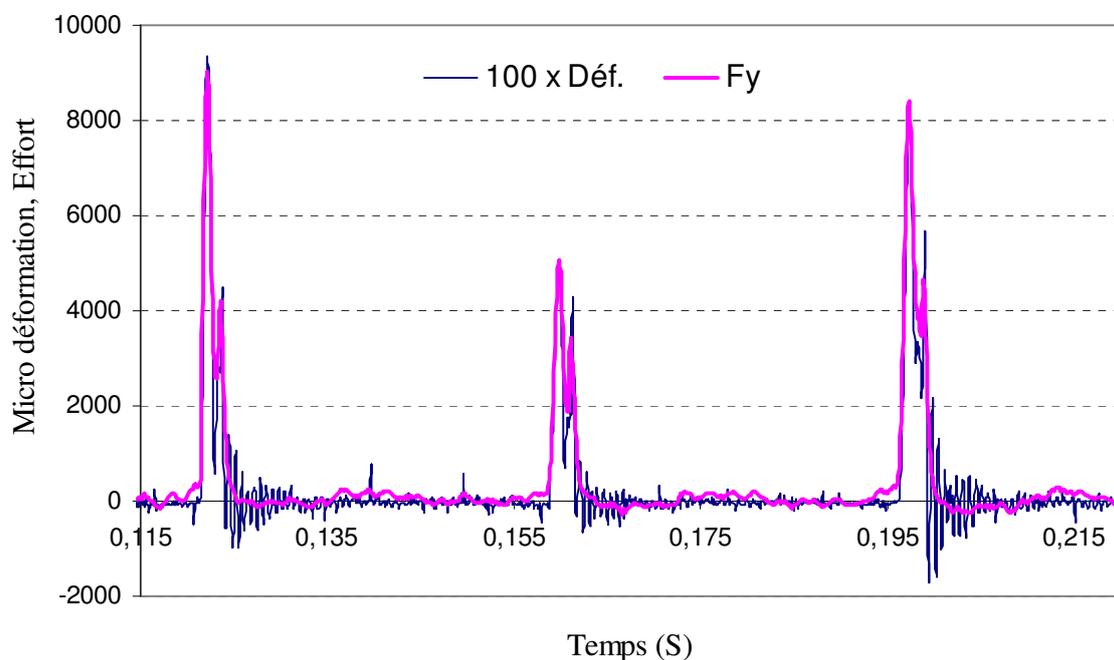
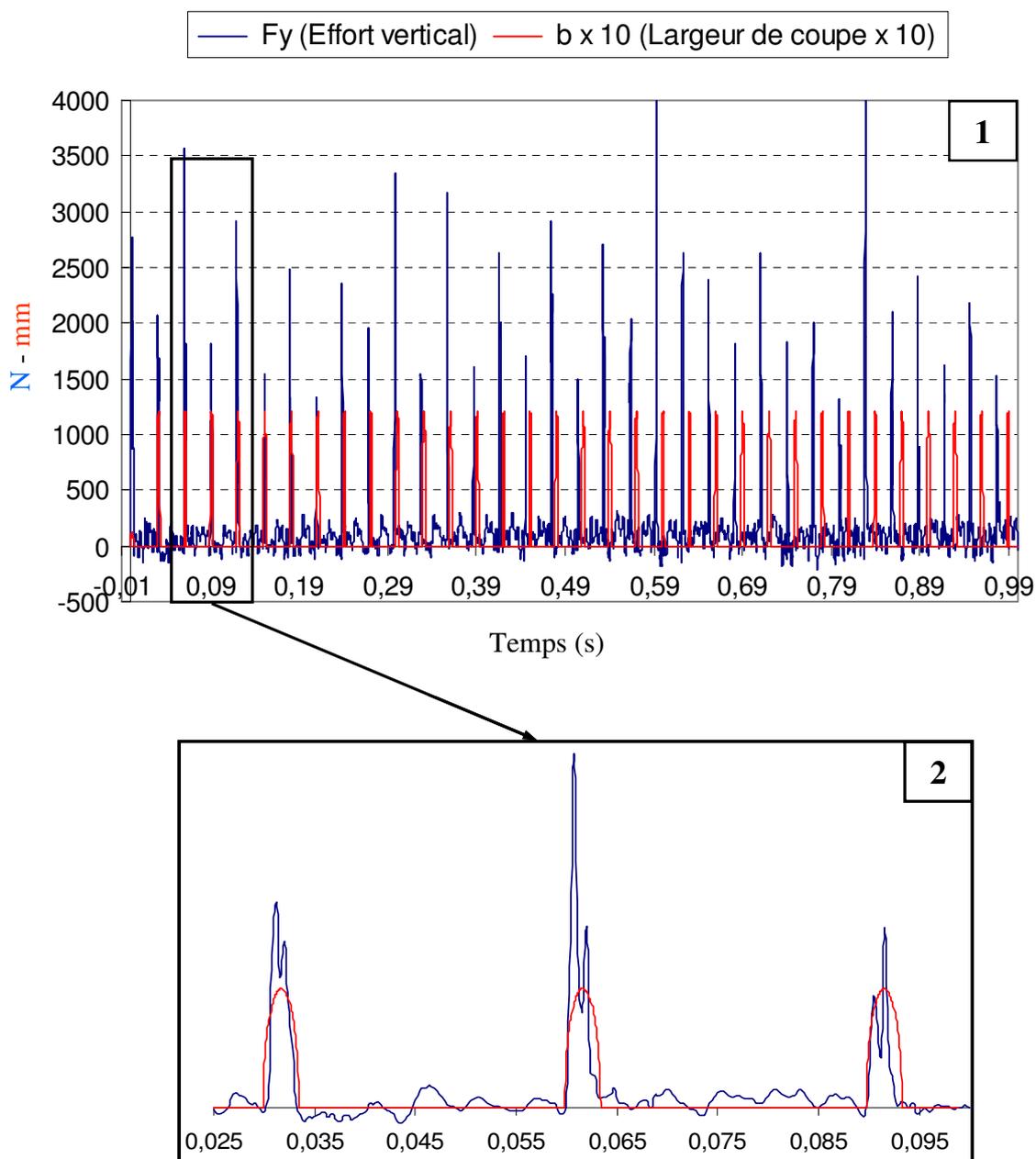


Figure VI-28. Superposition des déformations et de l'effort de coupe après l'étalonnage dynamique

VI.6.1.4.2 Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux :

D'autres moyens permettent de conforter notre méthode de mesure, comme la comparaison entre les résultats expérimentaux et théoriques obtenus par simulation de l'opération de coupe. La Figure VI-29-1 montre la superposition de deux courbes : la courbe bleu représente l'effort F_y , mesuré expérimentalement lors du déchetage d'un rondin d'épicéa de 110 mm de diamètre à une vitesse de 32.4 m/s et la courbe rouge représente la variation de la largeur de coupe b simulée pour les mêmes conditions de coupe.



De la Figure VI-29-1, on peut constater que l'écart entre deux pics d'effort est inférieur en moyenne de 0.0006 S à celui entre deux pics de largeur de coupe. En effet, le calcul théorique ne prend pas en compte la vitesse réelle du disque et son éventuelle variation. Le temps de coupe total expérimental est généralement un peu plus important à celui du calcul théorique.

En zoomant, la Figure VI-29-2 nous montre que le temps de coupe durant le passage d'un couteau est identique pour les courbes. Sur la figure présentée, le temps de coupe est 0.0034 s avec une vitesse de rotation du disque de 1000 tr/min et un rondin de 110 mm de diamètre.

VI.6.1.4.3 Comparaison entre les mesures de puissance et les déformations du contre-couteau :

Les efforts de coupe ont un effet direct sur la consommation d'énergie. La force F_y mesurée est proportionnelle à la déformation du contre-couteau comme le montre la Figure VI-30, où sont superposées la déformation du contre-couteau et celle de la puissance du moteur. Les courbes ont été mesurées pour le déchetage d'un rondin de 3 m de longueur à une vitesse de coupe 26 m/s et une avance par dent de 8 mm.

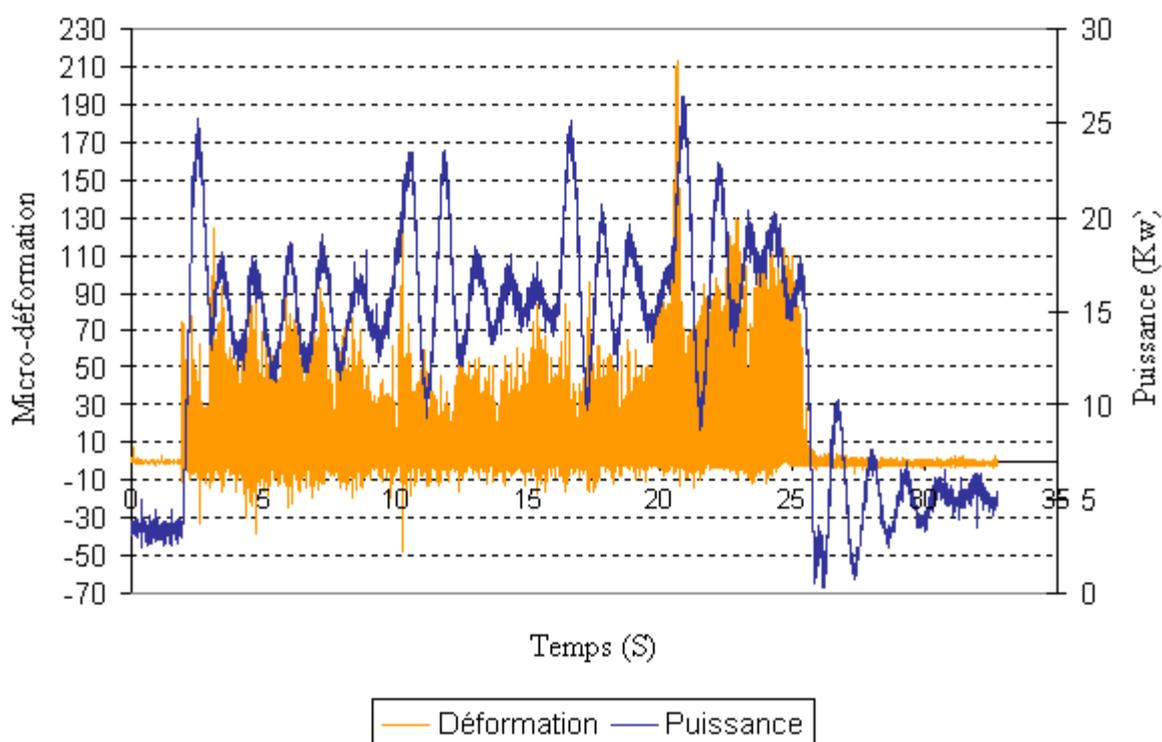


Figure VI-30. Superposition des résultats expérimentaux de la puissance et de la déformation du contre-couteau

L'allure des courbes est similaire sur la première moitié de l'essai, puis un décalage apparaît entre les deux courbes suite à un retard de réponse du moteur ayant pour origine la flexibilité de la chaîne de composants (couteau, disque, arbre, courroies, moteur) et le temps de réponse du variateur de vitesse.

VI.7 Procédure expérimentale et analyse des résultats

VI.7.1 Conditions de coupe

Afin de pouvoir étudier l'influence des mêmes facteurs, étudiés précédemment sur la granulométrie, les conditions de coupe et les caractéristiques des éprouvettes sont identiques pour ces essais d'effort et de puissance de coupe.

VI.7.1.1 Conditions de coupe :

Les coordonnées du centre du contre-couteau (K) sont restées fixes dans le plan (OXY) (Figure VI-31), avec O centre du disque.

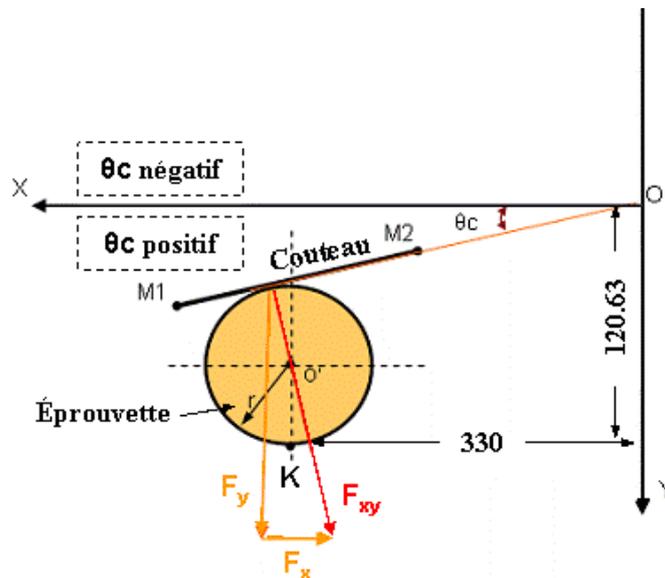


Figure VI-31. Configuration de coupe pour un rondin de diamètre de 120 mm au maximum

Le mode de coupe utilisé durant les expérimentations est ($\rho = 90^\circ$, $\varepsilon = 90^\circ$), avec seulement 2 couteaux utilisés. Les facteurs à tester sont : l'avance par dent (f_z), l'angle de coupe réel (γ_r) qui est à l'angle de coupe (γ) dans notre configuration de coupe (paragraphe III.2.5.1.4), l'angle de taillant (β) et la vitesse de coupe (V_c) calculée au milieu du couteau.

VI.7.1.2 Caractéristiques des éprouvettes :

Les éprouvettes sont des rondins de diamètre moyen variant entre 90 et 115 mm, avec un défilement compris entre 1 et 10 mm/m et d'une longueur d'un mètre. Bien que toutes les éprouvettes soient du bois dit «vert», leurs humidités varient entre 44% et 55 % pour les éprouvettes de résineux (épicéa et sapin) et entre 32% et 40% pour les échantillons de chêne. Les éprouvettes proviennent d'arbres différents, ce qui implique des propriétés mécaniques différentes et une morphologie variable.

VI.7.2 Protocol expérimentale

Lors de la mesure de l'effort et de la puissance de coupe, les étapes du protocole présenté ici sont respectées :

Étape (1) : Identifier et mesurer les caractéristiques de l'éprouvette en termes de taille (longueur (mm), diamètre (minimal et maximal) en mm, section) et essence,

Étape (2) : Armer le trigger déclenchant l'acquisition de la déformation du contre couteau et la puissance active du moteur,

Étape (3) : Régler la vitesse de coupe et celle d'amenage sur les valeurs choisies,

Étape (4) : Lancer la rotation du disque et celle du rouleau d'amenage à vide jusqu'à stabilisation, puis faire entrainer l'éprouvette le rouleau d'amenage,

Étape (5) : Arrêter l'amenage quand un mètre de bois est déchiqueté, et assurer que le reste de l'éprouvette est toujours maintenu sous la pression du rouleau ameneur,

Étape (6) : Laisser le disque reprendre sa vitesse de stabilisation avant de l'arrêter.

Étape (7) : Sauvegarder les mesures obtenues, puis récupérer une échantillon représentatif des plaquettes produites afin de mesurer l'humidité sur brut des plaquettes en suivant la norme française [NF B 51-004],

Étape (8) : Nettoyer l'unité de déchiquetage à l'air comprimé et assurer sa bonne fermeture pour qu'elle soit prête pour une nouvelle expérience.

Étape (9) : Manipuler et traiter les mesures d'effort et de puissance obtenues selon la procédure détaillée ci-après, afin d'avoir des résultats précis et exploitables.

VI.7.2.1 Efforts de coupe :

L'application de la sensibilité dynamique du système (§ VI.6) permet d'obtenir la variation de la composante F_y de l'effort de coupe comme par exemple la Figure VI-32.

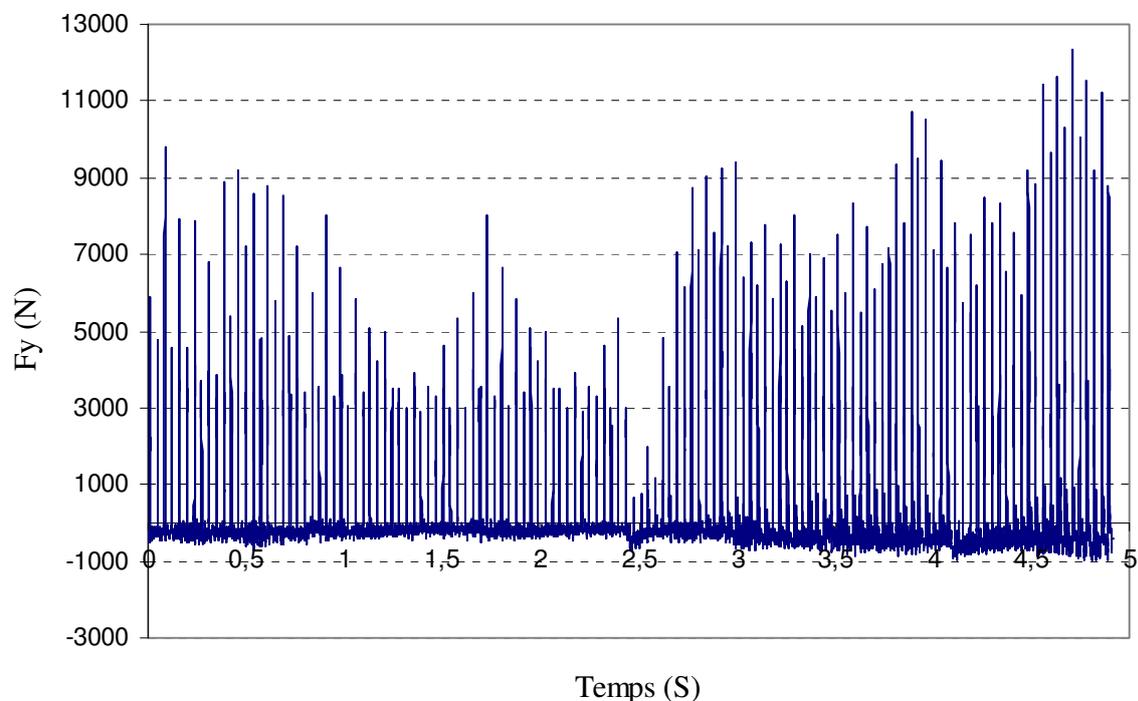


Figure VI-32. Exemple d'effort mesuré durant le déchiquetage d'une éprouvette

Chaque courbe est ensuite découpée en tronçons décrivant chacun un demi tour de disque entre un pic d'effort correspondant au couteau pénétrant dans le bois et le suivant, que nous désignerons par le mot « pic d'effort ». Ces tronçons sont ensuite superposés afin de pouvoir proposer des équations de courbes d'effort à partir de 200 tronçons en moyenne pour chaque essai (Figure VI-33).

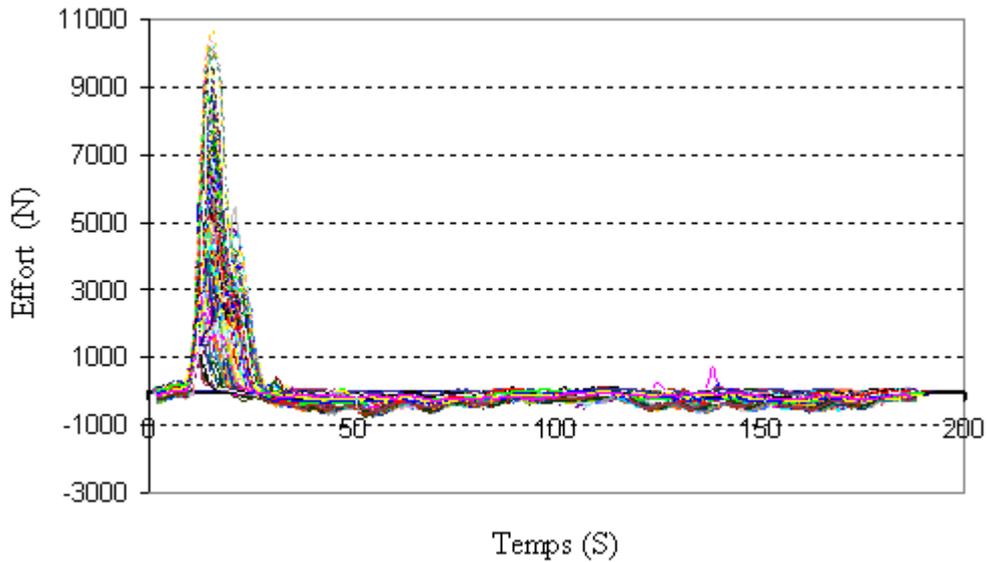


Figure VI-33. Courbe d'effort découpée en pics

Puisque la largeur de coupe (b) est variable durant le déchiquetage d'un rondin à un autre, il faut diviser les valeurs de F_y , obtenues durant la coupe par la largeur de coupe correspondant afin d'obtenir les valeurs de l'effort en centimètre de largeur de coupe et de pouvoir ainsi comparer plus facilement les essais entre eux. La variation de la largeur de coupe est calculée à partir de la vitesse de coupe et du diamètre moyen de l'éprouvette.

Un exemple de valeurs moyennes et d'écart type de l'ensemble des sections obtenues pour F_y durant un demi-tour de disque est présenté sur la Figure VI-34, où la vitesse de coupe est 26 m/s, l'avance par dent est de 8 mm et les angles de coupe sont : $\alpha = 6^\circ$, $\beta = 34^\circ$ et $\gamma_r = 50^\circ$.

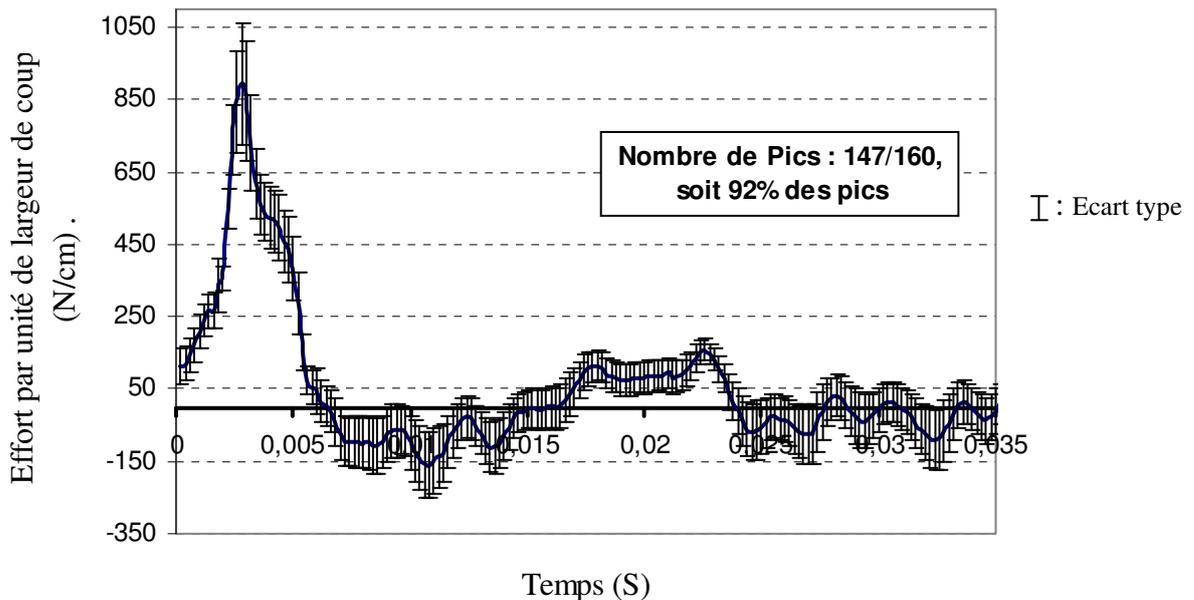


Figure VI-34. Effort moyen mesuré pour 1 cm de la largeur de coupe

Un programme écrit sur "Labview" permet de découper le test en pics d'effort représentant l'effort F_y du début de l'attaque d'un couteau jusqu'au début de l'attaque du couteau suivant, afin de les superposer. Ce programme permet d'obtenir plus de 70 % de pics d'effort représentant le déchiquetage par un couteau, mais certains sont oubliés ou alors le programme en coupe certains beaucoup trop tôt. Nous éliminons ces pics défectueux quand la durée du pic est beaucoup plus longue ou beaucoup plus courte que la durée théorique entre deux passages de couteau. Sur chaque courbe, est indiqué le nombre de pics utilisés pour effectuer la moyenne et l'écart type, ainsi que le nombre de pics obtenus par le programme "Labview" de découpe des fichiers efforts en pics.

La Figure VI-35 résume les différentes étapes de traitement des courbes d'effort mesurées :

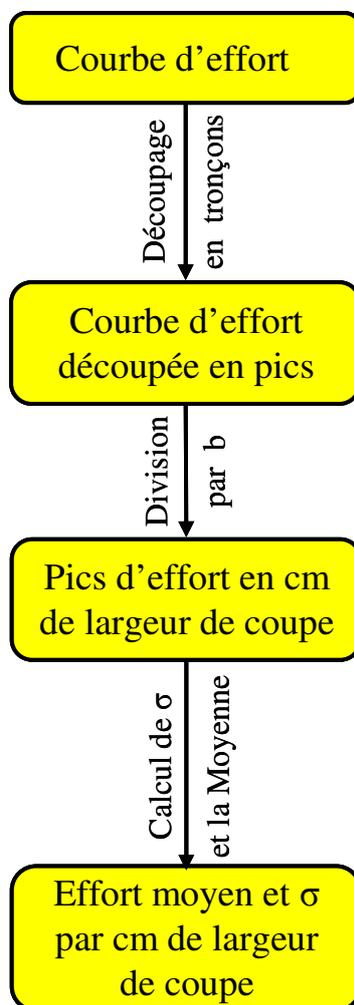


Figure VI-35. Organigramme des différentes étapes de traitement de la courbe d'effort

σ – écart type,

b – largeur de coupe.

VI.7.2.2 Puissance électrique consommée :

Les courbes représentant la variation de la consommation d'énergie électrique à vide sont représentées sur la Figure VI-36.

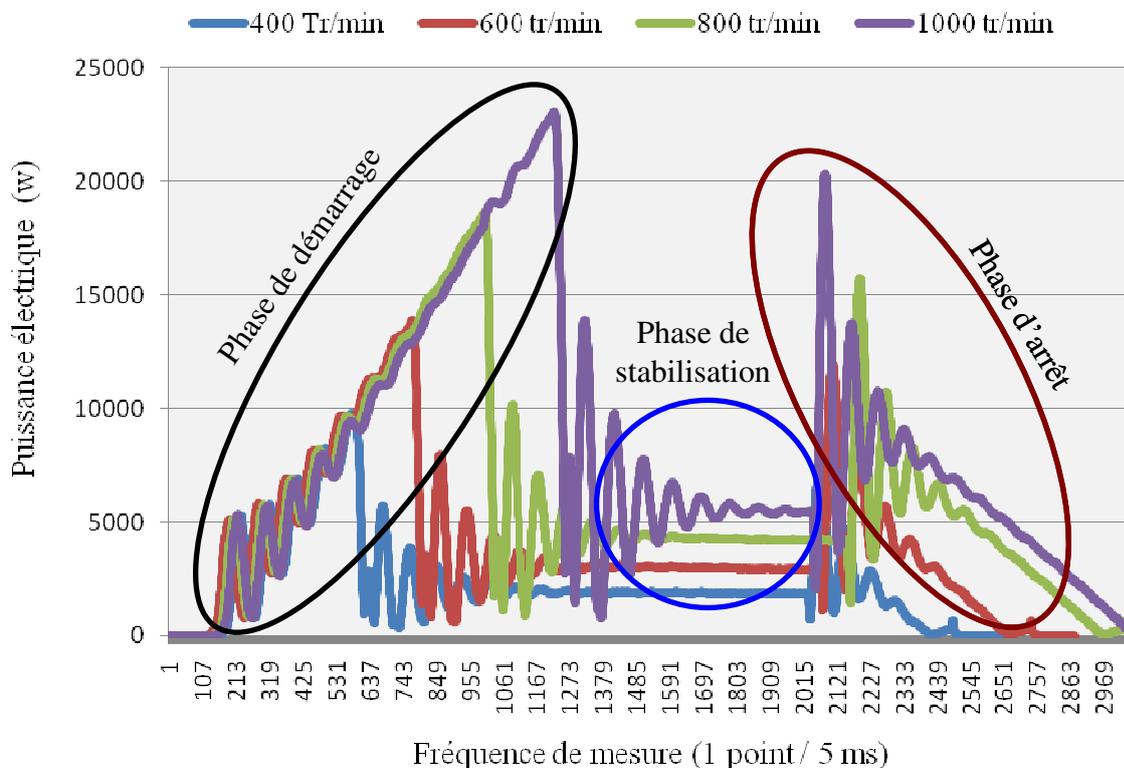


Figure VI-36. Cycle de variation de la consommation d'énergie électrique à vide

Sur chaque courbe, trois phases peuvent être distinguées : la phase de démarrage correspondant à l'augmentation de la consommation d'énergie au moment du lancement du moteur et de l'accumulation d'énergie cinétique dans le disque, la phase de stabilisation correspondant à la période de consommation stable d'électricité car il n'y a pas de charge supplémentaire et la phase d'arrêt correspondant à la diminution de consommation lors de l'arrêt du moteur.

Afin de ne pas avoir de perturbations durant le processus de mesure, l'opération de mesure de la consommation d'énergie est réalisée durant la période de stabilisation, où l'énergie nécessaire pour le déchiquetage correspond à l'aire entre la valeur de stabilisation et les valeurs de la consommation d'énergie durant la période de coupe (Figure VI-37).

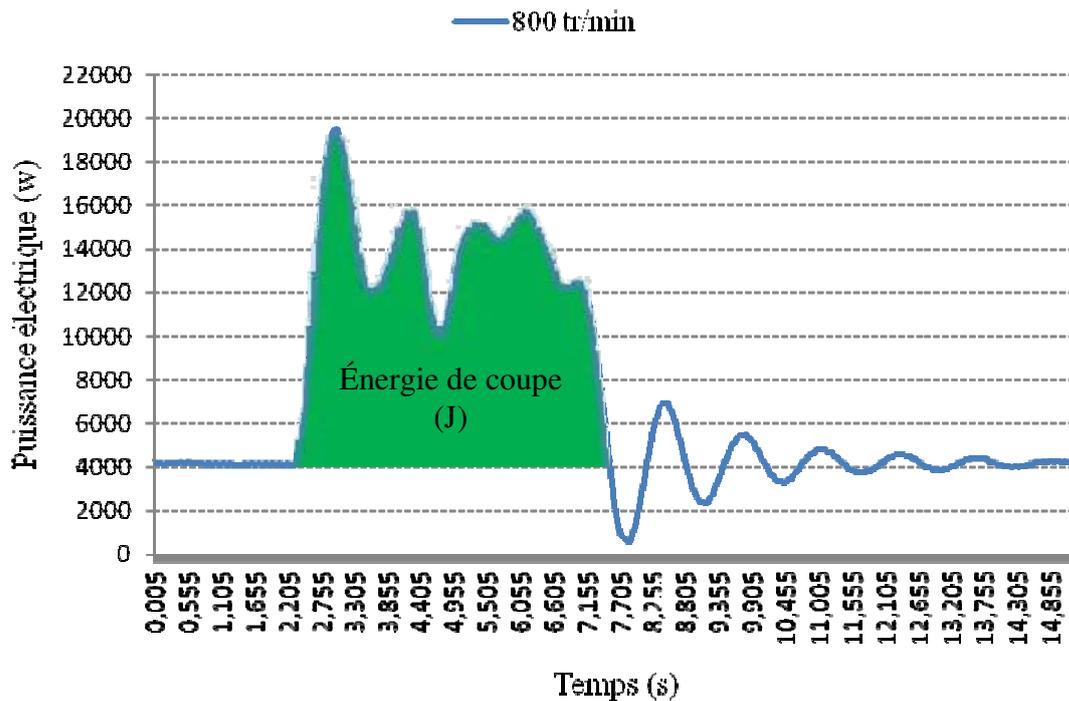


Figure VI-37. Consommation d'énergie durant la coupe

L'obtention de la valeur d'énergie consommée durant la coupe nous permet avec le volume de bois coupé de calculer l'énergie consommée par le moteur afin de déchiqueter un centimètre cube de bois selon l'équation VI-10 :

$$\text{équation VI-10, } E_{\text{Cons}} = \frac{\text{énergie consommée}}{\text{volume du bois}} \quad (\text{J}/\text{cm}^3)$$

VI.7.3 Résultats et discussions

Le premier paragraphe présentera les observations générales sur les courbes d'effort, le deuxième les tests de répétabilité de mesure et enfin le dernier les effets des facteurs étudiés sur la puissance et sur les efforts de coupe en déchiquetage.

VI.7.3.1 Allure des courbes d'effort en déchiquetage :

La Figure VI-38 représente les trois parties distinctes des courbes d'effort obtenues en déchiquetage.

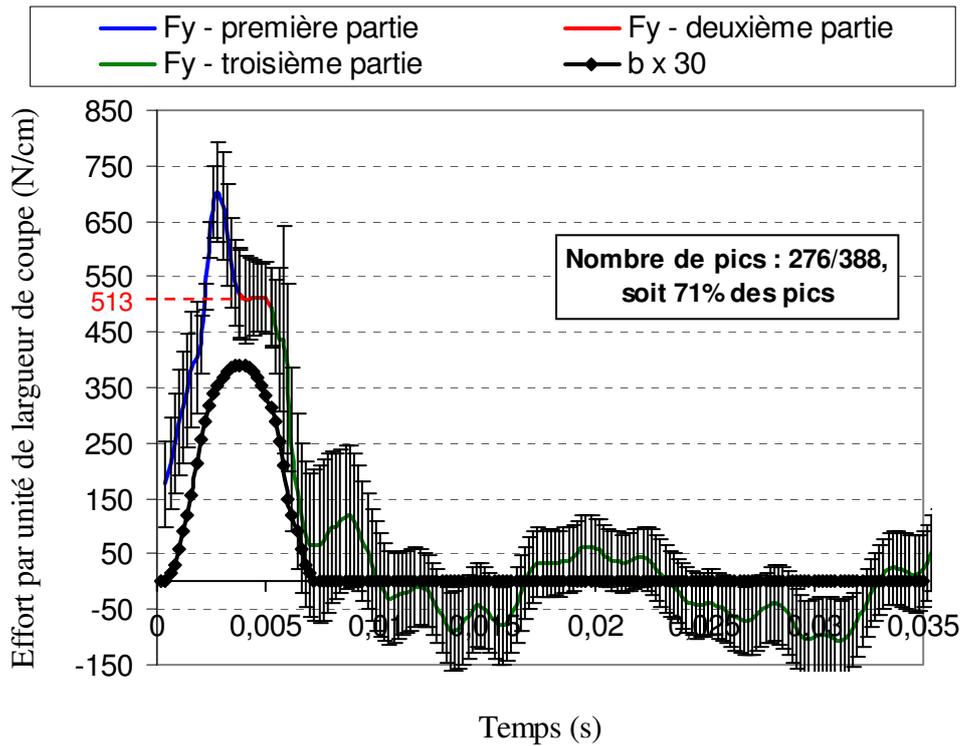


Figure VI-38. Forme de la courbe d'effort (F_y) durant le déchiquetage avec la variation de la largeur de coupe (b)

La première partie est caractéristique du choc dynamique résultant de l'attaque du couteau au début de la coupe, la deuxième représente la coupe, alors que la troisième partie de la courbe représente l'arrachement à la fin de la coupe jusqu'à son annulation durant la période de la rotation à vide avant que le couteau suivant n'attaque le bois. A cause de certains effets parasites les valeurs d'efforts ondulent autour du zéro.

L'allure de nos courbes d'effort de coupe F_y sont proches de celles obtenues par Hartler (Figure V-39).

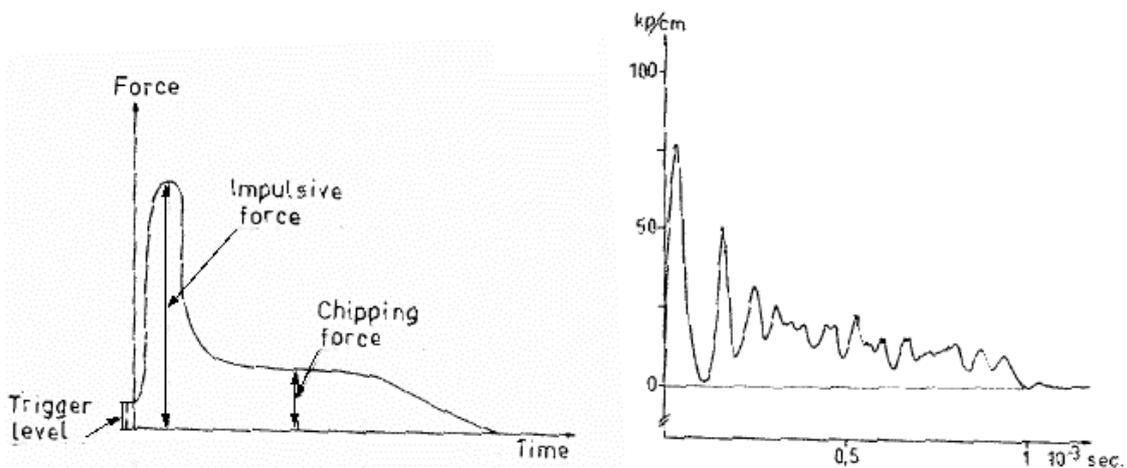


Figure VI-39. Évolution de l'effort de coupe F_y durant le passage d'un couteau [Hartler 1963a]: à gauche schéma explicatif, à droite mesure pour une vitesse de coupe de 20 m/s

Ces tests pour les conditions de coupe suivantes : une vitesse de coupe entre 5 et 20 m/s, des angles de coupe α de 5° , β de 23° et γ_r de 110° , un mode de coupe $\varepsilon = 30^\circ$ et $\rho = 90^\circ$. Les éprouvettes sont des avivés d'épicéa de section de 20x20 mm. La trajectoire du mouvement du couteau sur le banc d'essais de Hartler est très proche de celle du couteau monté sur un tambour, ce qui éloigne un peu le mode de coupe d'Hartler de notre cas. Selon Hartler, les résultats obtenus sont peu exploitables car les matériels utilisés ne sont pas assez précis et les vibrations du contre-couteau ont faussé les valeurs mesurées. L'étalonnage dynamique que nous utilisons permet de palier en pratique ces deux inconvénients soulignés par Hartler.

Le choc initial entraîne une pénétration profonde du couteau dans le bois qui n'est pas régi par les lois de coupe traditionnelles, une partie de coupe très limitée dans le temps puis un arrachement des fibres sur les quelques centimètres précédant la sortie du couteau. Pour avoir un ordre d'idée de la dynamique du phénomène, il est intéressant de rappeler qu'un rondin de 10 cm diamètre est traversé par le couteau qui se déplace à 26 m/s en 5 ms.

La Figure VI-40 montre la courbe de tendance de la partie impulsive de la courbe d'effort pour les résultats d'un test. Le choc est modalisé par une courbe polynomiale de degré deux, alors que la coupe est représentée par une valeur moyenne.

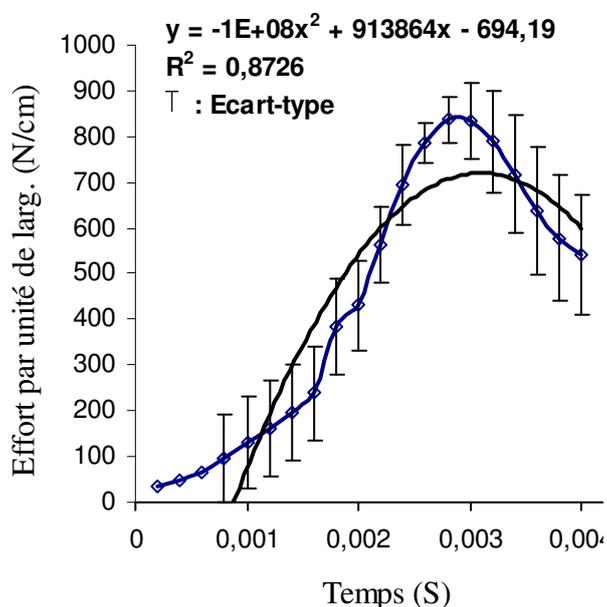


Figure VI-40. Courbe de tendance de la partie impulsive de la courbe de déchiquetage

VI.7.3.2 Répétabilité des mesures :

Afin de déterminer la répétabilité de notre méthode de mesure et d'émettre les premières hypothèses expliquant la forme de la courbe d'effort, les mêmes conditions de test sont reproduites sur cinq éprouvettes d'épicéa. Toutes les éprouvettes ont une humidité de $50\% \pm 2\%$ sur brut, un diamètre moyen entre 85 et 108 mm et un défilement variant entre 6 et 12 mm/m. les conditions de coupe sont une vitesse de coupe V_c de 26 m/s, une avance par dent f_z de 8 mm, des angles de coupe γ_r de 50° , β de 34° et α de 6° et un mode de coupe $\rho = 90^\circ$ et $\varepsilon = 90^\circ$.

La Figure VI-41 montre une des cinq courbes représentant les variations d'effort (F_y) par un centimètre de largeur de coupe. Ces résultats ont pris en compte la majorité des pics d'effort (Figure VI-32).

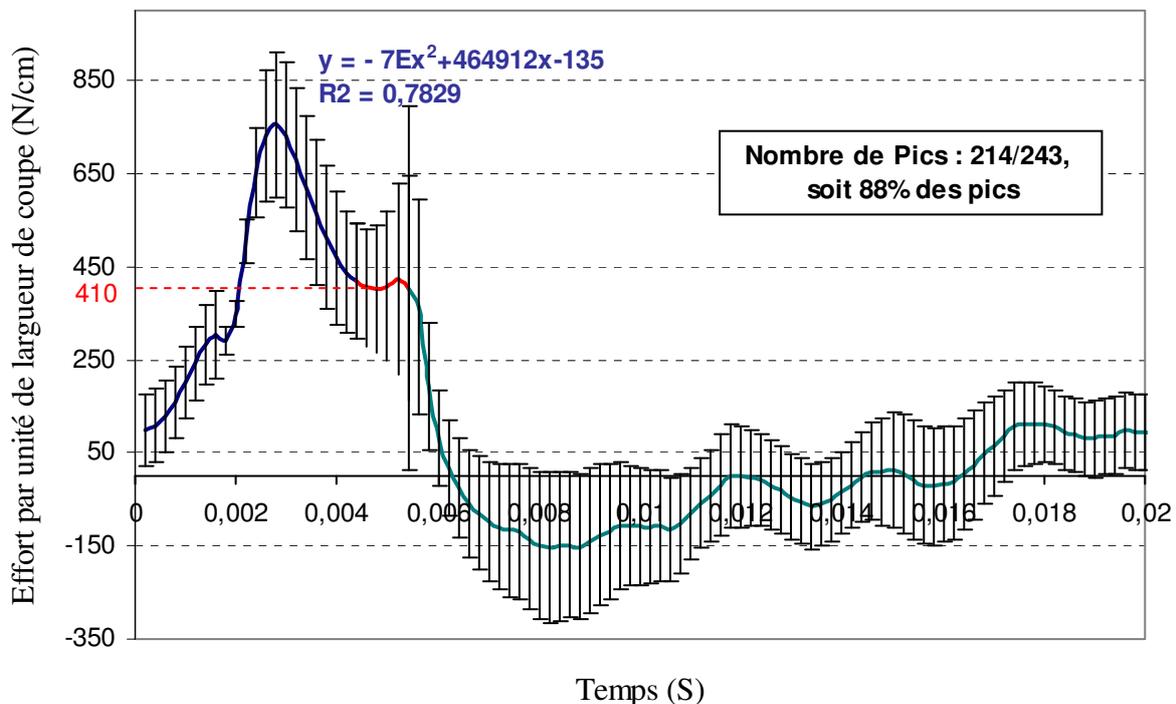


Figure VI-41. Résultats de la variation d'effort F_y pour 5 essais de déchiquetage :

Le Tableau VI-1 détermine les différentes valeurs qu'on a récupérées des cinq courbes d'efforts obtenus.

Test	% des pics pris en compte	Coefficients du polynome du 2nd degrés représentant le choc			Valeur moyenne pour la partie coupe (N/cm)
		X ²	X	cst	
1	(276/388) : 71%	-2,0E+08	1,0E+06	-1,2E+03	527
2	(214/243) : 88%	-7,0E+07	4,6E+05	-1,4E+02	410
3	(138/168) : 82%	-1,0E+08	9,1E+05	-6,9E+02	515
4	(147/160) : 92%	-2,0E+08	1,0E+06	-1,2E+03	527
5	(160/172) : 93%	-2,0E+08	1,0E+06	-1,0E+03	592

Tableau VI-1. Récapitulatif des données des courbes des efforts obtenus par le test de répétabilité

Les trois coefficients des courbes d'effort de choc sont très proches et une précision moyenne de 15 % peut être calculée. Concernant la partie coupe, la précision de la méthode de mesure est de l'ordre de 20 %.

L'énergie consommée (E_{cons}) obtenue avec les différents tests est assez stable avec une valeur moyenne de 10.7 j/cm^3 et une erreur de $\pm 10\%$ (Figure VI-42).

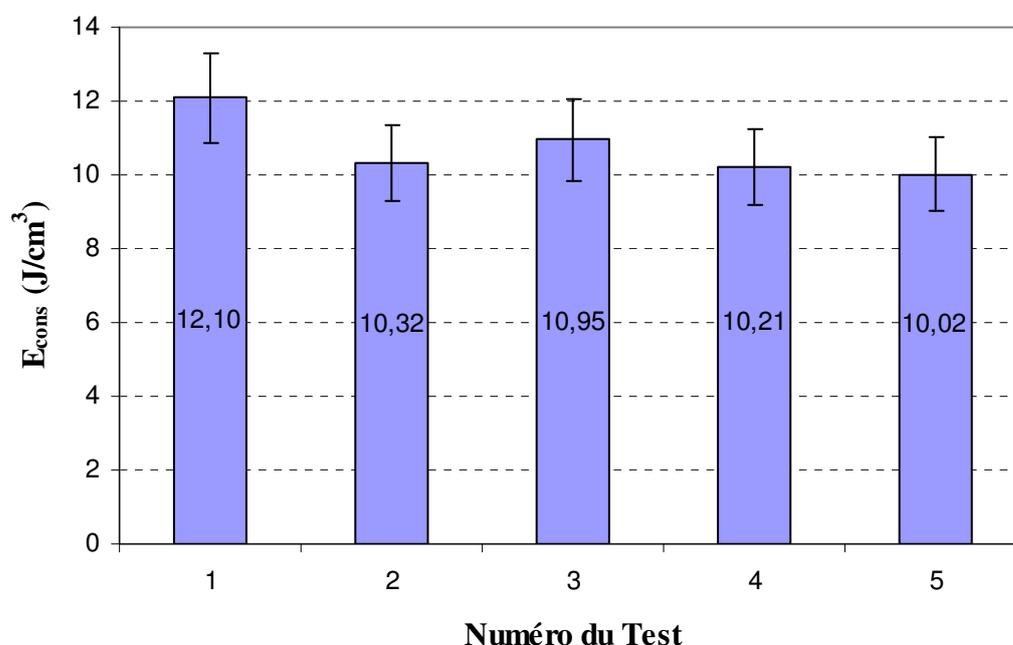


Figure VI-42. Énergie consommée pour une unité de volume, obtenue avec les différents tests de répétabilité

VI.7.3.3 Influence sur l'effort de coupe des facteurs testés pour la granulométrie :

Une quarantaine de tests d'exploration ont été réalisés pour analyser les effets des facteurs déjà testés pour la granulométrie sur l'effort de coupe et l'énergie de coupe. Les paramètres analysés sont l'avance par dent f_z , la vitesse de coupe V_c , l'angle de coupe réel γ_r et l'angle de taillant β . Leurs valeurs sont rassemblées dans le tableau

f_z (mm)	γ (°)	V_c (m/s)	β (°)
2	45	19	25
4	50	26	34
8	55	32.4	

Tableau VI-2. Valeurs des facteurs testés

VI.7.3.3.1 Avance par dent et vitesse de coupe :

Neuf configurations différentes, avec un test pour chaque configuration, sont obtenues en fixant les angles de coupe à $\gamma_r = 50^\circ$, $\beta = 34^\circ$ et $\alpha = 11^\circ$ et en faisant varier l'avance par dent f_z avec la vitesse de coupe V_c . Pour la majorité des résultats, seule la partie choc apparaît sur la courbe d'effort, alors que la partie coupe est présente pour uniquement un tiers des résultats. Cette différence de présence entre la partie choc et la partie coupe est liée à la vitesse de coupe élevée (32.4 m/s) et au faible diamètre du bois (moins de 90 mm) entraînant une pénétration importante du couteau dans le rondin lors de l'impact, et une absence de la partie coupe.

En ce qui concerne l'énergie consommée (E_{cons}), les résultats sont assez proches de la valeur moyenne obtenue dans le test de répétabilité, avec des variations dans les limites de l'incertitude ($\pm 10\%$).

VI.7.3.3.2 Angle de coupe réel et la vitesse de coupe :

L'avance par dent de 8 mm et angle de taillant de 34° sont restés constants alors que γ_r et V_c prenaient chacun trois valeurs différentes, d'où neuf configurations de coupe répétées une fois. Les résultats moyens sont présentés dans la Figure VI-43.

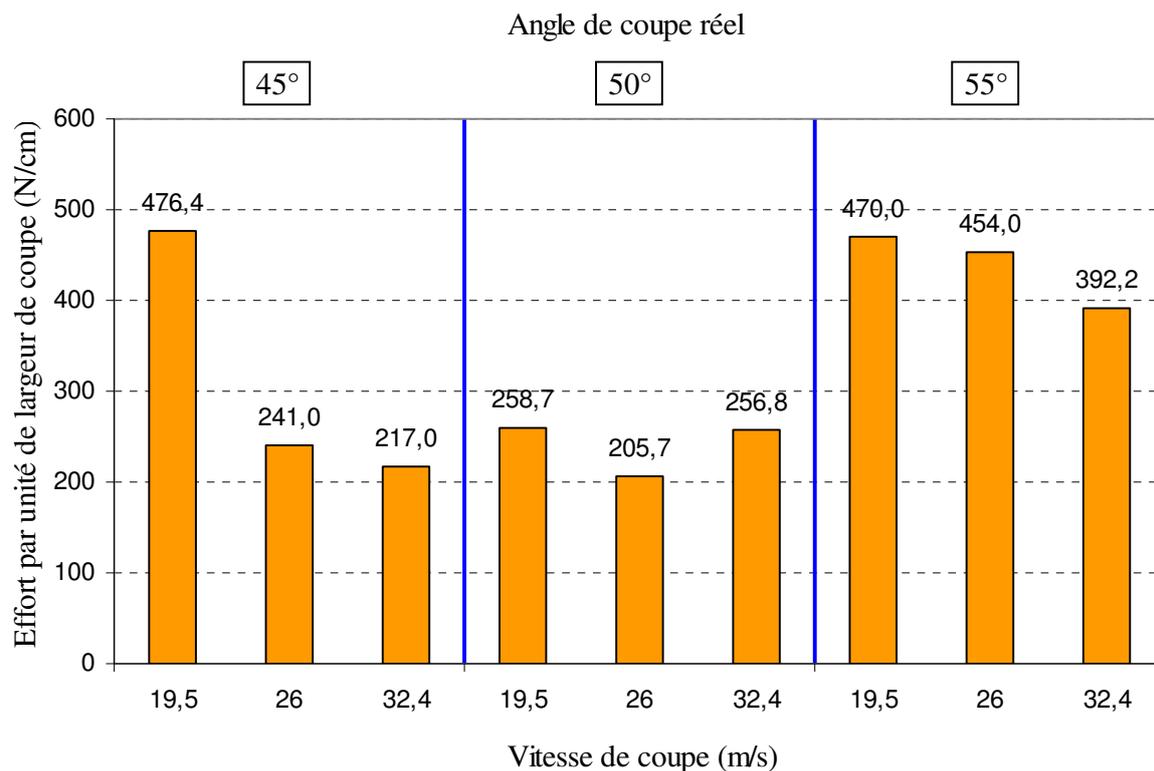


Figure VI-43. Effort de coupe F_y en fonction de l'angle et de la vitesse de coupe par 1 centimètre de largeur de coupe

On constate que l'effort de coupe avec l'angle de coupe de 55° est plus important que ceux demandés avec les angles de coupe de 45° et de 50° et qu'en augmentant la vitesse de coupe pour un angle donné, l'effort demandé est moins important.

VI.7.3.3.3 Angle de taillant et vitesse de coupe :

Six configurations de coupe sont choisies pour analyser l'effet de l'angle de taillant sur l'effort de coupe, avec un test pour chaque configuration. L'avance par dent et l'angle de coupe réel sont respectivement 8 mm et 50°, alors que l'angle de taillant a deux valeurs (25° et 34°) et la vitesse de coupe a trois valeurs (19.5, 26 et 32,4) m/s. Les résultats obtenus pour l'angle 25° sont composés uniquement de la partie choc et pas de la partie coupe, principalement parce que le diamètre des éprouvettes déchiquetées est faible (entre 75 et 85 mm).

VI.7.3.3.4 Énergie consommée pour 1 cm³ (E_{cons}):

En ce qui concerne l'énergie consommée pour déchiqueter 1 cm³, les résultats sont assez proches de la valeur moyenne obtenue dans le test de répétabilité, avec des variations dans les limites de l'incertitude ($\pm 10\%$).

VI.7.4 Conclusion

Un dispositif de mesure de l'effort de coupe et la puissance consommée sur le banc d'essais a montré son efficacité puisque l'incertitude avoisine les 20%. L'énergie consommée pour 1 cm³ de bois déchiqueté (E_{cons}), est principalement due à la grande inertie du disque.

Les résultats concernant l'effort de coupe sont prometteurs car leur fiabilité permet de les utiliser pour développer les modèles analytiques ou numériques du déchiquetage. Les influences de la machine sur ces résultats restent cependant à étudier. Concernant l'effort de coupe, nous pensons que le disque se comporte comme un volant d'inertie équipé de couteaux et la tendance à augmenter la partie choc de l'effort au détriment de la partie coupe. Au niveau de la puissance consommée, l'étude de la rigidité dynamique de la chaîne de transmission de puissance de l'arbre du moteur jusqu'à la puissance disponible au couteau doit être effectuée afin de pouvoir faire diminuer l'énergie consommée lorsque la puissance de coupe diminue.



***Chapitre VII. Conclusion générale et
perspectives***

VII.1 Conclusions

L'objectif de notre étude était d'obtenir la meilleure qualité de plaquettes forestières en terme de granulométrie pour un coût énergétique le plus faible possible. L'étude bibliographique a permis de rassembler et d'exploiter toutes les informations scientifiques disponibles sur ce sujet et de montrer l'originalité du sujet par le peu d'études rencontrées.

Le montage d'un banc d'essais de taille industrielle s'est avéré nécessaire afin de tirer nos premières observations sur ce sujet. Il permet de faire varier plusieurs paramètres, de mesurer l'effort de coupe vertical et la consommation d'énergie à grande vitesse (30 m/s).

Les résultats sont cependant influencés par deux choix de conception du banc : le disque massif favorise la partie choc de l'effort par rapport à la partie coupe et la chaîne de transmission de puissance de l'arbre au couteau n'entraîne pas de modification de la puissance consommée lorsque la puissance de coupe diminue.

L'analyse granulométrique et celle de la formation des plaquettes ont permis de montrer l'effet de plusieurs facteurs comme l'essence du bois, la vitesse de coupe, l'avance par dent et les angles de coupe sur la qualité des plaquettes forestières. Il reste cependant nécessaire de développer un modèle de formation des plaquettes et d'éclaircir le rôle de la propagation des fissures et du cisaillement dans le mécanisme de formation des plaquettes.

La technique développée afin de mesurer l'effort est un concept original, qui permet de mesurer indirectement l'effort par l'instrumentation du contre couteau, au plus près du phénomène de coupe. Elle permet également d'avoir une fréquence d'acquisition élevée (10 KHz) et de ne pas changer la fréquence propre du système de coupe. Le système de mesure de la consommation électrique permet lui aussi d'avoir une fréquence de mesure équivalente à celle de l'effort tout en étant synchronisée avec celle-ci.

Le traitement des données des efforts de coupe permet de faire des études statistiques sur quelques centaines de pics issus d'un même essai d'usinage. La variabilité du bois est ainsi réduite à la variabilité de la densité entre la souche et la cime, qui est très faible pour les bois

juvéniles que nous utilisons pour nos essais. Les configurations de coupe doivent cependant être encore diversifiées afin d'affiner l'étude de l'influence des paramètres sur la granulométrie et l'effort de coupe.

Les premiers essais réalisés sur les facteurs qui pourraient influencer les efforts et la puissance de coupe, ont permis de faire des hypothèses permettant d'orienter la suite du projet.

VII.2 Perspectives

Le travail de la thèse va se poursuivre selon différents axes :

- l'avance par dent sera augmentée de 8 à 20 mm, afin de se rapprocher plus des configurations de coupe industriels et un travail sera mené sur l'influence du disque et des couteaux sur le déchiquetage. La table d'aménagement repensée afin de mieux maîtriser l'avance et la direction d'aménagement du bois.
- le système de mesure de la vitesse de coupe sera finalisé et vérifié afin de pouvoir mesurer en temps réel et à grande fréquence d'échantillonnage les variations de la vitesse de coupe. Le système de mesure de l'effort de coupe sera lui aussi complété par un développement du dispositif actuelle afin de pouvoir mesurer les trois composantes de l'effort.

Il est nécessaire de réaliser plus d'essais sur les facteurs qui influencent les efforts et l'énergie de coupe afin d'avoir des informations suffisantes pour pouvoir modéliser les efforts et la puissance de coupe, et de proposer des configurations de coupe optimisées qui permettent de produire des plaquettes forestières de meilleure qualité avec une dépense énergétique minimisée.

Un modèle numérique ou analytique de l'opération de déchiquetage pourrait être développé afin d'estimer la taille des plaquettes et les efforts de coupe pour une dépense énergétique faible.



Chapitre VIII. Références bibliographiques

[ADEME 2004]

Ademe, Ifn, Solagro "Evaluation du potentiel Bois Energie." <http://www.boisenergie.ifn.fr/>, Visité le 15 juillet 2009.

[ADEME 2005]

Ademe, Programme national Bois - Energie 2000 -2006, Rapprt d'activités 2000-2004, ADEME Editions, ISBN 978-2-86817-826-X, 2005.

[AFOCEL 2006]

(Fcba) A., "Quel approvisionnement pour les industries du bois énergie ?" N°3-2006, Fiche n°734, <http://www.fcba.info/fr/pages/Archives/fif734.pdf>, 6 pages, 2006.

[Aguilera 2000]

Aguilera A.A., Optimisation des condition de coupe pour l'usinage du bois - Application de la méthode couple outil-matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Epinal, 2000.

[Albrechta 2005]

Albrechta A., Park S.S., Altintasc Y. et al., "High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors " International journal of machine tools & manufacture, 45 (9), 993-1008, 2005.

[Altintas 1992]

Altintas Y., "Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurement" ASME, Journal of Engineering for Industry, 114 (4), 386-392, 1992.

[Auchet 2004a]

Auchet S., Chevrier P., Lacour M. et al., "A new method of cutting force measurement based on command voltages of active electro-magnetic bearings" International journal of machine tools & manufacture 44 (14), 1441-1449, 2004a.

[Auchet 2004b]

Auchet S., Developpement d'une technique originale de mesures des efforts de coupe en usinage à grande vitesse basée sur la technologie des paliers magnetique actifs : applications au fraisage des matériaux aéronautiques, Thèse de doctorat, Université de Metz, Metz, 2004b.

[Barboutis 2007]

Barboutis J.A., Philippou J.L., "Evergreen mediterranean hardwoods as particleboard raw material" Building and Environment, 42 (3), 1183-1187, 2007.

[Barette 2006]

J.P.Barette, C.Hazard, J.Mayer," Mémotech - Bois Et Matériaux Associés ", Éducalivre / Casteilla, 2-7135-2821-6, 2006.

[Bary-Lenger 1999]

Bary-Lenger A., Pierson J., Poncelet J.,"Transformation utilisation et industries du bois en europe", Editions du Perron, 2-87114-161-4, 557 pages, Allier-Liège, 1999.

[BERC 2007]

Center B.E.R., Woodchip fuel specifications and procurement strategies for the black hills, South Dakota Department of Agriculture, Resource Conservation & Forestry Division, Montpelier, Vermont, 31 Pages, 2007.

[Bernard 2005]

Bernard C., Caractérisation et Optimisation de la Combustion de Bois Fragmenté en Chaufferies Automatiques, Thèse de Doctorat en science du bois, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Epinal, 2005.

[Bodig 1982]

J.Bodig, B.A.Jayne, "Mechanics of wood and wood composites", Van Nostrand Reinhold Company Inc., 0-442-00822-8, Etats-Unis, 1982.

[Borch 1980]

Borch J.T., "Mechanical vibration and shock measurements", Brüel & Kjaer, ISBN 8787355361, 360 pages, 1980.

[Borlew 1970]

Borlew P.B., Miller R.L., " Chip thickness: a critical dimension in Kraft pulping" Tappi, 53 (11), 2107-2111, 1970.

[Borroni 2005]

Borroni V., Duboc J., Catalogue du matériel de déchiquetage en Rhône-Alpes, étude cofinancée par la commission européenne sous le programme Énergie Intelligente-Europe, région Rhône-Alpes, 44 pages, 2005.

[Boucher 2007]

Boucher J., Caractéristique de la coupe rotative du bois, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Epinal, 2007.

[Buchanan and Duchnicki 1963]

Buchanan J.G., Duchnicki T.S., "Some experiments in low-speed chipping " Plup and Paper Magazine Can., 5 (T235-T245), 1963.

[Castro 2006]

Castro L.R., Viéville P., Lipinski P., "Correction of dynamic effects on force measurements made with piezoelectric dynamometers " International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46 (14), 1707-1715, 2006.

[CEN/TS 14961]

Biocombustibles solides, Classes et specifications des combustibles, Comité Européen de Normalisation, mai 2005.

[Chardin 1958]

Chardin A., "Utilisation du pendule dynamométrique dans les recherches sur le sciage des bois" Revue bois et forêt des tropiques, n° 56, mars-avril, 49-61, 1958.

[Chowdhury 2009]

Chowdhury I., Dasgupta S.P., "Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems - A unified approach: 1. Fundamentals ", CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, USA 2009.

[Christian 1999]

Christian L., "Vibrations et chocs mécaniques - Tome 1: Vibrations sinusoïdales ", Hermès Science Publications, Paris, 1999.

[Chung 1994]

Chung Y.L., Spiewak S.A., "A model of high performance dynamometer" Journal of engineering for industry 116 (3), 279-288, 1994.

[CTBA 2001]

Menthiere N., Hocquet A., "Manuel SCERIE - Techniques et matériels", CTBA, tome I, 2-85684-046-9, Paris, 2001.

[Déces Petit 1996]

Petit C.D., Etude des phases transitoires au cours du déroulage du bois Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 1996.

[Deschênes 1986]

Deschênes H., "Utilisation et transformation du bois", Modulo Editeur, 134 pages, Mont-Royal, Quebec, 1986.

[Dodelin 2007]

B.Dodelin, R.Eynard-Machet, P.Athhanaze et al., "Les rémanents en foresterie et agriculture- Les branches: matériau d'avenir", Lavoisier, 978-2-7430-1031-7, 2007.

[Dubois 1992]

Dubois M.R., Waston W.F., Wagner F.G., Chip quality survey, for sawmills in the southeastern United States, Mississippi Agricultural & Forestry Experiment Station (US-MAFES), Mississippi State University, Bulletin 983, 14 pages, 1992.

[Dufour 2007]

Dufour A., Optimisation de la production d'hydrogène par conversion du méthane dans les procédés de pyrolyse/gazéification de la biomasse, Thèse de Doctorat en Science de Procédé, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 2007.

[Engelgau 1978]

Engelgau W.G., "What is new and old in chipping ?" Tappi 61 (8), 77-80, 1978.

[Ewins 2000]

Ewins D.J., "Modal Testing: Theory, Practice and Application", Research Studies Press LTD, Second edition, 400 P, Baldock, Hertfordshire, England, 2000.

[Eyma 1999]

Eyma F., Influence du matériau bois dans le calcul de l'effort de coupe, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Epinal, 1999.

[Eyma 2002]

Eyma F., Caractérisation des efforts de coupe de différentes essences de bois à l'aide de leurs paramètres mécaniques, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Epinal, 2002.

[FAO 1976]

Fao, "Wood chips; production, handling, transport", Second edition, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 92-5-100207-X, 149 pages, Rome, 1976.

[Felber 2005]

Felber G., Lackner R., Optimization of the Production Process of Sawmill Chips for the Pulp and Paper Industry, Proceedings of the 17th international wood machining seminar (IWMS 17), 225-240, University of Applied Science, Rosenheim, Germany, 2005.

[Fischer 1999]

Fischer R., Wood cutting simulation – A program to experiment without a machine, Proceedings of the 14th international wood machining seminar (IWMS 14-1999), 553-562, Ecole Nationale Supérieure des Industries et Technologies du Bois, Epinal, 12-19 septembre, 1999.

[Franz 1958]

Franz N.C., An analysis of the wood-cutting process, PhD thesis, University of Michigan - Department of wood technology, Ann Arbor, 1958.

[Fuller 1991]

Fuller W.S., Chip Quality - A key to pulping uniformity and productivity, The 24 Plup and Paper Annual Meeting, São Paulo, Brazil, 25 to 29 of November, 1991.

[Gauvent 2006a]

Gauvent M., L'usure des outils à bois, Thèse de Doctorat Université Henri Poincaré - Nancy 1, Epinal, 2006a.

[Gauvent 2006b]

Gauvent M., Rocca E., Meausoonec P.J. et al., "Corrosion of materials used as cutting tools of wood" *Wear*, 261 (9), 1051–1055, 2006b.

[Gerhard 2005]

Gerhard F., Optimization of the Production Process of Sawmill Chips for the Pulp and Paper Industry, Proceedings of the 17th international wood machining seminar (IWMS 17), University of Applied Science, Rosenheim, Germany, 2005.

[Goli 2005]

Goli G., Fioravanti M., Sodini N. et al., Wood processing: a contribute to the interpretation of surface origin according to grain orientation, Proceedings of the 17th international wood machining seminar (IWMS-17), 377-382, University of Applied Sciences, Fachhochschule, Rosenheim, Germany, 26 - 28 septembre, 2005.

[Goli 2006]

Goli G., Fioravanti M., Taglia A.D., Chip formation processing wood with different grain orientations using low speed free orthogonal cutting technique, Proceedings of the conference "Integrated Approach to Wood Structure, Behaviour and Applications"; ESWM and COST Action E35 meeting, Florence, Italy, 2006.

[Gonçalves 1997]

Gonçalves M.T.T., Rodrigues R., Takahashi J.S.I., Wood processing: a contribute to the interpretation of surface origin according to grain orientation, Proceedings of the 13th international wood machining seminar (IWMS 13), 481-487, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 17-20 juin, 1997.

[Guitard 1987]

Guitard D., "Mécanique du matériau bois et composites", Cépaduésè-édition, ISBN 2.85428.152.7, 238 p., 1987.

[Haluk 1994]

Haluk J.P., Chapitre II. composition chimique du bois, "Le bois matériau - d'ingénierie" ARBOLOR, ISBN 2-907086-07-3: 54-89, 1994.

[Hartler 1962a]

Hartler N., "The effect of spout angle as studied in an experimental chipper" Svensk Papperstidning, 65 (9), 351-362, 1962a.

[Hartler 1962b]

Hartler N., "The effect of sharpness angle as studied in experimental chipper" Svensk Papperstidning, 65 (10), 397-402, 1962b.

[Hartler 1962c]

Hartler N., "Studies on the suction feeding of chippers" Svensk Papperstidning, 65 (12), 475-487, 1962c.

[Hartler 1963a]

Hartler N., "Some model studies of wood chipping in a laboratory machine" Svensk Papperstidning, 66 (16), 587-600, 1963a.

[Hartler 1963b]

Hartler N., "Shear mainly perpendicular to the fibre, Axis - A new chipping principle" 66 (16), 1963b.

[Hartler 1965]

Hartler N., Stockman L., "Method of chipping wood", Patent N°: 3-220-448, United states patent office, 1965.

[Hartler 1977]

Hartler N., "Chipper operation for improved chip quality" Svensk Papperstidning, 80 (14), 447-453, 1977.

[Hartler 1986]

Hartler N., "Chipper design and operation for optimum chip quality" *Tappi Journal*, 69 (10), 62-66 1986.

[Hartler 1996]

Hartler N., "Achievement and significance of optimal chip quality" *Tappi Journal*, 79 (2), 259-264, 1996.

[Hartmann 2006]

Hartman H., Bohm T., Daugbjerg J.P. et al., "Methods for size classification of wood chips" *Biomass and Bioenergy*, Vol 30 (11), 944-953, 2006.

[Hatton 1976]

Hatton J.V., "Effect of chipper, wood species, and season on chip thickness distribution and chip packing density of sawmill and woodroom chips" *Tappi*, 59 (6), 151-155, 1976.

[Hatton 1977]

Hatton J.V., "Seasonal, species, and chipper variations in sawmill chip quality" *Tappi*, 60 (8), 107-110, 1977.

[Hellström 2008a]

Hellström L.M., *Fracture processes in wood chipping*, Thesis for the degree of licentiate of technology, Mid Sweden University, Sundsvall, 2008a.

[Hellström 2008b]

Hellström L.M., Gradin P.A., Carlberg T., "A method for experimental investigation of wood chipping process" *Nord. Pulp paper Res. J.*, 23 (3), 339-342, 2008b.

[Hellström 2009]

Hellström L., Isaksson P., Gradin P. et al., "An analytical and numerical study of some aspects of wood chipping process" *Nord. Pulp paper Res. J.*, Accepted for publication, 2009.

[Herlufsen 1984]

Herlufsen H., *Dual Channel FFT Analysis, Part 1 and Part 2.*, Technical review B&K, n°1 et n°2, 1984.

[Hernández 1997a]

Hernández R., Lessard J., "Effect of cutting width and cutting height on the size distribution of the black spruce pulp chips produced by a chipper-canter" *Forest products journal*, 47 (3), 89-49, 1997a.

[Hernández 1997b]

Hernández R., Boulanger J., "Effect of the rotation speed on the size distribution of the black spruce pulp chips production by a chipper-canter" *Forest products journal*, 47 (4), 43-49, 1997b.

[Hewlett 1985]

Hewlett P., *The fundamentals of signal analysis*, Applications note 243, 1985.

[Hewlett 1986]

Hewlett P., The fundamentals of modal testing, Applications note 243-3, 1986.

[Hoadley 2000]

Hoadley R.B., "Understanding Wood", Revised edition, Taunton Press, ISBN 1561583588, 280 p., USA, 2000.

[Hoglund 1980]

Hoglund L.E., Quiet chipper development, *inter.noise* 80, 461 - 466, Miami, Florida, 1980.

[Holmberga 1999]

Holmberga S., Persson K., Petersson H., "Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials" *Computers & Structures*, 72, 459-480, 1999.

[Ishikawa 1985]

Ishikawa K., "What is Total Quality Control? The Japanese way", Prentice Hall Inc., 215 pages, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.

[ITEBE 2001a]

Itebe, Etat des lieux des logistiques de fourniture de plaquettes forestières en Europe, Programme Interreg II de promotion du bois énergie, Institut Technique Européen du Bois-Energie (ITEBE), Energie-bois Suisse, Planair, Lons le saunier, 40 pages, 2001a.

[ITEBE 2001b]

Itebe, Les chantiers expérimentaux de production de plaquette forestière, Programme Interreg II de promotion du bois énergie, Institut Technique Européen du Bois-Energie (ITEBE), Energie-bois Suisse, Planair, Lons le saunier, 23 pages, 2001b.

[Jensen 2004]

Jensen P.V., Mattsson J.E., Kofman P.D. et al., "Tendency of wood fuels from whole trees, logging residues and roundwood to bridge over openings" *Biomass and Bioenergy*, 26 (2), 107-113, 2004.

[Jeong 2002]

Jeong Y.H., Cho D.W., "Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine" *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42 (14), 1559-1566, 2002.

[Jones 2005]

Jones T.G., G.Song G., Richardson J.D., "Effect of chipper setting on chip size distribution and mechanical pulp properties" *Appita Journal*, 58 (1), 56-63, 2005.

[Juan 1992]

Juan J., "Comment bien usiner le bois", CTBA, 144 pages, Paris, 1992.

[Kaltschmitta 2006]

Kaltschmitta M., Webera M., "Markets for solid biofuels within the EU-15" *Biomass & bioenergy* 30 (11), 897-907, 2006.

[Kato 1971]

Kato K., Tsuzuki K., Asano I., "Studies on vibration cutting of wood" J. of Japan Wood Res. Soc. (JWRS), 17 (3), 57-65, 1971.

[Keays 1979]

J.V.Keays, History of wood chipping, "Chip Quality Monograph" J. V. Hatton, Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), Series No 5: 1979.

[Keller 1994]

Keller R., Chapitre 1. La constitution du bois, "Le bois-Matériau d'ingénierie" ARBOLOR, ISBN 2-907086-3: 14-89, 1994.

[Khan 2009]

Khan A.A., Jong W.D., Jansens P.J. et al., "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies" Fuel Processing Technology, 90 21 - 50, 2009.

[Kim 1999]

Kim T.Y., Woo J., Shin D. et al., "Indirect cutting force measurement in multi-axis simultaneous NC milling processes" International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39 (11), 1717-1731, 1999.

[Kim 1996]

Kim T.Y., Kim J., "Adaptive cutting force control for a machining centre by using indirect cutting force measurements" International Journal of Machine Tools & Manufacture, 36 (8), 926-937, 1996.

[Kivimaa 1950]

Kivimaa E., "Cutting forces in wood-working", Jukaisu Publication No. 18, 103 pages, The State Institute For Technical Research, Helsinki, 1950.

[Kivimaa 1952]

Kivimaa E., "Was ist die abstumpfung der holzbearbeitungswerkzeuge ?" Holz als Roh- und Werkstoff, 10 (11), 425-428, 1952.

[Kivimaa and Murto 1949]

Kivimaa E., Murto J.O., "Investigation on factors affecting chipping of pulpwood" State Inst. Tech. Res. Helsinki, Pub. 9 8-24, 1949.

[Klamecki 1979]

Klamecki B.E., "A review of wood cutting tool wear literature " European Journal of Wood and Wood Products, 37 (7), 265-276, 1979.

[Klamecki 1980]

Klamecki B.E., "Interaction of tool wear mechanisms in wood cutting" Wood Sc., 13 (2), 122-126, 1980.

[Klamecki 1976]

Klamecki B.E., "Friction mechanisms in wood cutting" Wood Science and Technology, 10 (3), 209-214, 1976.

[Koch 1964]

Koch P., "Wood machining processes. A volume in the wood processing series", Ronald press Co, 530 p., New York, 1964.

[Kollmann 1984]

Kollmann F.F.P., Côté W.A., "Principles of Wood Science and Technology: Solid Wood", Springer-Verlag, ISBN 0387042970, 592 p., 1984.

[Koran 1979]

Koran Z., "Tensile properties of spruce under different conditions" Wood and Fiber, 11 (1), 38-49, 1979.

[Korkut 2003]

Korkut I., "A dynamometer design and its construction for milling operation" Materials & design 24 (8), 631-637, 2003.

[LeBoeuf 1987]

Leboeuf G., Effect of chipper-canter cutterhead speed on chip quality, Res. Rept. No. 2573, Research centre of Domatar, Sennville, Québec, 84 Pages, 1987.

[Leney 1960]

Leney L., "Mechanism of veneer formation at the cellular level", College of Agriculture, University of Missouri, 111 Pages, Columbia, Mo, 1960.

[Levy 2006]

Levy S., Blandford N., Mayhead G., Of chips and logs - Making the most of local authority arboricultural arisings in the mersey belt, Forestry Commission, Redroseforest, England, 53 pages, 2006.

[Mamoun 1975]

Mamoun M.M., "On the theories of friction of solides" ASME Papers, Parts I, II, III, No. 75-DE-8, 75-DE-9, 75-DE-10, 1975.

[Marchal 1989]

Marchal R., Valorisation par tranchage et déroulage des bois de chênes méditerranéens, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy, 1989.

[Martin 1994]

Martin P., Sales C., Processus de coupe et la scie à ruban, "Le bois - Matériau d'ingénierie" ARBOLOR, ENGREF, ISBN 2-907086-07-3: 290 - 363, 1994.

[Mattsson 2002]

Mattsson J.E., Kofman P.D., "Method and apparatus for measuring the tendency of solid biofuels to bridge openings" Biomass and Bioenergy, 22 (3), 179-185, 2002.

[Mattsson 2003]

Mattsson J.E., Kofman P.D., "Influence of particle size and moisture content on tendency to bridge in biofuels made from willow shoots" Biomass and Bioenergy, 24 (6), 429-435, 2003.

[McKenzie 1961]

Mckenzie W.M., Fundamental analysis of the wood cutting process, PhD thesis, University of Michigan, Department of wood technology, Ann Arbor, Michigan, 1961.

[McKenzie 1962]

Mckenzie W.M., "The relationship between the cutting properties of wood and its physical and mechanical properties" Forest products journal, 11 287-294, 1962.

[McKenzie 1967]

Mckenzie W.M., The basic wood cutting process, Proceeding of the 2nd International Wood Machining Seminar (IWMS 2), 3-8, University of California, 1967.

[McKenzie 1968]

Mckenzie W.M., Karpovich H., "The Frictional Behaviour of wood" Wood Science and Technology, 2, 139-152, 1968.

[Mckenzie 1970]

Mckenzie W.M., "Chipping for pulp production" Aust. Timber J., 21-31, May, 1970.

[McKenzie 2001]

Mckenzie W.M., Cvitkovic R., Ringler M., "Towards a model predicting cutting forces and surface quality in routing layered boards" Wood science and technology 35 (6), 563-569, 2001.

[McLauchlan 1979]

Mclauchlan T.A., Lapionte J.A., Chapter 2. Production of chips by disc chipper "chip quality monograph" Hatton J.V., TAPPI series No.5: 15-32, 1979.

[Mishiro 1984a]

Mishiro A., Asano I., "Mechanical properties of wood at low temperatures. Effect of moisture content and temperature on the bending properties of wood. I. Moisture content below the fiber-saturation point" Mokuzai Gakkaishi, 30 (3), 207-213, 1984a.

[Mishiro 1984b]

Mishiro A., Asano I., "Mechanical properties of wood at low temperatures. Effect of moisture content and temperature on the bending properties of wood. II. Moisture content beyond the fiber-saturation point" Mokuzai Gakkaishi, 30 (4), 277-286, 1984b.

[Mishiro 1990]

Mishiro A., "Effect of freezing treatment on the bending properties of wood" Mokuzai Gakkaishi, 82, 177-189, 1990.

[Monico 1979]

Monico J.A., Soule H.M., A machine to harvest and chip brush stands, The 1979 Winter Meeting - American Society of Agricultural Engineers, PAPER NO. 79-1595, 13 pages, New Orleans, LA, 1979.

[Movassaghi 1985]

Movassaghi E., Influence des paramètres microdensitométriques du bois sur les efforts de coupe et la qualité des plaquages obtenus de Douglas et de Chataigner obtenus par déroulage, Thèse de Docteur-Ingénieur, INPL, Nancy, 1985.

[Murase 1980]

Murase Y., "Frictional properties of wood at high sliding speed" Mokuzai Gakkaishi, 36 (2), 61-65, 1980.

[Negri 1997]

Negri M., Relationship between power measurement and some properties of different wood species, Proceedings of the 13th international wood machining seminar (IWMS 13), pp 523, University of British Columbia, Vancouver, Canada, June 17-20, 1997.

[NF B 51-004]

Norme A.F.N.O.R., Bois; Détermination de l'humidité, Association Française de Normalisation, septembre 1985.

[NF E66-504]

Norme A.F.N.O.R., Angles des outils coupant, Formules de conversion liant les angles de l'outil et les angles en travail, Association Française de Normalisation, décembre 1993.

[NF E66-504]

NF E66-504, Association Française de Normalisation.

[NF E66-507]

Norme A.F.N.O.R., Grandeur de base en usinage et rectification - Force, énergie et puissance, Association Française de Normalisation, juin 1985.

[NF ISO 2591-1]

Norme A.F.N.O.R., Tamisage de contrôle, Modes opératoires utilisant des tamis de contrôle en tissus métalliques et en tôles métalliques perforées, Association Française de Normalisation, septembre 1989.

[NF ISO 3310-2]

Norme A.F.N.O.R., Tamis de contrôle; Exigence techniques et vérifications, Association Française de Normalisation, décembre 1999.

[ÖNORM M 7133]

Holzhackgut für energetische zwecke, Anforderungen und Prüfbestimmungen, Austrian Standards Institute, Vienna, Austria, 1998.

[Papworth 1966]

Papworth R.L., Erickson J.R., "Power requirements for producing wood chips" Forest products journal, 16 (10), 31-36, 1966.

[Papworth 1968]

Papworth R.L., Johnson K.R., "Power requirement for producing wood chips with a parallel knife chipper" Forest products journal, 18 (10), 42-44, 1968.

[Rogers 1948]

Rogers H.W., "The wood chipper" *The Paper Industry and Paper World*, 883-888, September, 1948.

[Rougié 2009]

Rougié A., Analyse et conception d'un outil de coupe pour la valorisation des sous produits d'élagage des haies - Démarche intégrée d'innovation et de prototypage, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, Epinal, 2009.

[Rowell 2005]

Rowell R.M., "Handbook Of Wood Chemistry And Wood Composites", CRC Press Inc, ISBN 0849315883, 487 p., USA, 2005.

[Schoch 2004]

Schoch W., Heller I., Schweingruber F.H. et al., "Wood anatomy of central European Species", Visité le 18/11/2009, www.woodanatomy.ch, 2004.

[Scholz 2009]

Scholz F., Duss M., Hasslinger R. et al., Integrated model for the prediction of cutting forces, Proceedings of the 19th International Wood Machining Seminar (IWMS-19), Faculty of science and technology, Nanjing forestry university, 183-190, Nanjing, China, Oct. 21-23, 2009.

[Sinn 2005]

Sinn G., Zettl B., Mayer H., "Ultrasonic-assisted cutting of wood " *Journal of Materials Processing Technology*, 170 (1-2), 42-49 2005.

[Spiewak 1995]

Spiewak S.A., "Acceleration based indirect force measurement in metal cutting processes" *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 35 (1), 1-17, 1995.

[Spinelli 2001]

Spinelli R., Hartsough B., "A survey of Italian chipping operations" *Biomass and Bioenergy*, 21 (6), 433-444, 2001.

[Stewart 1969]

Stewart H.A., "Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components, and cutting friction coefficient" *Forest products journal*, 19 (3), 43-46, 1969.

[Stewart 1986]

Stewart H.A., "High temperature corrosion of tungsten carbide from machining medium density fiberboard" *the carbide and tool Journal*, 18 (1), 2-7, 1986.

[Stokes 1978]

Stokes B.J., Watson W.F., Sirois D.L., Factors affecting power requirements for chipping whole trees, the 1987 Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, ESAE, Paper No. 87-6012 Baltimore, Maryland, June 28 - July 1, 1978.

[Stuart 1992]

Stuart W.B., Leary P.S., Factors affecting sawmill residue chip quality, TAPPI 1991 pulping conference (1991) TAPPI, Norcross, GA, 75 (7): 129-132, ETATS-UNIS, 1992.

[Sugiyama 1981]

Sugiyama S., Matsuo F., "Effect of cutting velocity on cutting phenomenon, cutting force, and frictional coefficient in orthogonal cutting of wood" Journal of the Japan Wood Research Society (JWRS), 27 (312), 863-872, 1981.

[Szymani 1975]

Szymani R., Dickinson F.E., "Recent developments in wood machining processes: Novel cutting techniques " Wood Science and Technology, 9 (2), 113-128, 1975.

[Thoms 1984]

Thoms C.E., Etude bibliographique des facteurs influençant les efforts de coupe dans l'usinage du matériau bois, DEA en science du bois, Université de Nancy1, U.E.R Science de la Matière, Nancy, 1984.

[Tolfts 2006a]

Tolfts A., Woodchip production from tree surgery arisings in Croydon, BioRegional development group, Wallington - UK, 20 pages, 2006a.

[Tolfts 2006b]

Tolfts A., Biomass fuel assessment for the Z-squared combined heat and power plant, BioRegional development group, Wallington - UK, 106 pages, 2006b.

[Tounsi 2000]

Tounsi N., Othob A., "Dynamic cutting force measuring " International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40 (8), 1157-1170 2000.

[Triboulot 1981]

Triboulot P., Application de la mécanique de la rupture aux bois massifs considères comme matériaux de construction, Thèse de doctorat, Université de Metz - Faculté des sciences, Metz, 1981.

[Twaddle 1992a]

Twaddle A.A., Watson W.F., Quantification of factors affecting chip quality from disc chipper, TAPPI (1991) International paper physics conference, TAPPI, Norcross, GA, 75 (10): 135-140, ETATS-UNIS, 1992a.

[Twaddle 1992b]

Twaddle A., Wagner F.G., "Survey of disc chippers in roundwood chipping yards of southeastern United States" Tappi Journal, 75 (12), 77-81, 1992b.

[Twaddle 1992c]

Twaddle A.A., Watson W.F., "Shortwood vs. longwood chipping: what impact on chip distribution ?" Tappi Journal, 75 (6), 107-111, 1992c.

[Twaddle 1992d]

Twaddle A.A., Watson W.F., Survey of disc chippers in roundwood chipping yards of southeastern United States, TAPPI pulping Conferene (1990), TAPPI, Norcross, GA, 75 (12): 77-81, Atlanta, ETATS-UNIS 1992d.

[Twaddle 1997]

Twaddle A., "The influence of species, chip length, and ring orientation on chip thickness" Tappi Journal, 80 (6), 123-131, 1997.

[Uhmeier 1993]

Uhmeier A., Experimental and numerical analysis of chipping and also pressure impregnation of wood, Licentiate Thesis, Dept. of Paper Tech., Royal Institute of Technology, Stockholm, 1993.

[Uhmeier 1995]

Uhmeier A., "Some fundamental aspects of wood chipping" Tappi Journal, 78 (10), 79-84, 1995.

[Uhmeier 1997]

Uhmeier A., "Numerical analysis of wood chipping" Holzforschung, 51 (1), 83-90, 1997.

[UN 2003]

United-Nations, Economic Commission for Europe Timber Committee Forest Products Statistics 1999–2003, 2003.

[Vares 2005]

Vares V., Kask U., Soosaar S. et al., "Manual for biofuel users", Tallinn University of Technology, Financed by the Nordic Council of Ministers, ISBN 9985-59-596-3, 178 pages, 2005.

[Voskresenski 1955]

Voskresenski S.A., "Rezanie Devesiny" (Wood Cutting), Govt. Forestry Printing Office, Moscow, 1955.

[Walker 2006]

Walker J.C.F., "Primary wood processing: principles and practice", Springer, 2nd edition, ISBN: 978-1-4020-4392-5, 596 p., University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2006.

[Wood-Handbook 1999]

Wood-Handbook, "Wood as an engineering material", U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 463 P., Madison, Wisconsin, USA, 1999.

[Woodson 1970]

Woodson G.E., Koch P., Tool Forces and Chip Formation In Orthogonal Cutting Of Loblolly Pine, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, Res. Pap. SO-52, 29 p., 1970.

[Zhengping 2002]

Zhengping G., Ruizhen S., "Factors affecting design parameters of disc branch chipper with short knives" *Journal of Beijing Forestry University*, 24 (5/6), 183-186, 2002.

*Annexe A. Désignations complémentaires sur
l'opération de déchetage*

A.1 Angles de coupe secondaires :

En usinage du bois classique, il y a plusieurs angles secondaires qui définissent la position de l'arête tranchante. Ces angles sont bien décrits par la norme NF E66-504 [NF E66-504]. J'ai choisi les angles qui pourront être appliqués sur les systèmes de déchiquetage. Il y avait quelques modifications à faire pour que ces angles conviennent à la conception des déchiqueteuses à disque.

L'utilisation de ces désignations intervient en cas de modification de la conception actuelle des systèmes de déchiquetage, si ce n'est pas dans les travaux de cette thèse, elles seront utiles pour le futur travail. Parmi les angles secondaires on peut citer les deux suivants :

- Angle de l'inclinaison d'arête (λ).
- Angle de direction d'arête (χ).

Ses angles assurent une pénétration progressive du couteau dans le bois. L'opération de déchiquetage par un tambour rassemble à l'opération de coupe par une toupie (par exemple) c'est pour ça j'ai illustré les angles secondaires comme ses visible dans la Figure A-1-(1). Concernant le système de déchiquetage à disque la situation est différent, puisque le disque ne se ressemble pas à aucun autre outil d'usinage bois, il y avait une nécessité de proposer une nouvelle définition, qui est illustrée dans la Figure A-1-(2).

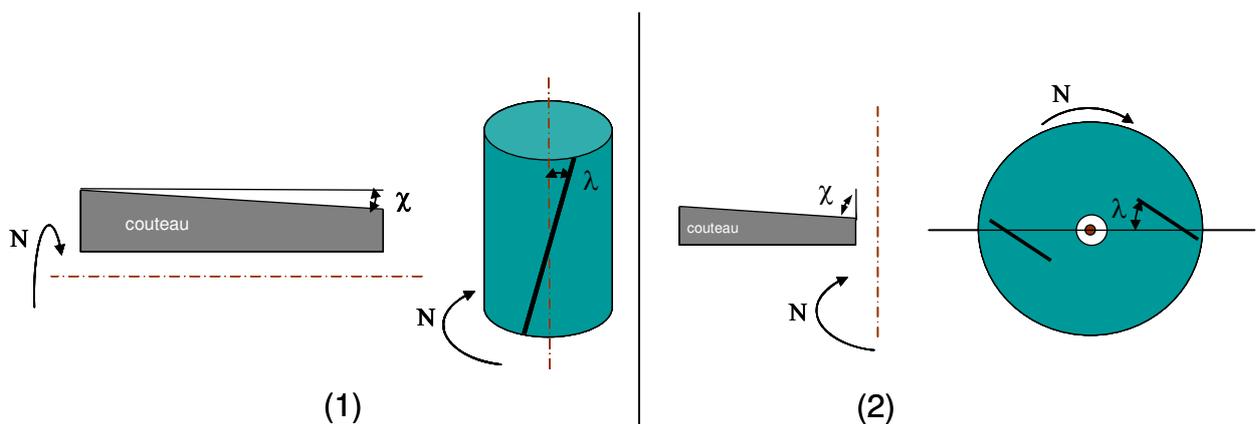


Figure A-1. Des angles secondaires pour le système tambour, et pour celui à disque

A.1.1 Plans de références :

La norme NF E66-504 [NF E66-504] désigne plusieurs planes de référence pour la définition et la détermination des angles de l'outil coupant. Le système de référence de l'outil à main est

utile pour la spécification de la géométrie de coupe et les angles des couteaux. Le système de référence de l'outil à main est toujours appliqué sur un point choisis de l'arête de coupe. Les plans de référence sont illustrés dans la Figure A- 2 :

Plan de référence (Pr)	Perpendiculaire au point considéré de l'arête et contenant l'axe de l'outil ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil.	
Plan conventionnel (Pf)	Perpendiculaire au plan de référence de l'outil au point considéré de l'arête et parallèle à la direction supposée d'avance de l'outil.	
Plan de l'arête de l'outil (Ps)	Tangent à l'arête au point considéré et perpendiculaire au plan de référence.	
Plan normal (Pn)	Normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré.	
Plan orthogonal de l'outil (Po)	Perpendiculaire au plan de référence et au plan d'arête, au point considéré de l'arête.	
Plan vers l'arrière de l'outil (Pp)	Perpendiculaire au plan de référence de l'outil et au plan de travail conventionnel au point considéré de l'arête.	

Figure A- 2. Plans de référence illustrés sur un tambour [Barette 2006]

Grâce à ces plans, les angles secondaires sont désignables précisément, si on prend par exemple l'angle d'inclinaison de l'arête de coupe (λ) sur un système de déchetage à tambour, c'est l'angle est formé entre le plan de référence (**Pr**) et l'arête de coupe, et parce que cet angle est mesuré dans le plan (**Ps**) il s'appelle (λ_s) (Figure A- 3).

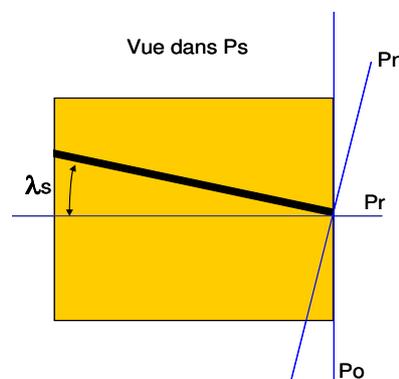
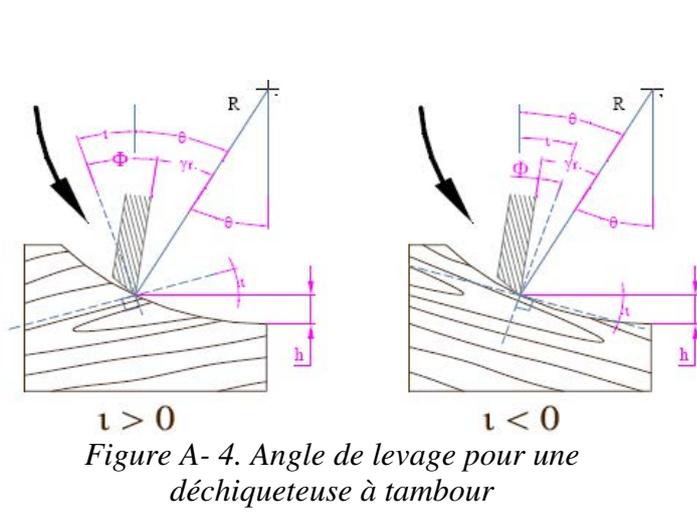


Figure A- 3. L'angle de l'inclinaison de l'arête sur un tambour

A.1.2 Angle de levage Φ :

Lorsque le couteau est engagé dans la matière, sa face de coupe fait un angle avec les fibres du bois, c'est l'angle de levage. Cet angle n'est pas mesurable sur l'outil car il est en fonction de l'angle de coupe, de l'orientation des fibres et de la trajectoire de l'outil. En usinage de bois plus cet angle est élevé, plus le risque d'apparition d'éclat est important. La diminution de l'angle de coupe ou le changement de type d'usinage amènent à diminuer cet angle, en sachant que la diminution de l'angle de coupe a pour effet d'augmenter la composant normale de l'effort de coupe [Boucher 2007].

Pour un couteau de déchiqueteuse à tambour cet angle est calculable par la formule suivante :



$$\Phi = \gamma_f - \theta - \tau$$

équation A- 1. Angle de levage

Avec : $\theta = \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)$

(γ_f): Angle de coupe,
 (θ) : Angle de d'engagement de l'outil,
 (h) : Profondeur de passe,
 (τ) : Angle d'inclinaison du fil du bois

Dans la coupe par une déchiqueteuse à disque, l'arête tranche le bois en bout, dans ce cas il n'existe pas réellement d'angle de levage de bois, parce que la trajectoire du couteau est quasiment rectiligne. Dans ce système, l'angle formé entre la face de coupe et le fil du bois est plutôt appelé l'angle de coupe réel (γ_r), regarde la Figure III-21.

A.2 Mouvement de coupe pour une déchiqueteuse à tambour:

A.2.1 Modes du travail :

Il y a deux types de mouvement selon la direction d'avance du bois par rapport au sens de rotation de l'outil, lorsque le mouvement d'avance du bois s'oppose à la trajectoire de l'arête on dit que le travail s'effectue en opposition, si l'avance se fait dans le même sens le travail s'effectue en avalant.

Le travail en opposition demande un effort de coupe plus faible qu'en avalant. L'effort croît de zéro à sa valeur maximum pour chaque couteau. Tandis que le travail en avalant permet de travailler avec des vitesses d'amenage plus rapide, et le travail se réalise avec moins de vibration [Martin 1994]. La déchiqueteuse à tambour travaillent plutôt en avalant, tandis que la déchiqueteuse à disque ne joint ni le travail en opposition ni celui en avalant, c'est parce que l'arête du couteau se déplace dans un seul plan.

A.2.2 Équations temporelles de la trajectoire du couteau :

Dans la mesure où on connaît les mouvements du couteau et de la pièce du bois, il est possible de définir les équations temporelles du point caractérisant de la trajectoire du couteau, en considérant (t) le temps en secondes, (R) le rayon de coupe en mm, (V_f) la vitesse d'amenage en mm/s, (ϖ) le taux de rotation en rad/s, (N) la vitesse de rotation en tr/s.

Pour une déchiqueteuse à tambour (Figure A- 5), Les coordonnées de l'arête de coupe au point M caractérisées dans le repère (O, U, V) s'écrivent par les équation A- 2 . Les équations sont établies pour un cas de travail en avalant, conformément au fonctionnement de déchiqueteuses.

$$\text{équation A- 2, } \begin{cases} U_M(t) = V_f \cdot t - R \cdot \sin(\varpi \cdot t) \\ V_M(t) = -R \cdot \cos(\varpi \cdot t) \\ \varpi = 2 \cdot \pi \cdot N \end{cases}$$

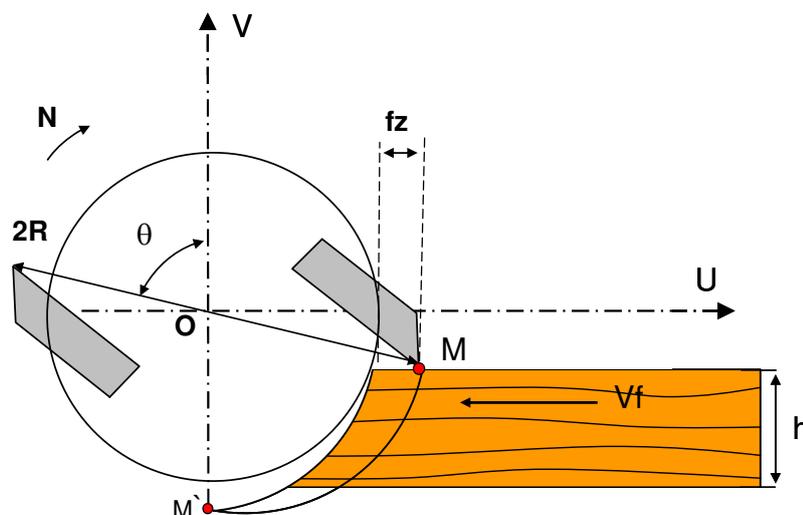


Figure A- 5. Mouvement du couteau et la section du bois par une déchiqueteuse à tambour

A.3 Formation de copeau en avalant lors de la coupe rotative

Ce mode de coupe est similaire à celui de la déshiqueteuse à tambour sauf que l'épaisseur de copeaux est plus petite en comparaison avec celles des plaquettes. Durant le processus on peut distinguer une variation continue de l'épaisseur de copeau et de l'orientation de l'effort de coupe total qui sont très influents sur la formation du copeau.

Juan [Juan 1992] explique la formation de copeau dans ce mode en tenant compte la théorie de Franz. La quasi-totalité des copeaux produits dans ce mode de coupe sont de type II. Plusieurs conditions sont présentes pour que la coupe se fasse par compression comme la composante normale de l'effort de coupe négative et le copeau épais (Figure A- 6).

En rabotage quand l'arête de coupe arrive à la fin de la trajectoire, le copeau devient très mince ce qui peut générer des copeaux par flambage (copeau de type III)¹⁶.

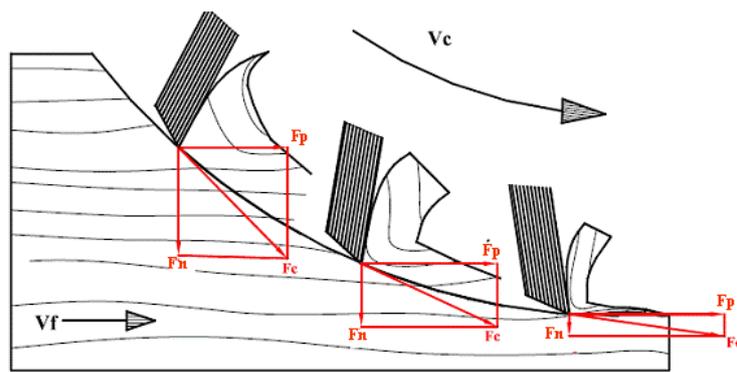


Figure A- 6. La formation de copeau en avalant pendant la coupe rotative [Boucher 2007]



¹⁶ Lors de la coupe rotative en opposition les trois types de la formation de copeau (III, II, I) apparaissent successivement dans un chaque cycle d'usinage.

*Annexe B. Déchiqueteuses utilisées dans
l'industrie*

Deux systèmes sont utilisés pour produire les plaquettes :

B.1 Canter de scierie :

Le canter est aussi appelé Slabber, elle se présente comme un disque tronconique muni de couteaux, dont l'axe de rotation est perpendiculaire à l'axe de déplacement de la grume. Le concept du canter permet de transformer directement en plaquettes les chutes de sciage dès leur production, ce qui améliore la productivité et facilite l'évacuation des chutes de sciage, en même temps une première surface de référence pour le sciage sera aussi créée (Figure B- 1). Les plaquettes produites sont principalement destinées aux industries papetières, s'elles sont de bonnes qualités, si non elles seront vendues pour l'industrie de panneaux ou celle du bois énergie. De ce fait, le canter n'est pas un matériel de production en soi, mais constitue un organe fondamental d'un système de production performant, elle est placée en avant des scies de tête (scie à ruban) ou en entrée des lignes de sciage (scies circulaires).

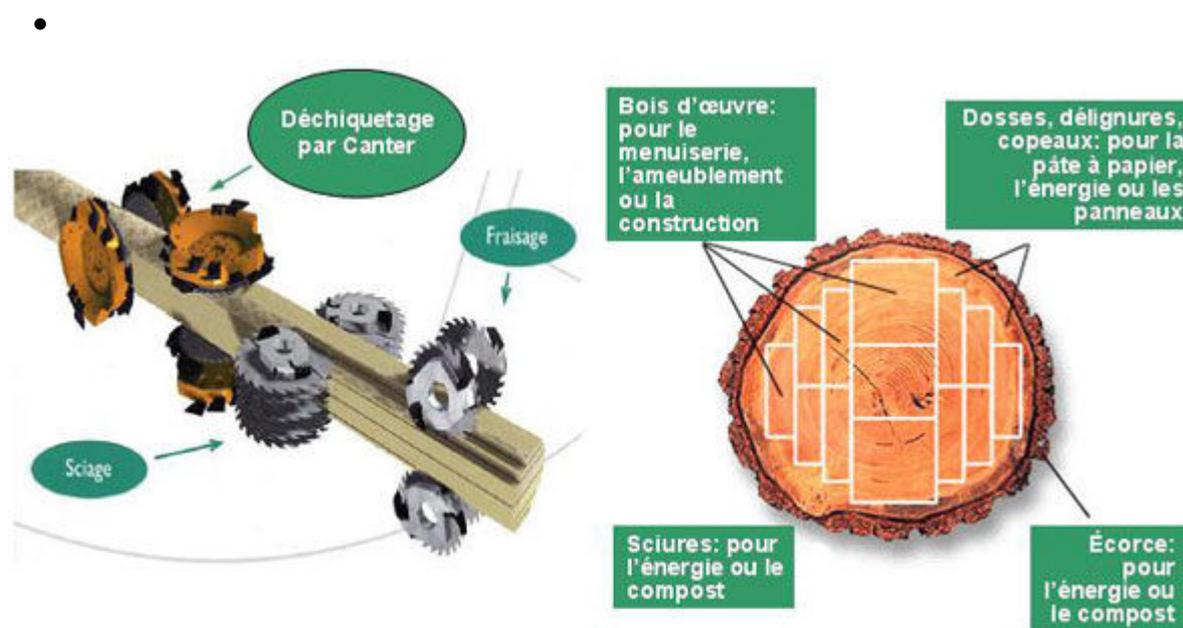


Figure B- 1. Rôle du canter dans la ligne de production d'une scierie

Il y a trois types de canters selon leurs conceptions de point vue agencements des outils de coupe [CTBA 2001], [Gerhard 2005] :

B.1.1 Disposition spiralée :

Les couteaux sont disposés sur une spirale développée sur le long du cône, ce qui pour effet de produire des copeaux de dimensions constante, de régulariser l'effort de coupe et d'atténuer le niveau de bruit. Les couteaux coupent le bois le long des fibres (0- 90) comme le

montre la (Figure B- 2), pour chaque plaquette produite la longueur et l'épaisseur sont uniforme pendant que la largeur est variable. C'est possible d'ajouter une scie de coupe circulaire sur la face de coupe centrale pour rendre la coupe plus précise avec une surface de coupe meilleure. Le désavantage de ce type d'équarrisseuse-déchiqueteuse que la vitesse d'amenage est de l'ordre de 50 m/min, pour qu'on puisse augmenter la vitesse d'amenage il faut ajouter une spirale de couteaux, cela rend donc leur adaptabilité réduite.

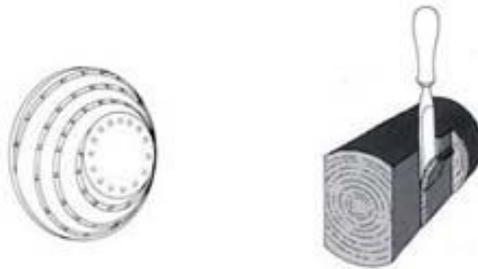


Figure B- 2. Canter à disposition spiralée de couteaux avec l'action du couteau [CTBA 2001]

B.1.2 Disposition étage :

Les couteaux sont disposés sur 4 à 5 étages, à raison de 3 à 6 couteaux par étage, qui agissent transversalement aux fibres de bois, la surface est réalisée avec les couteaux (Figure B- 3). Cette disposition permet d'atteindre le plus haut niveau d'avance du bois (plus de 100 m/min)



Figure B- 3. Canter à disposition étagée des couteaux et les actions de couteaux [CTBA 2001]

Quand ce type d'équarrisseuse-déchiqueteuse est équipé par une scie circulaire la surface de coupe est meilleur, mais le pourcentage de sciure est plus importante (jusqu'à 15% des copeaux en masse), ce type est utilisé pour le bois nouveau ou tordus.

B.1.3 Disposition radiale :

Premiers type d'équarrisseuse-déchiqueteuse apparus, même ils sont les plus utilisés à ce jour. Les couteaux plus longs sont répartis d'une manière régulière sur la génératrice du tronc de cône, ce qui facilite leur maintenance. Le nombre des couteaux varie de 2 à 6 selon l'épaisseur désiré pour les plaquettes, la vitesse d'amenage du bois et la vitesse de rotation de

l'équarrisseuse. La vitesse d'amenage avec ce type est de l'ordre de 50 100 m/min. avec ce type les copeaux coupe le bois perpendiculairement aux fibres.

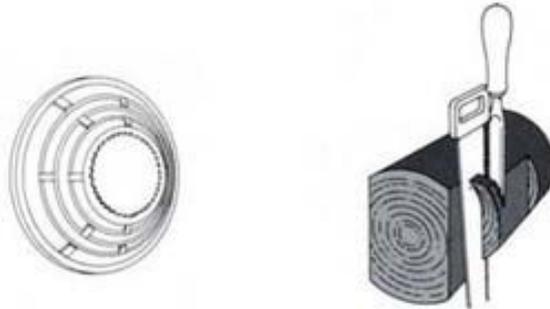


Figure B- 4. Canter à disposition étage équipé d'une scie circulaire avec l'action des copeaux et de la scie sur la grume [CTBA 2001]

Un état de surface de coupe est bien meilleur quand l'équarrisseuse-déchiqueteuse est équipé par une scie circulaire. Des plaquettes mieux calibrées peuvent être obtenue par l'utilisation de copeaux courbes.



Figure B- 5. Canter à disposition radial des copeaux avec leurs actions sur la grume [CTBA 2001]

Plusieurs études ont été menées pour améliorer la forme et le granulométrie des plaquettes, et bien la qualité de surface du bois scié (rugosité, lissé) avec les différents conditions de coupe possible, ce qui a donné beaucoup d'améliorations sur les différents conception cités, comme d'ajouter des mini copeaux de finition, modifier la forme des copeaux et leurs positionnements sur la surface du cône (Figure B- 6).

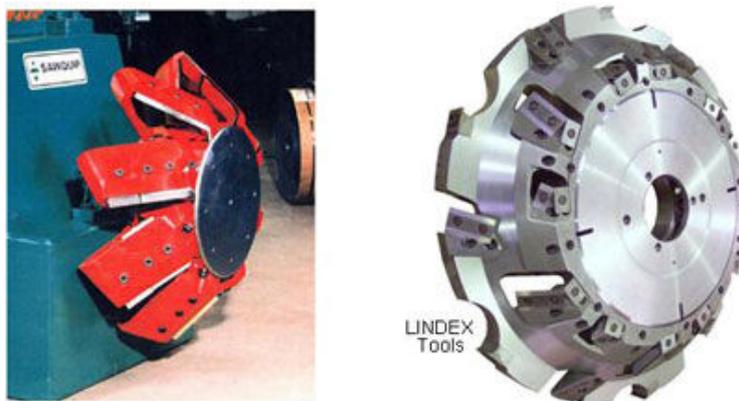


Figure B- 6. Deux conceptions modifiées de canters

B.2 Déchiqueteuse fixes à disque ou à tambour:

La plupart des usines de pâte à papier et des panneaux de particules utilisent ce type de matériel pour transformer les grumes écorcées en plaquettes. Dans une déchiqueteuse à tambour, les couteaux sont disposés longitudinalement sur la face du tambour Figure B- 7- (A), (B). Dans une coupeuse à disque, les couteaux sont disposés radialement sur la face du disque Figure B- 7-(C). Ces deux types de coupeuses sont soit à alimentation horizontale, soit à alimentation par gravité. L'alimentation horizontale d'une déchiqueteuse nécessite un système d'entraînement des bois par rouleaux ; par gravité, elle contraint à des longueurs uniformes de rondins. Le déchiquetage de bois d'une longueur supérieure à 3 m nécessite toujours une alimentation horizontale.

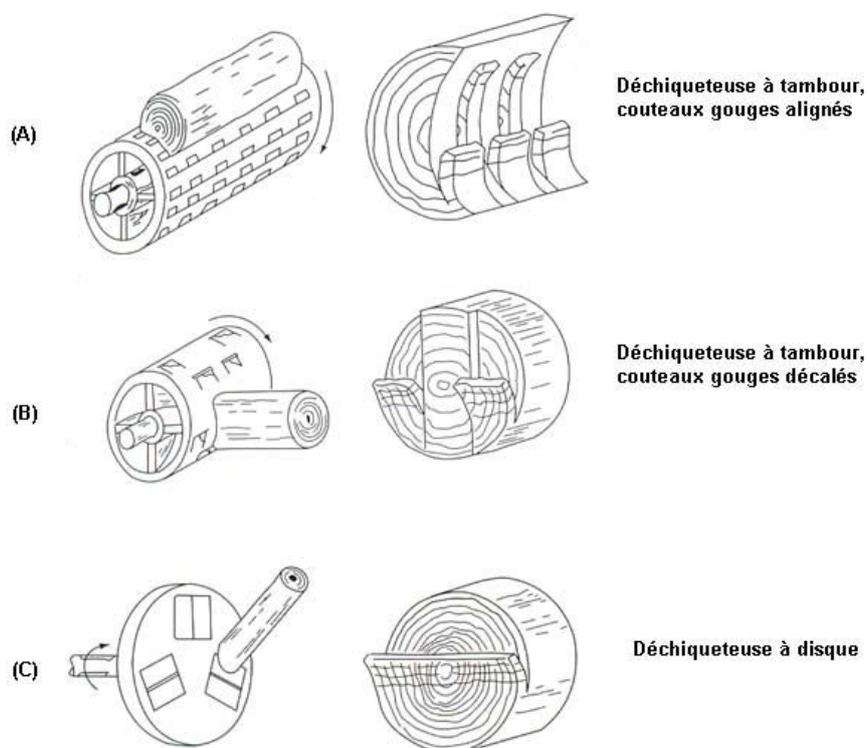


Figure B- 7. Illustration de différents types de déchiqueteuses [Deschênes 1986]

Les déchiqueteuses Les plus courantes sont celles à disques, produisant des plaquettes parallélépipédiques rectangles aux extrémités biseautées. Leur longueur varie, suivant le réglage des machines, entre 10 et 30 mm et leur épaisseur entre 5 et 20 mm. la conception de base de la coupeuse à disque (la déchiqueteuse Wigger) a été inventée en 1889 [Keays 1979]. Les déchiqueteuses à disque utilisées actuellement (Figure B- 8) ont eu des améliorations par rapport à la déchiqueteuse Wigger. Ses machines sont généralement fixées dans l'usine à cause de leur poids et leur taille, le diamètre du disque est varié entre 1219 mm et 4445 mm,

pendant que son épaisseur varie entre 102 mm et 254 mm. Ses déchiqueteuses sont souvent actionnées par des moteurs électriques afin de faire tourner le disque à une vitesse qui peut varier entre 300 et 900 tr/min. Le système à disque est utilisé également dans le domaine de bois – énergie pour transformer les grumes et les branches en plaquettes, une analyse plus détaillée sur sa conception et celle du tambour est envisagé dans le paragraphe IV.2.3.

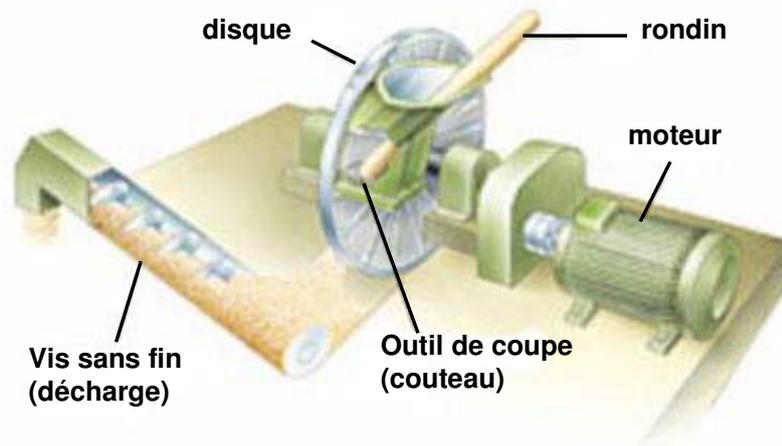


Figure B- 8. Déchiqueteuse à disque – alimentation par gravité [Hellström 2008a]

B.2.1 Conceptions spéciales :

Des modifications spécifiques ont été apportées à la conception des déchiqueteuses à tambour ou celui à disque par certains fabricant. Concernant les déchiqueteuses à tambour, on peut désigner les déchiqueteuses diablo (V-drum), leur conception est similaire à celle des canters de scierie, c'est comme si deux canters ont été collés l'un en face de l'autre. Ça veut dire, au lieu de seulement déchiqueter les dosses, le tambour diablo déchiquète tout l'intégralité de la grume (Figure B- 9).

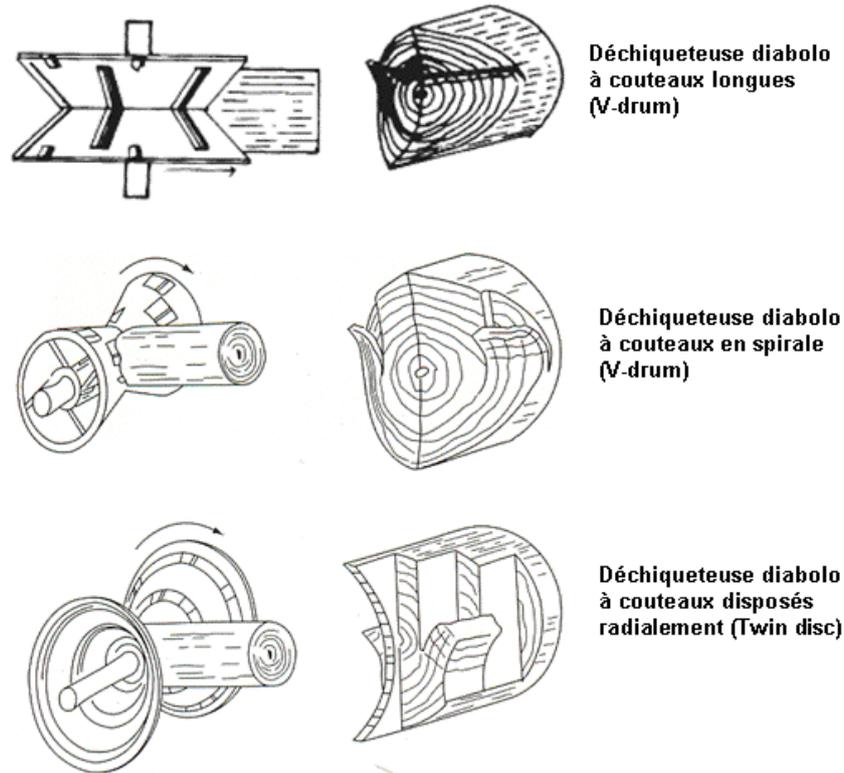


Figure B- 9. Déchiqueteuses à tambour diabolo [FAO 1976]

Concernant les déchiqueteuses à disque, on peut citer la conception du disque Norman. Selon Engelgau [Engelgau 1978] et McLauchlan [McLauchlan 1979] cette conception à alimentation par gravité est parmi les meilleurs, si l'homogénéité des plaquettes et la consommation d'énergie sont prises en compte. Dans les déchiqueteuses classiques à aménagement par gravité, le bois à couper entre la déchiqueteuse via la trémie d'alimentation par une vitesse loin d'être constante. La configuration de coupe idéale est montrée dans la Figure B- 10-(B), c'est grâce au bon angle de traction et à la face spéciale du disque, la surface du rondin qui vient d'être coupé par un couteau, reste en contact avec la surface du disque, le couteau suivant ne coupe pas tant que le rondin n'a pas avancé d'une valeur équivalente de la longueur d'une plaquette soit $(h/\sin\epsilon)$. En pratique, c'est seul le disque de type Norman qui peut réaliser cette exigence.

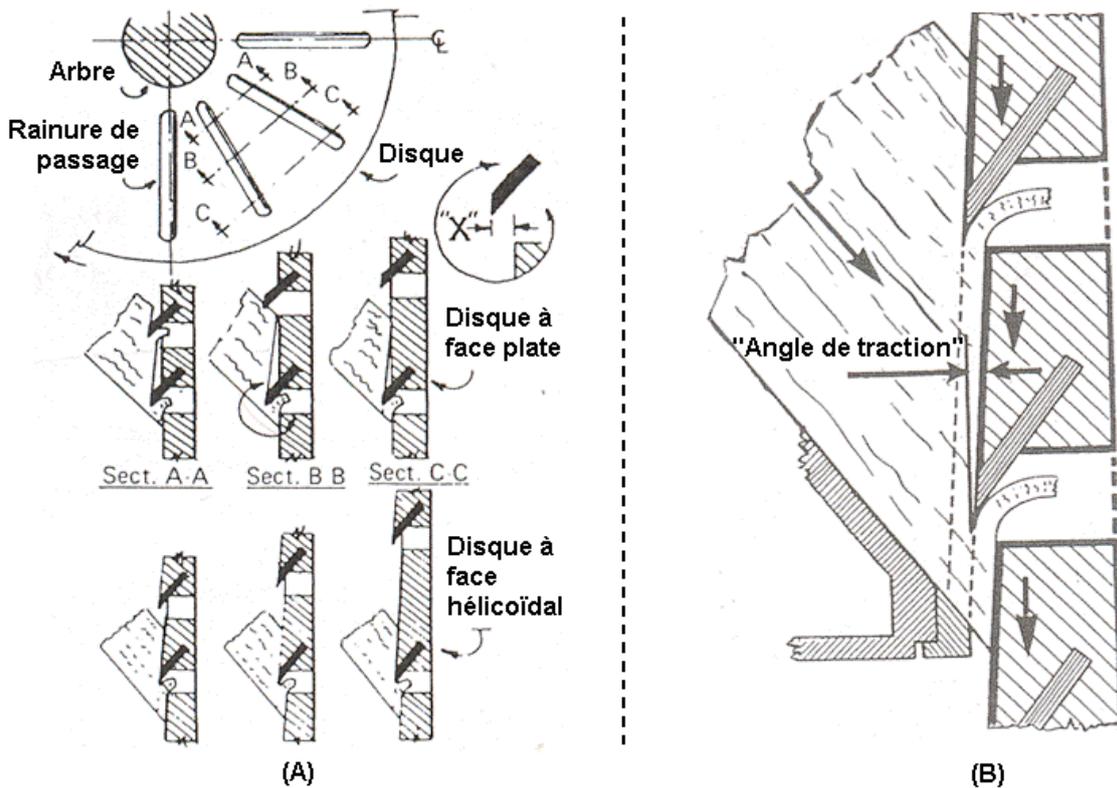


Figure B- 10. Disque de type “Norman” :

(A) – comparaison avec un disque traditionnel [Engelgau 1978]

(B) – esquisse du disque Norman montre l'alimentation continue [McLauchlan 1979]

Les couteaux inclinés et la face spirale du disque Norman, permettent de diminuer progressivement l'angle de traction de sa valeur maximale (Figure B- 10-(A): sect. A.A) à une valeur minimal à coté de la périphérique du disque (Figure B- 10-(A): sect. C.C), où la vitesse de coupe est la plus importante. Par conséquent, tous les points du couteau et celles de la face spirale ont une vitesse égale à celle de l'aménage. Le résultat est les suivant : un contact permanent entre le bois et la face du disque, ce qui permet de mieux contrôler la direction de l'aménage, la vitesse de l'aménage, ce que veut dire des bonnes conditions pour produire des plaquettes homogènes.



*Annexe C. Mesure expérimentale des fonctions
de réponse en fréquence*

L'analyse modale est une méthode expérimentale permettant d'étudier le comportement dynamique de structures réelles. Elle est basée sur la mesure des fonctions de réponse en fréquence **FRF**. Cette méthode a été utilisée dans les travaux de cette thèse afin d'étalonner dynamiquement l'effort des coupe mesuré (§ VI.6). Nous indiquons dans les paragraphes suivants les règles à respecter pour mesurer des **FRF** décrivant correctement le comportement dynamique d'une structure. Cette annexe a été extraite de la thèse d'Auchet [Auchet 2004b].

C.1 Définition

La structure à étudier, dont le comportement est supposé linéaire, est soumise à une excitation connue e_n selon le degré de liberté n au point N. Un capteur, placé en L, mesure la réponse r_l du degré de liberté l . L'excitation et la réponse doivent être mesurées très précisément bien que ces deux grandeurs soient souvent de nature très différente (force, déplacement, vitesse, accélération, tension délivrée par un capteur inductif, tension de commande d'un électroaimant).

Une excitation quelconque $e_n(t)$ peut être considérée comme une succession continue d'impulsions $f(t_n)$, comme le montre la Figure C - 1.a [Ewins 2000].

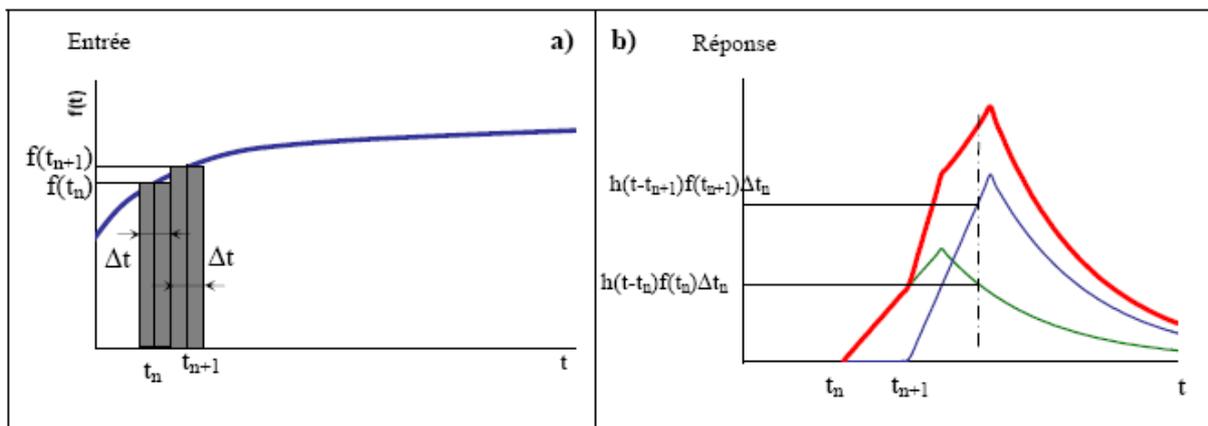


Figure C - 1. a) Suite continue d'impact b) Réponse

La réponse d'une structure à comportement linéaire au point L (en rouge sur la Figure C - 1.b) est la somme des réponses aux impulsions $h_{ln}(t)$ (en vert et en bleu) subies par la structure aux différentes dates τ . Elle a pour expression :

$$\text{équation C - 1,} \quad r_l(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_{ln}(t - \tau) e_n(\tau) d\tau$$

L'équation C - 1 correspond à un produit de convolution entre le signal d'entrée $e_n(t)$ et la réponse impulsionnelle de la structure $h_{ln}(t)$, noté conventionnellement $r_l(t) = h_{ln}(t) * e_n(t)$. L'algèbre de convolution étant difficile à manipuler, le passage dans le domaine fréquentiel s'impose en utilisant la transformée de Fourier, définie par l'expression analytique :

$$\text{équation C - 2,} \quad F(f(t))(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{avec } \omega = 2\pi / t$$

La transformée de Fourier d'un produit de convolution de deux fonctions temporelles $h_{ln}(t)$ et $e_n(t)$ se résume à une multiplication simple des deux transformées de Fourier $H_{ln}(j\omega)$ et $E_n(j\omega)$ de ces fonctions :

$$\text{équation C - 3,} \quad R_l(j\omega) = F(r_l(t))(j\omega) = F(h_{ln}(t) * e_n(t))(j\omega) = H_{ln}(j\omega) \cdot E_n(j\omega)$$

Cette simplification dans le traitement du produit de convolution justifie le passage dans le domaine fréquentiel.

La transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle de la structure $H_{ln}(j\omega)$ est la fonction de réponse en fréquence (**FRF**) permettant de calculer la réponse r_l du degré de liberté l au point L à une excitation e_n du degré de liberté n au point N de la structure. Elle se calcule en effectuant le rapport entre la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle $R_{lo}(j\omega)$ à un impact connu $E_{no}(j\omega)$:

$$\text{équation C - 4,} \quad H_{ln}(j\omega) = \frac{R_{lo}(j\omega)}{E_{no}(j\omega)}$$

Pour limiter les perturbations liées aux bruits électriques et mécaniques, le numérateur et le dénominateur de $H_{ln}(j\omega)$ sont multipliés par l'expression conjuguée $\overline{E_{no}}(j\omega)$ du spectre d'excitation $E_{no}(j\omega)$:

$$\text{équation C - 5,} \quad H_{ln}(j\omega) = \frac{R_{lo}(j\omega)}{E_{no}(j\omega)} = \frac{R_{lo}(j\omega) \cdot \overline{E_{no}}(j\omega)}{E_{no}(j\omega) \cdot \overline{E_{no}}(j\omega)} = \frac{R_{lo}(j\omega) \cdot \overline{E_{no}}(j\omega)}{|E_{no}(j\omega)|^2}$$

Où $|E_{no}(j\omega)|^2$ désigne le module du spectre d'excitation $E_{no}(j\omega)$.

C.2 Échantillonnage et transformée de Fourier discrète

Les signaux mesurés expérimentalement sont obtenus avec un convertisseur analogique/numérique (*CAN*) qui est programmé pour faire l'acquisition d'un point de mesure à un intervalle de temps T_e fixe et constant. Il se produit une discrétisation du signal réel, qui prend la forme d'un ensemble fini de valeurs représentant les amplitudes du signal réel aux instants définis par la fréquence d'échantillonnage $F_e = 1 / T_e$ [Hewlett 1985; Hewlett 1986].

Pour pouvoir appliquer la transformée de Fourier à un signal numérique, il est nécessaire de réaliser une intégration numérique. Cette opération, qui est une approximation de la transformée de Fourier analytique (équation C - 1), est la Transformée de Fourier Discrète (*TFD*). L'application de la *TFD* à un ensemble de N_e points échantillonnés à la fréquence F_e aboutit au calcul des amplitudes de la transformée de Fourier du signal discrétisé, aux fréquences multiples de $\Delta f = F_e / N_e$. L'amplitude $g(k.\Delta f)$ de chaque raie spectrale est calculée à partir de l'ensemble des amplitudes des points de l'échantillon temporel $g(n.\Delta t)$, comme le montre l'expression définissant la *TFD* [Borch 1980] :

$$\text{équation C - 6, } F(\{g(k.\Delta f), k = 1..N\})(j\omega) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g(n.\Delta t) \cdot e^{2\pi(n-1)(k-1)/N}, k = 1..N \right\}$$

L'un des points faibles de La *TFD* réside dans son propre mode de fonctionnement. Échantillonner N_e points à la fréquence F_e nécessite une durée minimale N_e / F_e pendant laquelle il faut observer le signal pour pouvoir l'analyser, c'est à dire sa sélectivité temporelle. Le spectre fréquentiel obtenu est composé de raies séparées d'un pas de fréquence $\Delta f = F_e / N_e$ dans la gamme $(F_e / N_e, F_e / 2)$.

C.3 Repliement et recouvrement

La discrétisation de plusieurs signaux analogiques différents peut aboutir au même signal numérique, puisqu'il ne contient pas d'informations sur le signal analogique en dehors des points d'acquisition. Le phénomène de repliement apparaît par exemple pour les signaux analogiques dont le contenu fréquentiel F est supérieur à la fréquence d'échantillonnage F_e . De même, l'échantillonnage peut créer des fréquences artificielles qui ne sont pas représentatives du phénomène physique. Ces deux aspects du phénomène de repliement sont illustrés sur la Figure C - 2 [Hewlett 1985; Hewlett 1986].

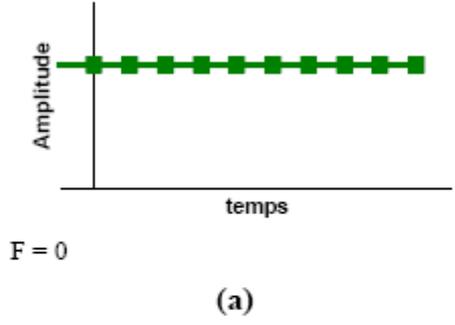
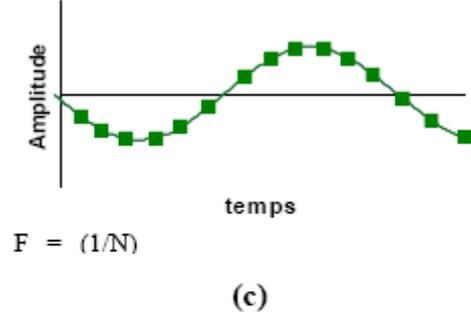
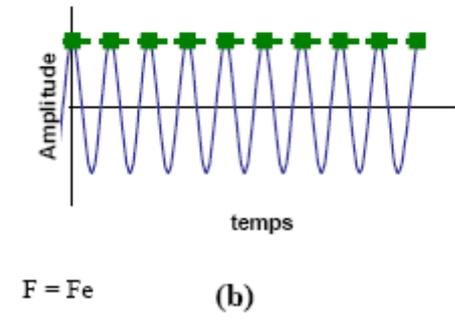
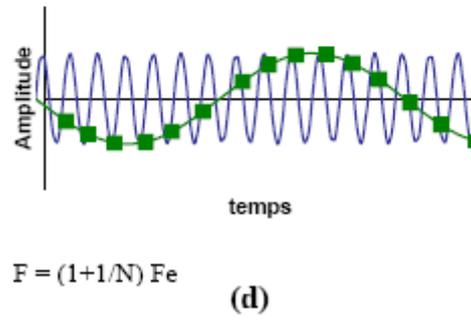
	Signal numérique ayant la forme d'une droite	Signal numérique ayant la forme d'une sinusoïde possédant une fréquence basse
Signal numérisé représentant correctement le signal analogique	 <p style="text-align: center;">(a)</p>	 <p style="text-align: center;">(c)</p>
Signal numérisé ne représentant pas correctement le signal analogique	 <p style="text-align: center;">(b)</p>	 <p style="text-align: center;">(d)</p>

Figure C - 2. Les deux aspects du phénomène de repliement

Le signal numérisé des signaux analogiques de chaque colonne du tableau est identique, alors que seuls les signaux numérisés de la première ligne caractérisent correctement le phénomène analogique. La numérisation du signal de la Figure C - 1.b a supprimé la périodicité du signal, alors qu'à l'opposé, une fréquence fictive est apparue sur le signal numérique de la Figure C - 1.d.

La numérisation est également responsable d'un phénomène de périodisation apparaissant dans le domaine fréquentiel. En effet, la discrétisation du signal $x(t)$ revient à multiplier ce signal par un peigne de Dirac $\delta_p(t)$ comme le montre la première ligne de la Figure C - 3.

La transformée de Fourier du peigne de Dirac $\delta_p(t)$ est un autre peigne de Dirac $\Delta_p(j\omega)$ (deuxième colonne de la Figure C - 3 et la transformée de Fourier d'une multiplication simple de deux fonctions temporelles $x(t)$ et $\delta_p(t)$ aboutit à un produit de convolution des transformées de Fourier $X(j\omega)$ et $\Delta_p(j\omega)$ [Borch 1980] :

équation C - 7,

$$F(x(t) \cdot \delta_p(t))(j\omega) = F(x(t))(j\omega) * F(\delta_p(t))(j\omega) = X(j\omega) * \Delta_p(j\omega)$$

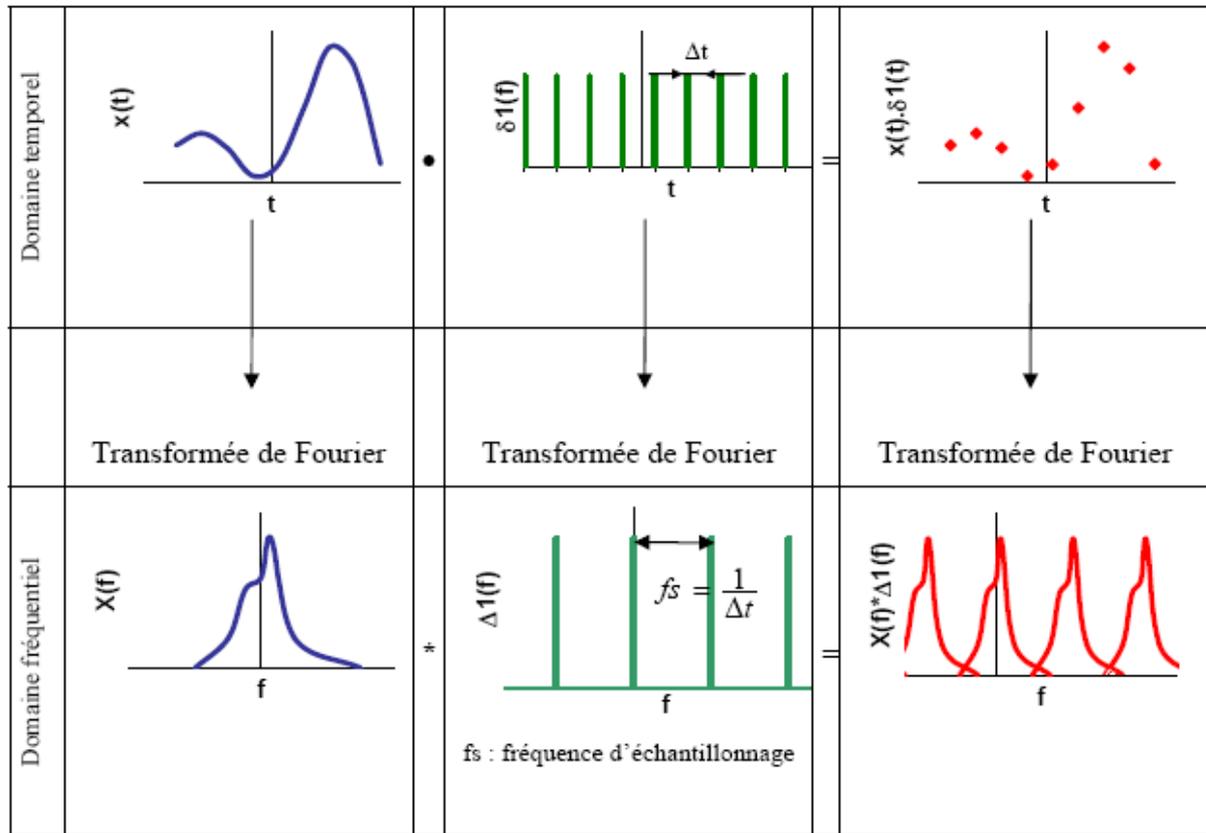


Figure C - 3. Le phénomène de recouvrement

Ce produit donne lieu à la création d'un phénomène de périodisation du signal $X(j\omega)$ dans le domaine fréquentiel (troisième colonne de la Figure C - 3). Il peut conduire à une distorsion du spectre fréquentiel du signal discrétisé liée au recouvrement des domaines périodisés, si la fréquence d'échantillonnage choisie est trop proche de la fréquence maximale significative décrivant le phénomène étudié F_{max} .

Le respect du théorème de Shannon, qui impose une fréquence d'échantillonnage F_e au moins deux fois plus grande que la fréquence maximale à mesurer F_{max} , évite l'apparition des phénomènes de repliement et de recouvrement.

C.4 Fuites d'énergie et fenêtrage

L'exemple de l'échantillonnage d'un signal périodique (Figure C - 4) permet de mettre en évidence le problème de fuites d'énergie. La transformée de Fourier d'une sinusoïde est une

raie spectrale dont la fréquence est l'inverse de la période de la sinusoïde (Figure C - 4.c) [Hewlett 1985; Hewlett 1986].

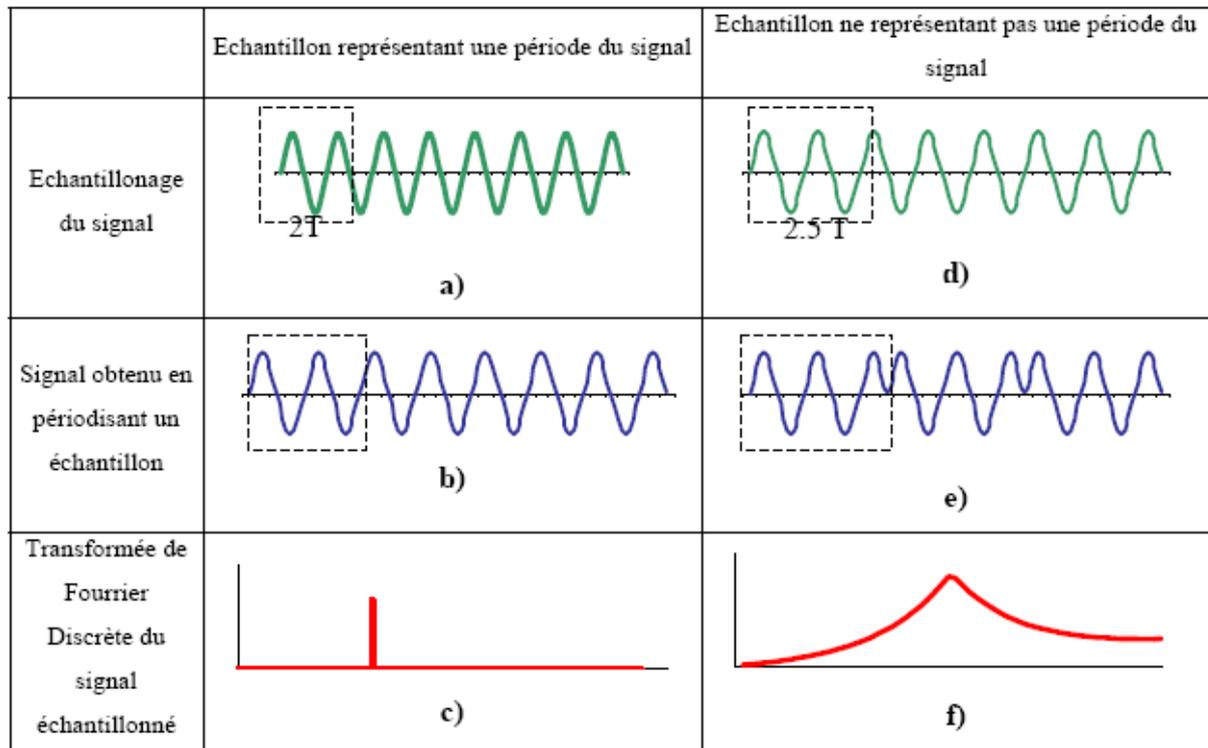


Figure C - 4. Le phénomène de fuite d'énergie lors de l'échantillonnage d'une sinusoïde

La **TFD** suppose que la collection de points puisse être périodisée pour obtenir la totalité du signal temporel à traiter. Si la collection de points ne correspond pas à un multiple de la période de la sinusoïde (Figure C - 4.d), la **TFD** de l'échantillon de points est très différente de la raie attendue (Figure C - 4.f). Le signal obtenu (Figure C - 4.e) en périodisant l'échantillon choisi (Figure C - 4.d) ne correspond pas à la sinusoïde initiale.

La **TFD** de signaux physiques, à priori non périodiques, entraîne des fuites d'énergie importantes, si on ne prend pas soin de rendre périodique ces signaux sur la durée de l'échantillon en multipliant le signal mesuré par une fonction temporelle appelée fenêtre. Les trois fenêtres les plus couramment utilisées pour la détermination des **FRF** sont présentées sur la Figure C - 5 [Herlufsen 1984].

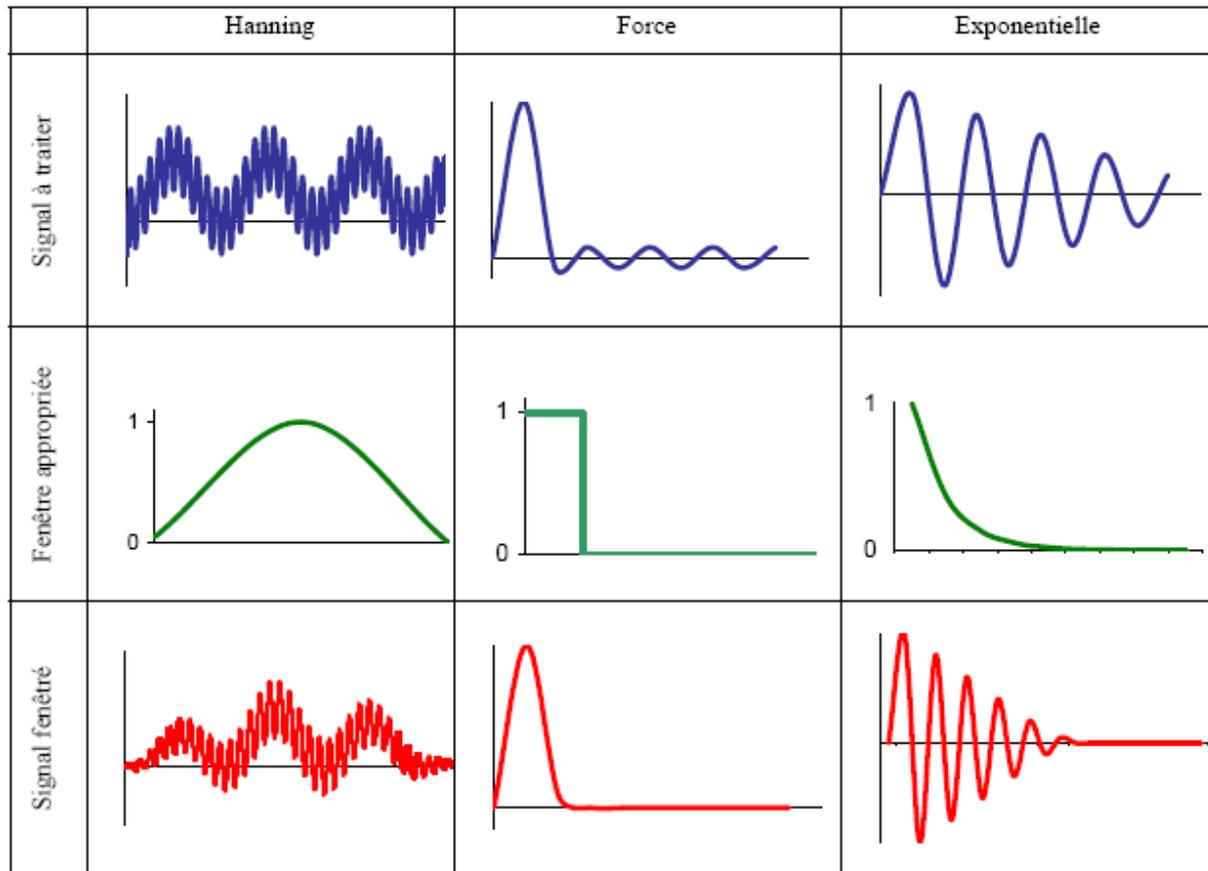


Figure C - 5. Les fenêtres temporelles couramment utilisées

La fenêtre de Hanning est utilisée pour l'analyse des signaux aléatoires possédant des composantes fréquentielles discrètes. Cette fenêtre est bien adaptée à l'étude des signaux émis par les machines tournantes, où les harmoniques de la fréquence de rotation ont une grande importance. Cette fonction qui s'annule au début et à la fin de l'échantillon rend périodique le signal mesuré.

La fenêtre force permet d'éliminer les bruits du signal d'excitation lors d'un impact réalisé sur une structure.

La fenêtre exponentielle est construite de manière à diminuer le bruit des signaux transitoires mesurés en réponse à un impact.

C.5 Retour dans le domaine temporel

Le retour dans le domaine temporel s'effectue en utilisant la TFD inverse, qui a pour expression :

$$\text{équation C - 8,} \quad \{g(k.\Delta t), k = 1..N\} = \left\{ \sum_{n=1}^N g(n.\Delta f) . e^{-2\pi i(n-1)(k-1)/N}, k = 1, N \right\}$$

L'amplitude $g(k.\Delta t)$ correspondant à chaque point de l'échantillon temporel est calculée à partir des amplitudes $g(n.\Delta f)$ de l'ensemble des raies spectrales.

Pour éviter les fuites d'énergie, le signal est multiplié par la fenêtre de Hanning avant de passer dans le domaine fréquentiel. L'application de la **TFD** inverse ramène dans le domaine temporel le signal où l'influence de la fenêtre de Hanning est encore présente. Ce signal doit, par conséquent, être divisé par la fonction de Hanning numérisée afin d'obtenir le signal non déformé. Cependant, au début et à la fin de l'échantillon, la fonction de Hanning s'annule et le signal non déformé prend des valeurs artificiellement élevées (Figure C - 6.a)

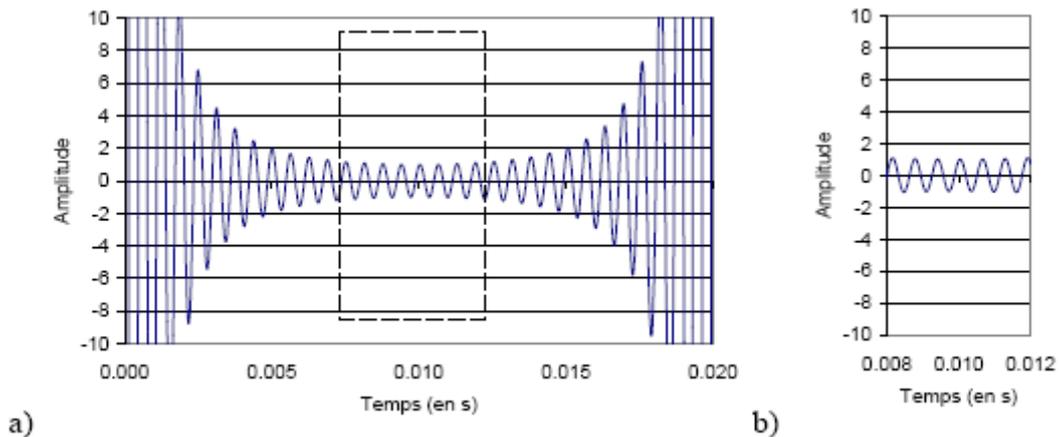


Figure C - 6. Sinusoïde divisée par la fonction de Hanning
a) signal entier b) partie non déformée

Pour contourner ce problème dû à la division du signal par la fenêtre de Hanning, seule la partie du signal au centre de l'échantillon est considérée comme étant non déformée. La figure 1.9.b. représente les points conservés suite au retour dans le domaine temporel. On peut considérer que pour obtenir une bonne précision, on ne conserve qu'un cinquième des points de l'échantillon.

Pour être analysé, un signal mesuré est décomposé en de nombreux échantillons possédant un nombre de points N . Pour qu'aucune distorsion n'apparaisse lors du retour dans le domaine temporel, 80 % des points de chaque échantillon sont communs avec ceux de ses deux voisins, comme le montre la Figure C - 7.

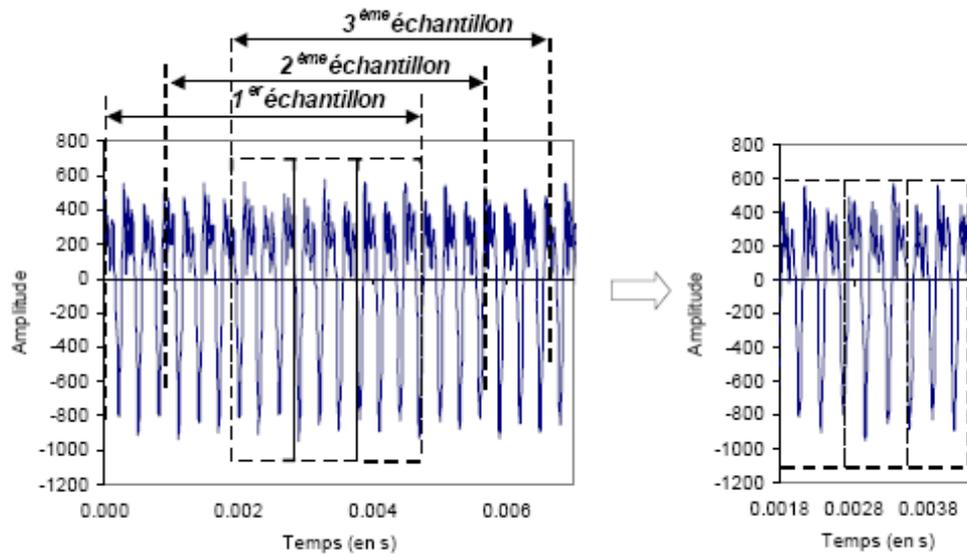


Figure C - 7. a) Echantillonnage d'un signal mesuré b) Reconstruction du signal analysé

En conclusion, une bonne connaissance du comportement dynamique de la structure étudiée est nécessaire, afin de choisir correctement la fréquence d'échantillonnage F_e , le nombre de points N_e de l'échantillon ainsi que le type de fenêtre approprié.



*Annexe D. Facteurs influents l'effort de coupe
en usinage traditionnel du bois*

D.1 Influence de l'outil de travail :

D.1.1 Angles de coupe :

Les angles de coupe principaux et secondaires sont parmi les facteurs les plus analysés en usinage du bois très certainement de part leurs grandes influences sur le processus d'usinage. Dans le paragraphe III.2.5 l'influence des angles de coupe principaux sur les efforts de coupe a été mentionnée. D'après différentes études, l'angle de coupe γ a le plus d'influence sur l'effort de coupe et l'augmentation de sa valeur mène à diminuer les efforts de coupe (Figure D - 1). L'angle de taillant et celui de dépouille n'ont pas une influence visible sur les efforts de coupe, sauf le cas de l'usinage en mode C (0-90), c'est le cas avec le tranchage et le déroulage, où l'angle de dépouille influence l'effort de coupe [Eyma 2002].

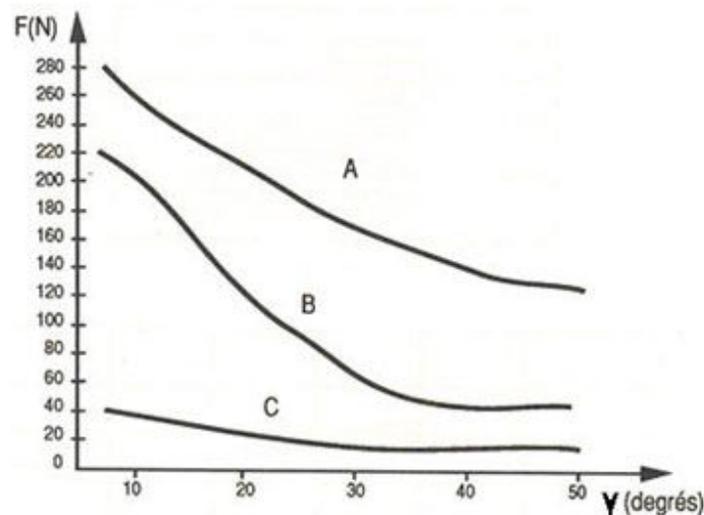


Figure D - 1. Influence de l'angle de coupe sur les efforts de coupe suivant les directions de coupe A, B, C (Cas du hêtre à 12% d'humidité, copeau de 0,2 mm d'épaisseur, outil usé à 50%), [Martin 1994]

D.1.2 Acuité de l'arête :

Plus une arête est fine et aiguë, plus la pénétration de l'outil dans la matière sera facile et l'effort nécessaire pour la coupe sera faible. En effet, on peut considérer l'effort de coupe est composé de deux facteurs différents par leur nature et leur fonction :

Le premier est le facteur de coupe, qui agit sur le bois par l'arête de coupe et qui est responsable de la division du copeau. Sa valeur dépend principalement de l'acuité de l'arête.

Le deuxième facteur est celui de la déformation du copeau, lié à l'angle de coupe, qui est une fonction linéaire de l'épaisseur du copeau pour les conditions courantes.

La présence de silice, une dureté de bois élevée et une faible humidité jouent un rôle important sur l'augmentation de l'usure, de part le frottement engendrés lors de la formation du copeau qui induit une usure par abrasion [Kivimaa 1952]. Selon Klamecki, Stewart et Gauvent [Klamecki 1980; Stewart 1986; Gauvent 2006a; Gauvent 2006b]. La nature métallique du matériau de coupe, la présence d'eau et d'éléments chimique extractibles dans le bois induisent un mécanisme électrochimique de corrosion, activé par la montée en température durant la coupe. Mais quand il y a des chocs lors de l'entrée de l'arête dans le bois, comme c'est le cas avec le déchiquetage, les grains de la matière de l'arête de coupe seront enlevées par morcellement. Aguilera et puis Eyma [Aguilera 2000; Eyma 2002] ont utilisé une méthode novatrice pour mesurer l'usure. Cette méthode fut de mesurer, grâce aux expérimentations, l'angle entre l'effort de coupe total et sa composante tangentielle à différents stades de l'usure de l'arête de coupe.

D.2 Influence des conditions de coupe :

D.2.1 Mode de coupe :

Les efforts de coupe varient fortement d'un facteur de 1 à 4 quand on passe du mode de coupe C au mode A. Ainsi, trois fonctions affines ont été établies (équation D - 1) pour les trois modes, où F est mesuré par centimètre de largeur usiné de hêtre (*Fagus Sylvania*) à 12% d'humidité avec un angle de coupe de 30°. Ces modèles ont été établis par Martin [Martin 1994] à partir des travaux de Kivimaa [Kivimaa 1950]. La Figure D - 2. Efforts de coupe en modes A, B et C montre les variations d'efforts de coupe entre les trois modes de coupe principaux.

$$\text{équation D - 1,} \quad \left. \begin{array}{l} F = 100 + 300 \cdot e_{\text{moy}} \quad (A) \\ F = 40 + 120 \cdot e_{\text{moy}} \quad (B) \\ F = 25 + 50 \cdot e_{\text{moy}} \quad (C) \end{array} \right\}$$

e_m : épaisseur moyenne du copeau (mm).

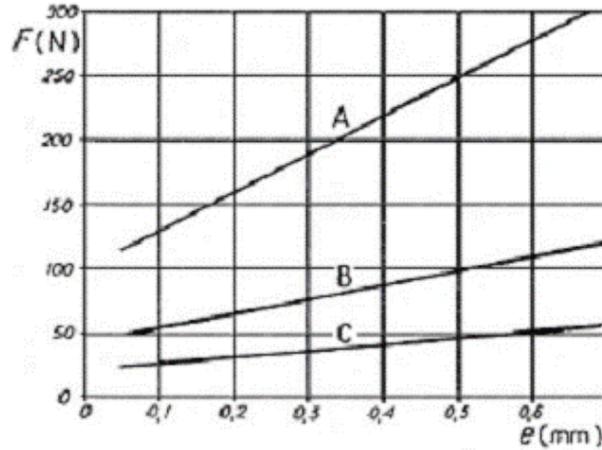


Figure D - 2. Efforts de coupe en modes A, B et C

D.2.2 Épaisseur du copeau :

Dans l'usinage du bois traditionnel, l'épaisseur du copeau (e) est un facteur très important. Les efforts de coupe engendrés dépendent linéairement de e (Figure D - 2). On peut aussi distinguer l'effet de l'épaisseur du copeau dans l'équation de Kivimaa [Kivimaa 1950] permettant de calculer l'effort de coupe total (équation D - 2),

$$\text{équation D - 2,} \quad F_c = (K_{ed} + K_c \cdot e_{moy}) \cdot b$$

e_{moy} - épaisseur moyenne du copeau (mm),

b - largeur de coupe (mm),

K_{ed} - coefficient d'arête ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$) qui représente une force par unité de largeur de coupe,

K_c - coefficient de coupe ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$) qui représente une force par unité de section du copeau.

L'épaisseur des copeaux en usinage du bois est inférieure à 1 mm, alors qu'elle dépasse les 10 mm en déchiquetage. Il n'y a pas des études qui analysent la relation entre l'effort de coupe et l'épaisseur des plaquettes en déchiquetage, mais la comparaison entre l'épaisseur du copeau en usinage et la longueur des plaquettes en déchiquetage, nous montre qu'elles sont égales, et c'est équivalent à l'avance par dent en coupe rectiligne (Figure D - 3).

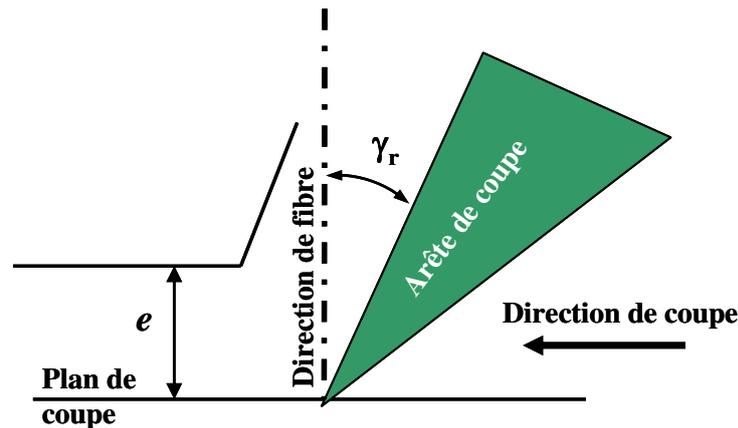


Figure D - 3. Processus de coupe en mode 90-90 [McKenzie 1961]

Malheureusement le remplacement de la valeur de l'épaisseur du copeau par celle de la longueur des plaquettes dans les lois de l'estimation de l'effort de coupe, qui sont établis dans l'usinage du bois, ne donne pas de résultats corrects. En effet, le mécanisme de formation des plaquettes en déchiquetage est très différent de celui observé en usinage, la propagation des fissures en déchiquetage influençant fortement la valeur de l'effort de coupe contrairement au cas de l'usinage.

D.2.3 Largeur de coupe (b) :

La largeur de coupe agit proportionnellement sur la valeur des efforts de coupe, chose que l'on retrouve dans les différents formulaires utilisées pour estimer ces efforts.

D.2.4 Frottement

Le frottement entre la face d'attaque du couteau et les copeaux (ou les plaquettes) glissant sur cette surface a un effet important sur la formation des plaquettes (§ V.1.3.2 et V.3.6.3) et sur l'effort de coupe. Le mécanisme du frottement est basé sur l'évolution et le casse des liens entre les copeaux d'une part et la formation non-élastique du matériau glissant sur l'outil de coupe de l'autre part, c'est un approche bien connu pour analyser le mécanisme de frottement [Mamoun 1975]. Le rapport entre les composants f et n d'effort de coupe (Figure VI-1) représente le coefficient de frottement (équation D - 3);

$$\text{équation D - 3,} \quad \mu = f/n$$

On peut distinguer deux coefficients de frottement, ce sont le coefficient statique et le coefficient dynamique. Nous nous intéressons particulièrement au coefficient de frottement dynamique puisque c'est l'action dynamique qui définit l'opération de la coupe. Ce

coefficient dépend de la variation du mouvement relatif entre les deux matériaux, les valeurs du coefficient range entre 0.3 et 0.5 pour le bois sec, entre 0.5 et 0.7 pour le bois à humidité moyenne et entre 0.7 et 0.9 pour le bois saturé [Murase 1980; Wood-Handbook 1999].

Plusieurs facteurs peuvent influencer ce coefficient, comme l'humidité du bois, l'essence en excluant les essences qui ont des huiles lubrifiantes, la rugosité de l'outil et la taille de la surface de contact [Klamecki 1976]. L'augmentation de la vitesse de coupe mène à diminuer la force frottement comme c'est montré par Sugiyama [Sugiyama 1981], et selon Stewart et Goli [Stewart 1969; Goli 2005; Goli 2006] la direction des fibres par rapport au mouvement du couteau affect le coefficient de frottement sensiblement.

Plusieurs méthodes sont utilisées dans l'usinage de bois pour diminuer le frottement, parmi elles on trouve le couteau vibrant, le jet de liquide lubrifiant, la coupe par laser, couvrir la surface du couteau par un matériau diminuant le frottement ou l'utilisation des couteaux à deux chanfreins [Kato 1971; Szymani 1975; Klamecki 1979; Sinn 2005].

D.3 Influence du matériau usiné :

D.3.1 Densité

Les efforts de coupe dépendent linéairement de la dureté du bois comme montré dans le Tableau D- 1 où les valeurs du coefficient d'essence K_e pour différents essences sont rassemblées.

Bois Massif	Coefficient	Matériaux dérivés	Coefficient
Balsa	0,5	Contre-plaqué	1,2 à 1,5
Peuplier	0,7		
Sapin	0,8	Panneau de particules	1,2
Hêtre	1(référence)		
Niangon	1,2		
Sipo	1,3	Panneau de fibres HDF	2,5
Chêne	1,4		
Acajou	1,5		
Méranti	1,5	Panneau compact laminé	2,7
Makoré	1,7		
Azobé	2,1		

Tableau D- 1. Coefficient K_e , influence de l'essence sur l'effort de coupe

K_e est utilisé pour estimer l'effort de coupe en usinage pour hêtre sec avec un angle de coupe 30°. Si l'essence employée ne se trouve pas dans le tableau, il faut extrapoler les valeurs du coefficient par comparaison des masses volumiques d'autres essences déjà référencées.

Certains chercheurs comme Negri, Fischer et McKenzie [Negri 1997; Fischer 1999; McKenzie 2001] estiment que la densité du bois est un élément pour la prédiction de l'effort de coupe. Adures chercheurs comme Chardin et Koch estiment [Chardin 1958; Koch 1964] que la densité ne permet pas, à elle seule, d'obtenir une estimation précise de l'effort de coupe demandé. Goncalves [Gonçalves 1997] montre que les efforts de coupe avec le bois de châtaignier (densité = 0.77) est inférieures à celles nécessaire pour usiner le bois de pin (densité = 0.55). D'ailleurs Movassaghi et Eyma [Movassaghi 1985; Eyma 1999] relatent un incidence certaine liée à l'interface entre le bois de printemps et le bois d'été.

D.3.2 Humidité :

Tout d'abord il faut rappeler qu'en usinage du bois l'humidité est représentée par celle anhydre, tandis que c'est l'humidité sur brut qui est utilisé en déchiquetage, l'humidité anhydre ($H\%$) est la quantité d'eau enfermée dans le bois en pourcentage à sa masse anhydre, l'humidité sur brut ($Hb\%$) est la quantité d'eau enfermée dans le bois en pourcentage à sa masse humide.

Puisque les efforts de coupe sont liés aux propriétés mécaniques du bois (cisaillement, compression,...), et que l'humidité influence sensiblement ces propriétés [Kollmann 1984; Hoadley 2000; Walker 2006], il est évident que les efforts sont influencés par l'humidité.

Les principaux travaux traitant de l'influence de l'humidité du bois sur l'usinage ont été faits

Par Kivimaa [Kivimaa 1950] qui a montré comment l'effort varie avec l'humidité. Ces travaux ont permis d'établir un coefficient Kh (Figure D - 4) actuellement utilisé pour la détermination des efforts de coupe, Le coefficient de valeur 1 est obtenu pour une humidité du bois de 12%, avec du bois de hêtre (*Fagus Sylvania*) avec une épaisseur moyenne de copeau de 0,2mm.

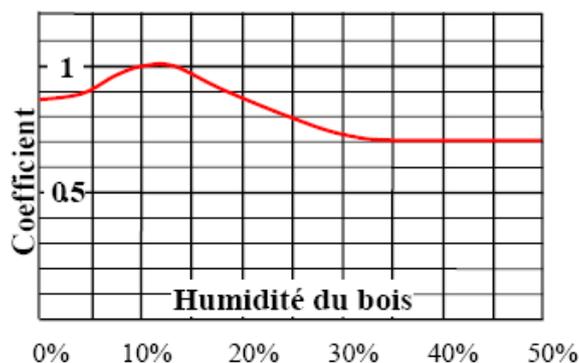


Figure D - 4. Coefficient Kh , influence de l'humidité du bois sur les efforts de coupe

L'effet de l'humidité sur les efforts de coupe est explicable selon deux phénomènes, qui sont la variation du coefficient de frottement et les propriétés mécaniques du bois. Selon Murase [Murase 1980] le coefficient de frottement augmente avec l'humidité jusqu'au point de saturation des fibres, ensuite il y a une diminution de ce coefficient au-delà de la saturation. Concernant les propriétés mécaniques, selon les résultats obtenus par Woodson [Woodson 1970] et McKenzie [McKenzie 1967], l'humidité est un facteur important entraînant des variations d'efforts de coupe non négligeables à cause des modifications des propriétés mécaniques, et cela est valable sur tous les modes de coupe. Guitard [Guitard 1987] montre l'augmentation des propriétés élastiques lorsque l'humidité du bois diminue, d'ailleurs la Figure D - 1 montre comment des différentes propriétés mécaniques évoluent avec le pourcentage de l'humidité et surtout qu'il y a une humidité limite en dessous de laquelle différents modules d'élasticité chutent.

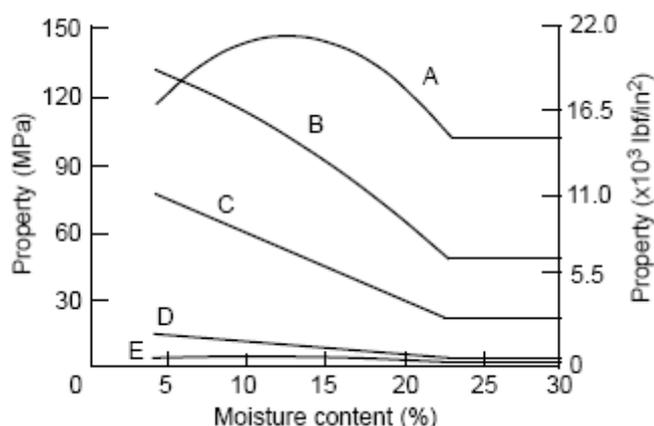


Figure D - 5. . Effet de l'humidité du bois sur : A) la traction parallèle aux fibres, B) la flexion, la compression C) parallèle et D) perpendiculaire aux fibres, E) traction perpendiculaire aux fibres [Wood-Handbook 1999]

D.3.3 Température :

L'effet de la température est liée à l'humidité du bois, c'est pour cette raison lorsqu'on usine du bois sec la température n'a pas d'influence sur les efforts, par contre lorsqu'il est humide l'effort décroît. Entre 0 et 80 °C les efforts décroissent sensiblement d'une façon linéaire de 10% suivant les directions de coupe A et B, et de 40% suivant C [Kivimaa 1950]. D'autre part les valeurs négatives de la température ont sûrement un effet sur les efforts de coupe, puisque les propriétés mécaniques du bois augmentent quand le bois est gelé, et plus l'humidité est importante, plus sera importante la variation des propriétés mécaniques [Mishiro 1990].

D.3.4 Singularités du bois :

Les singularités du bois (les nœuds, le contre-fil, le bois de tension ou de compression, etc.) peuvent fortement influencer voire perturber le bon déroulement du processus d'usinage. Ces singularités jouent un rôle non négligeable sur les efforts et la puissance consommée durant la coupe. Malheureusement, ces facteurs sont encore très difficiles à prendre en considération.



Résumé

Le broyage de bois de qualité secondaire est un processus en pleine expansion avec l'augmentation de l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie. La transformation du bois en plaquettes facilite l'automatisation des chaudières. Peu de recherches ont traité le mécanisme de la formation des plaquettes et des efforts de coupe durant cette opération. Lors de ce travail de thèse, nous nous sommes focalisés sur le système de déchiquetage à disque.

Un banc d'essais de taille réelle a été construit afin de permettre la variation de plusieurs paramètres, tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'amenage, les angles de coupe, la direction d'amenage, la hauteur du contre-couteau, le mode de coupe, le nombre des couteaux et leur saillie.

Les expérimentations ont montré que la taille des plaquettes augmente avec l'augmentation de l'avance par dent, l'angle de coupe réel et l'angle de taillant, et diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Le processus de la formation des plaquettes est composé de deux mécanismes, qui sont le cisaillement et la propagation de fissures. La mesure des efforts de coupe et de la puissance électrique consommée pour une bande passante pouvant atteindre 3 kHz complète ces données granulométriques. Grâce au banc d'essais de déchiquetage, nous avons pu montrer la corrélation ou l'indépendance de facteurs influents intervenant dans l'optimisation des conditions de coupe.

Mots - clés : broyage, banc d'essais, bois, biomasse, granulométrie, effort de coupe.

Abstract

Chipping wood of second quality is a rapidly growing process because of the increasing use of the biomass in energy production field. The utilization of wood chips as a combustible, make it easier to automate the wood boilers function. Few studies were carried out in order to understand the mechanism of the chip formation and the evolution of cutting force during the chipping operation. In this thesis, we focused our analysis on the disc chipper.

A test bench of real dimensions was built up in order to be able to vary many parameters such as cutting and feeding speed, cutting angles, feeding direction, anvil height, cutting directions, knives number and their height.

Experimental study showed that chip size grows when the feeding tooth, the cutting angle and the sharpness angle increase, whereas it decreases when the cutting speed increases. The process of the chip formation is composed of two mechanisms that are shear and cracks propagation. Measurement of cutting force and electric power consumption for a bandwidth up to 3 kHz bring important results to the chip size study. The chipping test bench allowed us to reveal the correlation or the independency between the parameters needed to optimize the chipping operation.

Key words: chipping, test bench, wood, biomass, chip size, cutting force.