Développement d'un outil de coupe économique et écologique pour le broyage des végétaux : analyse du mode de coupe, prototypage et innovation des moyens de coupe et de broyage

Stéphane Labbé

▶ **To cite this version:**

Stéphane Labbé. Développement d'un outil de coupe économique et écologique pour le broyage des végétaux : analyse du mode de coupe, prototypage et innovation des moyens de coupe et de broyage. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017LORR0296 . tel-01925023

HAL Id: tel-01925023
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01925023

Submitted on 3 Jun 2019

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

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : Sciences du bois et des fibres

Stéphane LABBÉ

Développement d'un outil de coupe économique et écologique pour le broyage des végétaux : analyse du mode de coupe, prototypage et innovation des moyens de coupe et de broyage

Soutenue à huis clos le 1er décembre 2017

Composition du jury

Rapporteurs :	
Marie-France Thevenon	Chercheur HDR, CIRAD
Florent Eyma,	Maître de Conférences HDR, Université de Toulouse, IUT de Tarbes
Examinateurs :	
Christine Gérardin	Professeur des Universités, Université de Lorraine, LERMAB
Christophe Bachmann	Directeur Général, ACTIBAC
Directeur de thèse : Pierre-Jean Méausoone	Professeur des Universités, Université de Lorraine, LERMAB
Co – Directeur de thèse : Sébastien Auchet	Maître de Conférences, Université de Lorraine, LERMAB

LERMAB : 27 rue Philippe Séguin, 88026 Epinal
ACTIBAC : Parc du Rouau RD331 Echangeur de Maizières 54550 Maizières

"La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information. "

"Un problème créé ne peut être résolu en réfléchissant de la même manière qu'il a été créé. "

Albert Einstein

"Ne demande pas ton chemin à quelqu'un qui le connaît car tu ne pourrais pas t'égarer."

Rabbi Nahman de Breslev

Remerciements :

Ce projet de recherche est le fruit de trois années de travail, de collaboration entre le LERMAB et la société ACTIBAC dans le cadre d'une Convention de Formation par la REcherche (CIFRE) au sein du domaine de la conception de machines forestières, vaste domaine encore méconnu. Ces trois années m'ont permis de conforter mes connaissances dans le domaine du bois, de la mécanique et d'approfondir mes compétences managériales et de gestion de projet. Ce projet m'a permis de m'épanouir pendant trois années dans un domaine qui me plaît : la Recherche et Développement (R&D). Ce projet n'aurait pas pu aboutir sans le soutien de nombreuses personnes que je souhaite remercier.

Je tiens à remercier Pierre-Jean Méausoone, Professeur au LERMAB qui m'a encouragé à la réalisation de cette thèse, qui m'a suivi et motivé au cours de ces trois années quels que soient les obstacles que j'ai rencontrés. Je tiens également à remercier Sébastien Auchet, Maître de conférences au LERMAB qui m'a aidé et apporté, tout comme Pierre-Jean, des compétences scientifiques en recherche et développement.

Je tiens à remercier Mr Christophe Bachmann, directeur d'ACTIBAC d'avoir accepté, cru et soutenu ce projet malgré les temps difficiles que peuvent subir les entreprises. Je tiens à remercier également l'ensemble de mes responsables industriels, Jérôme Leboeuf et Guillaume Bourst responsables de projets ACTIBAC et Fabien Lachaud responsable Bureau d'Etudes qui m'ont accompagné et épaulé tout au long de cette thèse. Je tiens à remercier aussi mes collègues de travail à ACTIBAC, Frédéric, Jean-Marc, Pierrick, Maxime, Thierry, Bernard et Stéphane pour l'aide qu'ils m'ont apportée au cours de mon projet et avec qui j'ai passé de bons moments au sein de l'entreprise. Je tiens à remercier l'ensemble de mes collègues pour m'avoir enseigné leur savoir-faire et leurs compétences en entreprise.

Je tiens à remercier le personnel technique de l'ENSTIB et du LERMAB, Tristan, Cyril, Cédric, Julien, Bruno et Stéphane pour leurs aides et les bons moments d'humour pendant les pauses café.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à cette thèse.

Je ne peux finir ces remerciements sans oublier la personne la plus chère à mes yeux, ma compagne Marion qui m'a soutenu et encouragé tout au long de ma thèse.

Tables des matières :

Remerciements : 3
Tables des matières : 4
Liste des figures : 9
Liste des tables : 13
Glossaire : 14
Introduction générale : 16
Chapitre 1 : 18
Introduction au broyage 18
I. Du broyage au déchiquetage : 19
I.1. La définition du broyage : 19
I.1.1. Le défibrage 19
I.1.2. Le déchiquetage 19
I.2. L'origine du bois broyé 20
I.2.1. Les produits forestiers 20
I.2.2. Les connexes de 1er et 2ème transformation 21
I.2.3. Le bois recyclé de classe A 21
I.2.4. Le bois de bocage et de haie 21
I.3. Les plaquettes bois. 21
I.3.1. Les différentes plaquettes bois 21
I.3.2. La caractérisation des plaquettes de bois : 22
I.3.3. Le prix des plaquettes : 25
II. Le fonctionnement d'une déchiqueteuse bois 27
II.1. La partie amenage. 28
II.1.1. Les rouleaux ameneurs. 28
II.1.2. Le tapis ameneur. 28
II.1.3. L'anti stress : organe de sécurité 28
II.2. La partie coupe. 29
II.2.1. La déchiqueteuse à disque. 29
II.2.2. La déchiqueteuse à rotor. 30
II.3. La partie éjection. 32
II.3.1. La turbine d'éjection. 33

II.3.2. La bande convoyeuse. 33
II.4. La source de puissance pour la rotation de l'élément de coupe : 33
III. Les aspects réglementaires et économiques des déchiqueteuses : 35
III.1. La réglementation et utilisation : 35
III.1.1. La sécurité. 35
III.1.2. Le bruit. 35
III.1.3. La pollution par les machines. 35
III.2. Les coûts machines 36
III.2.1. Le coût horaire des machines : 36
III.2.2. Le coût de la machine à la tonne de plaquettes produites : 38
IV. Conclusions 40
Chapitre 2 : 41
Détermination de la performance énergétique de coupe 41
I. Les différents critères de performance énergétique évalués sur les déchiqueteuses 42
I.1. La quantité de bois broyé 43
I.2. La quantité de plaquettes déchiquetées. 43
I.3. L'énergie consommée par la déchiqueteuse. 43
I.4. Le critère de performance énergétique choisi pour notre recherche 43
II. L'état de l'art des méthodes de mesure des performances énergétiques. 44
II.1. L'énergie de coupe 45
II.1.1. Le mécanisme de formation des plaquettes 45
II.1.2. La mesure de l'effort subi par le porte couteau 47
II.1.3. L'effort de coupe obtenu par mesure de la déformation du contre couteau 48
II.2. L'énergie consommée par la déchiqueteuse. 49
II.3. L'énergie consommée par la source d'énergie 50
II.3.1. La puissance fournie à la déchiqueteuse par une source de puissance électrique. 50
II.3.2. La consommation de carburant de la déchiqueteuse 50
II.4. La comparaison des différentes méthodes d'évaluation de la performance énergétique 51
III. L'état de l'art de l'influence des paramètres de déchiquetage sur les performances énergétiques. 53
III.1. L'influence du type de bois déchiqueté 53
III.2. L'influence de l'essence de bois 54

III.3. L'influence de l'avance par dent 55
III.4. L'influence du type de déchiqueteuse utilisée : à disque ou à rotor 55
III.5. L'influence de l'usure des couteaux 55
III.6. L'influence des options présentes sur les déchiqueteuses à rotor 56
III.7. Les axes de recherche pour la performance énergétique. 57
IV. Conclusions : 58
Chapitre 3 : 59
Matériels et méthodes 59
I. Le type de bois utilisé et produits issus du déchiquetage : 60
I.1. Le type de bois utilisé. 60
I.2. Les produits issus du déchiquetage 61
I.2.1. L'humidité des plaquettes 62
I.2.2. La granulométrie des plaquettes 62
I.2.3. La masse de plaquettes sèches 65
II. Le banc d'essai de déchiquetage : 65
II.1. La mesure de la vitesse d'avance du rondin par capteur magnétostrictif. 66
II.2. Le contre couteau instrumenté. 66
II.3. Les déchiqueteuses 67
II.4. La mesure de la puissance de la déchiqueteuse par le cardan instrumenté 69
II.4.1. La mesure du couple transmis par le cardan : 70
II.4.2. La mesure de la vitesse de rotation et de la position du disque en sortie du cardan : 72
II.5. Les sources d'énergie 72
III. Le traitement des signaux mesurés lors du déchiquetage 73
III.1. Les pré-requis de mesure 74
III.2. La méthodologie de mesure de l'énergie 74
III.2.1. La vitesse d'avance du rondin lors du déchiquetage. 75
III.2.2. L'énergie de coupe mesurée à l'aide du contre couteau instrumenté. 76
III.2.3. La détermination de la position angulaire du disque. 83
III.2.4. L'énergie de coupe par la mesure de l'effort de coupe. 83
III.2.5. L'énergie de la déchiqueteuse par le cardan instrumenté. 85
IV. Les paramètres de coupe étudiés lors de la recherche 90
IV.1. Les paramètres de coupe dans le cadre d'un plan d'expérience 90

IV.1.1. L'avance par dent. 91
IV.1.2. La vitesse de coupe 91
IV.1.3. L'angle de dépouille du couteau 92
IV.1.4. L'angle d'amenage du rondin 93
IV.1.5. Le diamètre du rondin 93
IV.2. Les autres paramètres de coupe étudiés 93
IV.2.1. L'essence 93
IV.2.2. L'humidité 93
IV.2.3. La source d'énergie 94
V. Conclusions 94
Chapitre 4 : 96
Résultats 96
I. Les efforts de coupe et la PEC 97
I.1. L'allure de l'effort de coupe 97
I.2. L'évolution de l'effort de coupe selon des paramètres significatifs de coupe 98
I.3. Influence de la hauteur du contre couteau sur la mesure de l'effort de coupe 101
I.4. L'influence du contre couteau sur la granulométrie 104
I.5. La PEC 106
II. La puissance moyenne consommée lors du déchiquetage 108
II.1. L'influence de paramètres de coupe sur la puissance moyenne consommée 108
II.2. L'influence de la source d'énergie sur la puissance consommée 111
III. L'évaluation de la PEDc en fonction des caractéristiques de la déchiqueteuse et du bois 112
III.1. L'influence des paramètres de coupe 113
III.1.1. Le critère de contrôle 113
III.1.2. Les résultats obtenus 113
III.2. Les essais complémentaires 115
III.2.1. L'influence de l'essence, de l'humidité et du diamètre du rondin broyé 115
III.2.2. L'influence de l'avance par dent et du diamètre du rondin pour une quantité de bois déchiqueté identique 117
III.2.3. L'influence de la source d'énergie 118
III.2.4. Influence de l'anti stress 119
III.3. La comparaison entre la PEC et la PEDc 120

III.4. La comparaison performance énergétique par kilowattheure et litre de carburant 121
IV. Conclusions 123
Perspectives de la thèse : 124
Bibliographie : 126
Annexe 1 : Mesure du couple par le cardan instrumenté 132
Annexe 2 : Essai de répétition 139
Annexe 3 : Casse des couteaux lors du déchiquetage du hêtre 141
Résumé : 144

Liste des figures :

Figure 1 : Fibres de bois obtenues par défibrage (Source : SL) 19
Figure 2 : Plaquettes de bois obtenues par déchiquetage (Source : SL) 19
Figure 3 : Utilisations possibles des différentes plaquettes bois selon leur origine 20
Figure 4 : Exemple de chaudière avec système d'alimentation par vis sans fin 23
Figure 5 : Prix des différentes énergies (Source : ajena.org)[AJENA, 2017] 25
Figure 6 : Tarifs indicatifs des plaquettes (Source : fnbois.com) [CEEB, 2017] 26
Figure 7 : Installation de chaudière biomasse entre 2009 et 2015 26
Figure 8 : IDEF 0 simplifié de la déchiqueteuse. 27
Figure 9 : Les trois parties fonctionnelles d'une déchiqueteuse à rotor (a). et d'une déchiqueteuse à disque (b) (Source : SL) 28
Figure 10 : Partie amenage composée d'un tapis ameneur et de rouleaux ameneurs (Source : SL) 28
Figure 11 : Modèle de fonctionnement du système anti stress lors de la perte de vitesse du système de coupe 29
Figure 12 : Déchiqueteuse à disque [Labbé, 2017] 30
Figure 13 : Déchiqueteuse à rotor 31
Figure 14 : Paramètres de coupe de la déchiqueteuse à disque. 32
Figure 15 : Exemple des deux systèmes d'éjection (source : SL) 33
Figure 16 : Coût horaire des déchiqueteuses en fonction de la puissance globale 37
Figure 17 : Importance relative des coûts MO, R&M, fixe et en carburant sur le coût horaire de broyeurs dans différents pays. 38
Figure 18 : Exemple de calcul du coût par tonne de plaquettes sèches pour une déchiqueteuse à chargement manuel [Bois énergie, 2008] 39
Figure 19 : Evolution du coût de fabrication des plaquettes en fonction de la quantité produite, du type de bois et du type de machine. [Bois énergie, 2008] 39
Figure 20 : Méthodes d'évaluation des performances énergétiques de la déchiqueteuse sur le système 45
Figure 21 : Mécanisme de formation des plaquettes [Pfeiffer, 2015] 46
Figure 22 : Formation de la plaquette selon Hartler [Hartler, 1963] 46
Figure 23 : Les trois modes de formation de formation des plaquettes selon l'importance des frottements du couteau contre le bois [Hellström : 2010] 47
Figure 24 : Système de mesure et allure de l'effort de coupe par Hellström [Hellström, 2011] 48
Figure 25 : Mesure et allure de l'effort de coupe par Abdallah [Abdallah, 2010] 48
Figure 26 : Mesure de puissance et consommation de carburant lors d'un essai de déchiquetage [Spinelli, 2012a] 49
Figure 27 : Evolution de la puissance électrique fournie au moteur [Di Fulvio, 2015] 50
Figure 28 : Schéma global d'étude du système de broyage, déchiquetage 60
Figure 29 : Rondins utilisés pour les essais de déchiquetage : à gauche du trait : Le sapin, à droite du trait : Le hêtre 61
Figure 30 : Plaquettes récupérées lors du déchiquetage de 8 rondins 62

Figure 31 : Système d'analyse de la granulométrie : tamis oscillant et les différents tamis utilisés..... 63
Figure 32 : Analyse granulométrique de la totalité de six rondins déchiquetés..... 64
Figure 33 : Notre système complet de mesure de performance énergétique de coupe et de la déchiqueteuse 65
Figure 34 : Dispositif de mesure de l'avance et la vitesse du rondin..... 66
Figure 35 : Dispositif de mesure de l'effort de coupe par la mesure de la déformation du contre couteau 67
Figure 36 : Modification de l'angle d'amenage des rondins sur la déchiqueteuse B160..... 68
Figure 37 : Modification de l'éjection pour récupérer le bois déchiqueté sur la déchiqueteuse B160 69
Figure 38 : Principe de torsion d'un arbre..... 70
Figure 39 : Fonctionnement du système de mesure du couple à partir de la déformation en torsion du cardan. 71
Figure 40 : Dispositif de mesure de la vitesse de rotation du disque 72
Figure 41 : Etapes du traitement des signaux pour la détermination de la performance énergétique 73
Figure 42 : Allure générale du déplacement des rondins constatés aux cours des différents essais..... 75
Figure 43 : Décomposition des efforts de coupe, vue de côté..... 76
Figure 44 : Décomposition des efforts de coupe vue de face..... 77
Figure 45 : Allure de l'effort de coupe selon Adballah et Hartler 78
Figure 46 : Mesure de la déformation du contre coutre couteau au cours d'un essai de déchiquetage..... 79
Figure 47 : Principe d'évaluation de l'effort de coupe à partir de la déformation du contre couteau 80
Figure 48 : Principe de l'étalonnage dynamique et traitement du signal déformation 81
Figure 49 : Effort de coupe obtenu à partir de la déformation du contre couteau mesurée 82
Figure 50 : Superposition du signal délivré par le capteur capacitif (vert) et de l'effort de coupe (rouge)..... 83
Figure 51 : Détermination du déplacement effectué entre deux points de mesure pour le calcul de l'énergie..... 84
Figure 52 : Exemple de détermination de l'énergie de coupe sur un tour de disque. 84
Figure 53 : Exemple de la mesure du couple au cours d'un essai de déchiquetage. 85
Figure 54 : Superposition de la mesure du couple et du codeur 86
Figure 55 : Evaluation de la vitesse et de la position du disque par le signal du capteur capacitif sur 2 tours du disque..... 87
Figure 56 : Variation de la vitesse de rotation du disque pour une puissance nécessaire importante..... 88
Figure 57 : Détermination de l'énergie consommée lors d'un essai normal..... 89
Figure 58 : Détermination des énergies consommées par la déchiqueteuse dans pour la détermination de la PEDc et la PEDd pour les essais avec déclenchement de l'anti stress..... 89
Figure 59 : Diagramme de causes et effets 90
Figure 60 : Différents couteaux et angles étudiés 92

Figure 61 : Influence de l'humidité (sur masse anhydre) du bois sur l'effort de coupe [Kivimaa, 1950] 94
Figure 62 : Effort de coupe selon Abdallah [Abdallah, 2011] 97
Figure 63 : Allure de l'effort moyen de coupe pour chaque couteau 98
Figure 64 : Evolution de l'effort de coupe maximal selon la configuration de la déchiqueteuse 99
Figure 65 : Influence de chaque paramètre sur l'effort de coupe. 100
Figure 66 : Superposition de la section du rondin pour des angles d'amenage de 55° et 90° lors de la coupe 100
Figure 67 : Mécanisme de coupe et efforts de coupe pour deux avances par dent 101
Figure 68 : Positionnement du contre couteau par rapport au rouleau ameneur pour chaque essai 102
Figure 69 : Evolution de l'effort de coupe maximal en fonction de différents paramètres étudiés [Labbé, 2017] 103
Figure 70 : Phénomène de non contact lors du déchiquetage, à gauche : début, à droite : fin de déchiquetage 104
Figure 71 : Modification apportée sur la partie amenage de la déchiqueteuse 104
Figure 72 : Influence du contre couteau sur la granulométrie 105
Figure 73 : Allure des plaquettes avec et sans contre couteau sur le hêtre et sapin 106
Figure 74 : PEC selon la configuration de la déchiqueteuse 107
Figure 75 : Détermination de la puissance moyenne consommée lors d'un essai de déchiquetage d'un rondin 108
Figure 76 : Evolution de la puissance consommée en fonction de la configuration de la déchiqueteuse 109
Figure 77 : Influence des paramètres de coupe sur la puissance moyenne consommée 109
Figure 78 : Exemple des efforts de frottement en fonction de l'angle de dépouille 110
Figure 79 : Influence de l'angle de dépouille sur les frottements lors du déchiquetage 110
Figure 80 : Effet de la modification de l'angle de coupe sur la composante normale pour un effort de coupe total constant 111
Figure 81 : Evolution de la granulométrie selon la configuration de la déchiqueteuse sur le sapin 113
Figure 82 : Evolution de la PEDc en fonction de la configuration de la déchiqueteuse sur le sapin 114
Figure 83 : Influence des paramètres de coupe sur la performance énergétique 114
Figure 84 : Evolution de la PEDc en fonction du diamètre, humidité et essence du rondin 116
Figure 85 : Evolution de la PEDc selon le diamètre du bois et l'avance par dent 118
Figure 86 : Ecart entre la PEDc et réelle pour différents essais sur le sapin et hêtre 119
Figure 87 : Evolution du rapport énergie de coupe sur énergie nette en fonction de la hauteur du contre couteau 120
Figure 88 : Comparaison entre le débit de carburant du tracteur et la puissance consommée de la déchiqueteuse 122
Figure 89 : Principe de fonctionnement du cardan instrumenté 132
Figure 90 : Dispositif d'étalonnage du cardan instrumenté 133
Figure 91 : Sensibilité du cardan instrumenté 134

Figure 92 : Angle de travail sur une machine attelée sur un tracteur 135
Figure 93 : Influence de l'angle de travail sur la mesure du couple 135
Figure 94 : Cas des arbres cannelés avec une direction différente 136
Figure 95 : Influence de la non homocinétique sur l'étalonnage du cardan instrumenté 137
Figure 96 : Exemple de mesure du couple de démarrage du B160 pour deux montages du couplemètre sur les axes de même direction et de directions différentes 137
Figure 97 : Granulométrie obtenu pour l'essai de répétition 139
Figure 98 : Casse des couteaux lors du déchiquetage du hêtre 141
Figure 99 : Emoussage des couteaux en aciers lors du déchiquetage du hêtre 142
Figure 100 : Illustration du phénomène de casse des couteaux 143

Liste des tables :

Tableau 1 : Utilisation des plaquettes par les différents secteurs industriels 22
Tableau 2 : Classe de granulométrie des plaquettes selon la norme NF EN 17225-4 23
Tableau 3 : Récapitulatif des caractéristiques des déchiqueteuses à rotor et à disque 32
Tableau 4 : Différentes sources d'énergie des déchiqueteuses. 34
Tableau 5 : Détail des différents coûts machines 37
Tableau 6 : Critères de performances énergétiques 42
Tableau 7 : Récapitulatif des différents moyens de mesure pour évaluer la performance énergétique 52
Tableau 8 : Influence du type de bois sur la performance énergétique 54
Tableau 9 : Influence de l'essence sur la performance énergétique 54
Tableau 10 : Influence des paramètres étudiés sur la performance énergétique 57
Tableau 11 : Paramètres de coupe pour la détermination de granulométrie des rondins 64
Tableau 12 : Caractéristiques des deux déchiqueteuses utilisées dans notre étude 67
Tableau 13 : Caractéristiques du cardan instrumenté 71
Tableau 14 : Caractéristiques des différentes sources d'énergie utilisées 73
Tableau 15 : Paramètres étudiés pour le plan d'expérience 91
Tableau 16 : Réglage de la vitesse d'avance du rondin en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent 91
Tableau 17 : Table du plan d'expérience étudié 99
Tableau 18 : Valeur du $Ø_{Bois}$ et f_z pour chaque position verticale du contre couteau 102
Tableau 19 : Evolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la source d'énergie 112
Tableau 20 : Configuration optimisée de la déchiqueteuse en PEDc 115
Tableau 21 : Détermination de la quantité de bois déchiqueté en fonction de f_z et $Ø_{Bois}$ 117
Tableau 22 : Influence de la source de puissance sur la PEDc 119
Tableau 23 : Coefficient de performance énergétique sur notre tracteur à l'étude 122
Tableau 24 : Homocinétique et non homocinétique 136
Tableau 25 : Résultats de répétition de déchiquetage de 5 rondins de sapin 139
Tableau 26 : Nuances de carbure utilisées sur les couteaux 141

Glossaire :

Source de bois : Matière ligneuse sous diverses formes qui peut être déchiquetée.

Plaquettes bois : Fragments issus du déchiquetage du bois.

Déchiqueteuse : Machine réalisant les plaquettes bois

Broyeur : Ensemble des machines réalisant les plaquettes bois et le défibrage.

Criblage : Opération consistant à tamiser les plaquettes pour calibrer la taille des plaquettes

Granulométrie : Répartition des différentes tailles des plaquettes bois sur un échantillon représentatif d'une population donnée.

Chaudière : Installation de faible ou de grand encombrement permettant de récupérer au maximum l'énergie libérée par la combustion de la biomasse.

Amenage : Nom donné pour la réalisation de l'avance du bois par la déchiqueteuse.

Ameneur : Nom donné à la solution technologique pour amener le bois aux couteaux ou marteaux.

Prise de force : Solution technologique située à l'avant ou à l'arrière des tracteurs pour transmettre l'énergie mécanique de rotation à l'outil ou la machine forestière.

Cardan : Liaison utilisée entre la prise de force du tracteur et la machine forestière pour transmettre l'énergie mécanique de rotation.

Moteur thermique : Source d'énergie utilisant de l'énergie libérée par la combustion du gasoil pour créer une énergie mécanique de rotation.

Critère de performance énergétique : Indicateur permettant de déterminer la performance de la machine par rapport à la quantité d'énergie consommée pour déchiqueter le bois.

Liste des symboles utilisés au cours de cette thèse :

Origine	Symbole	Désignation	Unité
Bois	$Ø_{bois}$	Diamètre du bois	mm
	L_{bois}	Longueur du bois	mm
	V_{bois}	Volume de bois	m^3
	m_{bois}	Masse de bois	kg
	$m_{v,\ bois}$	Masse volumique de bois à l'humidité H%	kg/m^3
	H%	Humidité du bois sur masse brute	%
	m_v	Masse volumique du bois à 20%	kg/m^3

Plaquettes	P	Granulométrie des plaquettes	-
	m_{Ph}	Masse de plaquettes humide > 30% d'humidité	t_{Ph}
	m_{Ps}	Masse de plaquettes sèches ≤ 30% d'humidité	t_{Ps}
Déchiqueteuse	$Ø_{disque}$	Diamètre du disque	mm
	z	Nombre de couteaux	
	H	Saillie du couteau	mm
	α	Angle de dépouille	°
	β	Angle de taillant	°
	γ	Angle de coupe	°
	ε	Angle d'amenage vertical	°
	σ	Angle d'amenage horizontal	°
	$Ω_{disque}$	Vitesse de rotation du disque	tr/min
	V_c	Vitesse de coupe	m/s
	V_f	Vitesse d'avance du bois	m/min
	f_z	Avance par couteau	mm/couteau
	P_c	Puissance de coupe	kW
	$P_{déchiqueteuse}$	Puissance des trois parties de la déchiqueteuse	kW
	F_c	Effort de coupe	N
	PEC	Performance énergétique au niveau de la coupe	t_{Ps} / kWh
	PEDc	Performance énergétique au niveau du cardan et pour avance de rondin continue	t_{Ps} / kWh
	PEDD	Performance énergétique au niveau du cardan et pour avance de rondin discontinue	t_{Ps} / kWh

Introduction générale :

L'un des objectifs environnementaux fixé par le grenelle de l'environnement est d'augmenter l'utilisation des énergies renouvelables en portant la part de cette énergie à 23% en 2020 et à 32% en 2030. Le bois énergie fait partie de ces énergies renouvelables et représente actuellement 39.8% de l'utilisation des énergies renouvelables en 2016 [Ministère de l'env., 2016]. Il est composé des bois buches, plaquettes de bois et granulés que nous utilisons pour produire de l'électricité et de la chaleur. Afin d'obtenir des rendements élevés et d'utiliser au maximum cette énergie, les chaudières requiert un combustible le plus homogène possible. Les plaquettes répondent à cette nécessité d'optimisation et sont obtenues par broyage du bois. Les plaquettes sont des fragments issus de bois résultant du broyage des différentes parties des arbres, de coproduits formés lors de la première et deuxième transformation du bois et des produits en bois. Cette opération actuellement réalisée à l'aide de machines forestières est énergivore et consomme principalement du carburant type gasoil. Dans cette recherche, nous souhaitons réduire l'impact de ces machines sur l'environnement par la réduction de l'utilisation des énergies fossiles. Pour cela, le premier objectif définit un moyen d'évaluer la performance énergétique des déchiqueteuses. A ce jour, il n'y a pas de référentiel comme les normes ou directives pour évaluer ces machines et pour en réduire leur consommation. Cette problématique donne lieu à une réflexion menée au cours de cette thèse et à la rédaction d'un état de l'art scientifique et technique autour de ce sujet. Après définition de la méthodologie et du critère de performance énergétique, le deuxième objectif détermine l'influence de différents paramètres de coupe sur la performance énergétique. La conséquence directe est la consolidation de nos connaissances dans ce domaine et de fait, une optimisation d'une déchiqueteuse à disque. Ces données aboutissent à la détermination des axes de recherches pour le développement d'une nouvelle machine plus performante énergétiquement.

Le présent mémoire se compose de quatre chapitres. Le premier chapitre introduit le sujet en décrivant les intérêts de l'utilisation des plaquettes ainsi que leur mode de production. Les machines utilisées pour le déchiquetage sont également décrites du point de vue normatif, réglementaire et économique. Dans le deuxième chapitre, est présenté le critère de performance énergétique utilisé pour le reste de la recherche et la méthodologie pour mesurer cette performance. L'ensemble des moyens de mesures de la performance énergétique existants sont présentés et les études sur les paramètres influençant cette performance énergétique sont comparées. Le troisième chapitre présente les matériels et les méthodes utilisés pour évaluer la performance énergétique définie dans le chapitre 2. La machine utilisée, les outils de mesure et les méthodologies pour traiter les signaux sont détaillés dans ce chapitre. Ce chapitre est caractérisé par la présentation des différents paramètres étudiés au cours de cette thèse en exploitant les plans d'expériences de Tagushi pour proposer des améliorations des machines existantes. La dernière partie rassemble les résultats obtenus lors de la détermination de la performance énergétique de la déchiqueteuse et les différentes recherches supplémentaires réalisées. Ces essais supplémentaires sur l'effort de coupe et la

puissance consommée par la déchiqueteuse permettent de compléter l'analyse de l'évolution de la performance énergétique et d'approfondir nos connaissances dans ce domaine.

Chapitre 1 :

Introduction au broyage

Ce chapitre introduit la notion de déchiquetage qui est l'objet de la recherche sur les broyeurs et qui permet de définir le processus de fabrication des plaquettes. Ensuite, les deux solutions technologiques existantes pour la production des plaquettes sont présentées et détaillées. Pour finir, ce chapitre termine par la détermination des contraintes et des études économiques actuelles au niveau de l'opération de déchiquetage.

I. Du broyage au déchiquetage :

I.1. La définition du broyage :

Le broyage du bois est une technique permettant de réduire en volume la matière ligneuse en fragments facilitant ainsi sa manutention. Deux termes permettent de différencier les deux principales techniques de broyage : le défibrage et le déchiquetage.

I.1.1. *Le défibrage*

Dans le cadre du broyage, le défibrage désigne la technologie utilisant des marteaux pour frapper la matière et la réduire en fragment. Le broyat obtenu (figure 1) est constitué de longues fibres de bois non homogènes de faible section. Cette méthode est utilisée essentiellement pour le compostage ou le paillage car la forme des broyats issus du défibrage accélère la dégradation du bois par les bactéries et les champignons.

Figure 1 : Fibres de bois obtenues par défibrage (Source : SL)

I.1.2. *Le déchiquetage*

Le déchiquetage permet de créer des fragments de bois uniformes (figure 2) en coupant la matière à l'aide d'éléments tranchants appelés couteaux. Ces fragments sont appelés des plaquettes.

Figure 2 : Plaquettes de bois obtenues par déchiquetage (Source : SL)

Selon l'origine du bois et l'utilisation des plaquettes, les caractéristiques des fragments ne sont pas les mêmes et sont classées en quatre catégories : plaquettes forestières, plaquettes industrielles, plaquettes bocagères et broyats de bois usagé (figure 3).

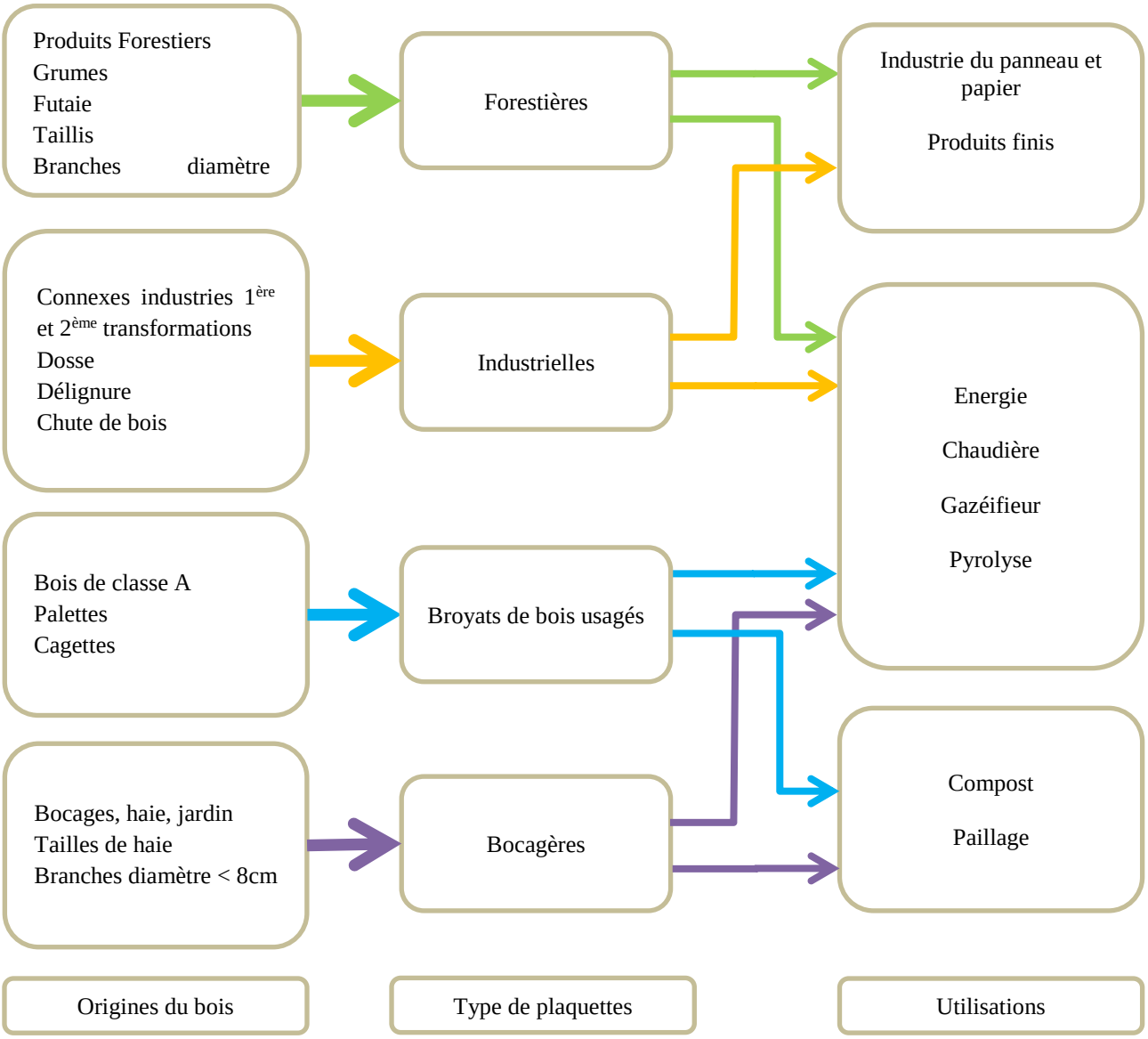


Figure 3 : Utilisations possibles des différentes plaquettes bois selon leur origine

I.2. L'origine du bois broyé

I.2.1. *Les produits forestiers*

Les produits forestiers sont les produits d'exploitation forestière à savoir les différentes parties qui constituent l'arbre mais aussi les futaies ou les taillis. Ces bois sont stockés puis séchés avant transformation en plaquettes, ou directement broyés. Certains bois peuvent contenir des métaux, de la silice ou des cailloux.

I.2.2. *Les connexes de 1er et 2ème transformation*

Les connexes sont les chutes issues de la première et deuxième transformation du bois non valorisables autrement que par broyage. Ils comprennent les dosses et délignures de scierie. Ces bois sont démunis d'écorces et ne présentent aucun corps métallique ni minéral.

I.2.3. *Le bois recyclé de classe A*

Les bois usagés sans additif : sans traitement, sans peinture ou sans colle, tels que les palettes et les cagettes sont classés A. Cette matière à broyer contient souvent des corps métalliques.

I.2.4. *Le bois de bocage et de haie*

Les bois de petites tailles qui proviennent des tailles de haie et de l'élagage des bois sont souvent broyés dès leur coupe. Ces bois ne présentent pas de métaux mais peuvent contenir de la silice ou des cailloux ajoutés lors de leur manutention.

I.3. Les plaquettes bois.

I.3.1. *Les différentes plaquettes bois*

Les plaquettes forestières sont les fragments de bois provenant de bois de forêt ou de bois ayant subi aucune transformation après abatage. Ces plaquettes sont utilisées prioritairement dans le secteur industriel du papier et du panneau pour leurs propriétés mécaniques et leur qualité.

La plaquette industrielle provient des industries de transformation du bois sans adjuvants ou solvants (dosses, délignures, chute de bois). Comme pour les plaquettes forestières, elles sont utilisées prioritairement pour le secteur industriel du papier et du panneau pour leurs propriétés mécaniques et leur qualité.

La plaquette bocagère provient du broyage de branches de haies dont les diamètres sont inférieurs à 35 mm. Ces plaquettes sont laissées sur place pour enrichir les sols pour les futurs arbres ou récupérées comme combustibles.

Le broyat de bois recyclé provient des bois de classe A. Le broyat est incorporé à des panneaux de particules ou sert de combustible dans des chaudières prévues à cet effet.

Les différentes utilisations des plaquettes sont répertoriées dans le tableau n°1 :

Industrie ou secteur	Utilisation des plaquettes	Qualité exigée des plaquettes	Type de plaquettes
Papeterie	Défibrage mécanique ou chimique afin de créer la pâte à papier	Peu d'écorce (<5%) Bois de résineux Humidité élevée Sans corps étrangers	Plaquette forestière Plaquette de scierie
Panneaux à base de bois	Réalisation de panneaux avec des copeaux de bois	Taille des plaquettes Humidité faible	Plaquette forestière Plaquette de scierie
Chaudière / Energie	Combustion de la matière pour chauffer ou pour produire de l'électricité	Taille des plaquettes Humidité faible Sans corps étrangers	Plaquette forestière Plaquette bocagère Broyat de bois
Compost	Décomposition de la matière pour fertiliser les sols	Sans corps étrangers	Plaquette bocagère Broyat de bois
Agriculture / Jardinage	Paillage pour les animaux ou pour les plantes	Taille des plaquettes Humidité faible Sans corps étrangers	Plaquette bocagère Broyat de bois

Tableau 1 : Utilisation des plaquettes par les différents secteurs industriels

Selon son utilisation, les exigences des plaquettes sont très différentes.

I.3.2. *La caractérisation des plaquettes de bois :*

Une classification des plaquettes est normée afin de faire correspondre facilement le type de plaquettes à leur utilisation en termes de combustion (de chaudières de faible puissance : < 300 kW à des chaudières de très haute puissance : > 4-5 MW). La norme NF EN 17225-4, récemment entrée en vigueur, permet d'harmoniser les caractéristiques des plaquettes qui étaient propres à chaque pays. Afin de classer les plaquettes, cinq critères normatifs et un critère informatif sont utilisés : l'origine et source des bois, décrits à la partie I.2., la granulométrie, l'humidité, le taux de cendre, la masse volumique apparente et le PCI.

I.3.2.1. La granulométrie :

La granulométrie est la taille des plaquettes. Lors du déchiquetage du bois, les plaquettes prennent différentes formes et tailles. La taille des plaquettes est très importante pour les chaudières de petite taille car celles-ci sont équipées d'un système d'amenage des plaquettes vers la zone de combustion par vis sans fin (figure n°4).

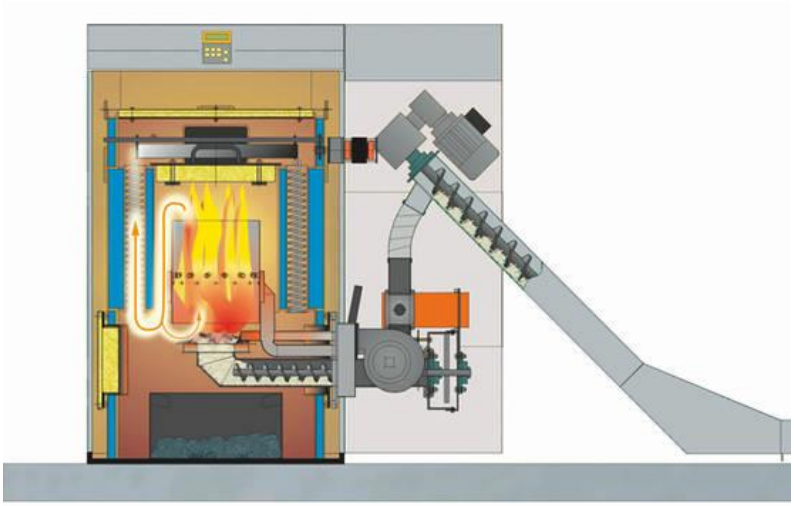


Figure 4 : Exemple de chaudière avec système d'alimentation par vis sans fin

(Source : energieplus-lesite.be)[Energie+, 2017]

La norme NF EN 17225-4, qui remplace la NF EN 14961-4, définit plusieurs classes de plaquettes selon leur taille et leur longueur. Les différentes classes de plaquettes sont représentées dans le tableau n°2 :

Fraction principale (minium 60% en masse), mm		Fraction de fines, % en masse (<= 3.15 mm)	Fraction grossière, % en masse (longueur de particule, mm)	Longueur maximale des particules, mm	Aire maximale de la section transversale de la fraction grossière, cm²
P16S	3,15 mm < P <= 16 mm	<= 15 %	<= 6 % (>31,5 mm)	<= 45 mm	<= 2 cm²
P31S	3,15 mm < P <= 31,5 mm	<= 10 %	<= 6 % (>45 mm)	<= 150 mm	<= 4 cm²
P45S	3,15 mm < P <= 45 mm	<= 10 %	<= 10 % (>63 mm)	<= 200 mm	<= 6 cm²

Tableau 2 : Classe de granulométrie des plaquettes selon la norme NF EN 17225-4

La fraction principale est la plage de dimension à respecter par les plaquettes. Ces plages sont définies en fonction de la taille des chaudières.

Les fines représentent les plaquettes dont la longueur est inférieure à 3,15 mm. Elles doivent être limitées car elles peuvent représenter un danger pour la santé de l'homme suite à une inhalation des poussières et un danger d'explosion lors de leur combustion si elles sont en trop grand nombre.

Les queues de déchiquetage sont les fractions des plaquettes supérieures à la longueur voulue. Ces plaquettes représentent un risque de blocage de la vis sans fin qui alimente la chaudière.

La granulométrie est directement liée aux caractéristiques de la machines et elle est prise en compte dans mon étude. J'applique la norme NF EN 17827-1 pour la détermination de la granulométrie. En accord avec la taille de la déchiqueteuse et du bois déchiqueté choisi, la classe de granulométrie retenue pour ce travail est la classe P16.

I.3.2.2. L'humidité :

L'humidité est la quantité d'eau contenue dans le bois. Pour la biomasse, l'humidité est déterminée par le rapport de masse de la quantité d'eau dans le bois sur la masse totale (humidité sur masse brute). Contrairement au domaine de la construction qui privilégie l'humidité sur masse sèche, l'humidité sur masse brute pour la biomasse permet d'exprimer rapidement la quantité d'eau qui est présente dans le bois. Quand un bois a une humidité sur masse brute de 50%, cela veut dire qu'il contient exactement 50% d'eau et de bois. Pour la combustion, l'eau n'est pas souhaitée car elle participe à la déperdition d'énergie lors de la combustion. De plus, l'humidité impacte énormément les coûts de transport des plaquettes, leur pouvoir calorifique ainsi que l'énergie nécessaire au broyage. La norme NF EN 18134-1 (remplace NF EN 14774) utilisée au cours de ma thèse propose une méthode pour obtenir l'humidité des plaquettes sur masse brute.

L'humidité sur masse brute définie par la norme NF EN 18134-1 est identifiée par M%. Cependant, l'abréviation H% sera utilisée dans la suite car c'est l'abréviation la plus utilisée dans les études sur le bois.

I.3.2.3. Le taux de cendres :

Le taux de cendres est la matière restant à la fin de la combustion à l'état solide ou liquide. Ce résidu peut être valorisé ou éliminé. Les cendres sont composées des minéraux que le bois a absorbé tout au long de sa croissance (cendres exogènes) et des impuretés que le bois a recueillies lors de son abatage et de son transport (cailloux, sable, terre, …). La norme NF EN 18122 (remplace NF EN 14775) classe les différents taux de cendres et définit la méthode pour calculer et mesurer le taux de cendres. Le paramètre joue sur le coût de transport (matière pesante et non utilisée), le retraitement des minéraux (pollution des sols) et l'augmentation de l'usure de la machine (casse, usure rapide des couteaux).

Contrairement aux deux paramètres précédents, le taux de cendres n'est pas étudié dans notre travail car il est directement lié à la matière à broyer et non à l'opération de broyage.

I.3.2.4. La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est la masse volumique des plaquettes bois à l'humidité reçue. Cette masse volumique se rapproche du mètre cube apparent de plaquettes (MAP), unité abandonnée car elle varie fortement en fonction de l'humidité et de la granulométrie des plaquettes. Cette masse volumique n'est pas déterminée dans cette recherche car la masse volumique du bois est plus précise que la masse volumique apparente.

I.3.2.5. Le PCI :

Ce critère n'est pas mentionné dans la norme NF EN 17225-4 mais n'en est pas moins primordial car il représente la quantité d'énergie fournie par une masse de plaquettes lors de sa combustion complète. Il est exprimé en Mégajoule par kilogramme (MJ/kg). La norme NF EN 14918 présente une méthode pour déterminer le PCI en utilisant une bombe calorimétrique. Ce paramètre est très influencé par l'humidité puisque la grosse quantité d'énergie consommée pour sécher les plaquettes n'est plus disponible pour une autre utilisation. Le PCI évolue linéairement avec l'humidité du bois.

Cette valeur dépend également de la densité et de l'essence du bois. Les valeurs moyennes pour un feuillu et pour un résineux à 0% d'humidité sont respectivement de 18,3MJ/kg et 19,3MJ/kg. Pour les deux essences, sécher les plaquettes de 50% à 20% d'humidité permet d'augmenter le PCI de 78%. Au cours de cette thèse, ce critère n'est pas contrôlé puisqu'il dépend de la matière entrante.

I.3.3. *Le prix des plaquettes :*

Le rapport prix du combustible sur kilowatt heure fourni (€/kWh) est le critère utilisé pour comparer le prix des différentes énergies disponibles. La figure 5 donne les prix des différentes énergies par rapport à la quantité d'énergie qu'elles produisent.

Figure 5 : Prix des différentes énergies (Source : ajena.org)[AJENA, 2017]

Cette figure montre que la plaquette bois est la deuxième énergie la plus économique après le soleil où cette énergie est disponible facilement et gratuite. La plaquette bois est deux fois moins chère que les granulés, trois fois moins chère que le gaz de ville et le fioul. Ainsi, cette énergie bon marché qui est très présente en France est un atout majeur pour notre pays.

La figure 6 regroupe les différents prix à la tonne de plaquettes humide (€/t_{Ph}) selon leur origine, leur granulométrie, et leur humidité.

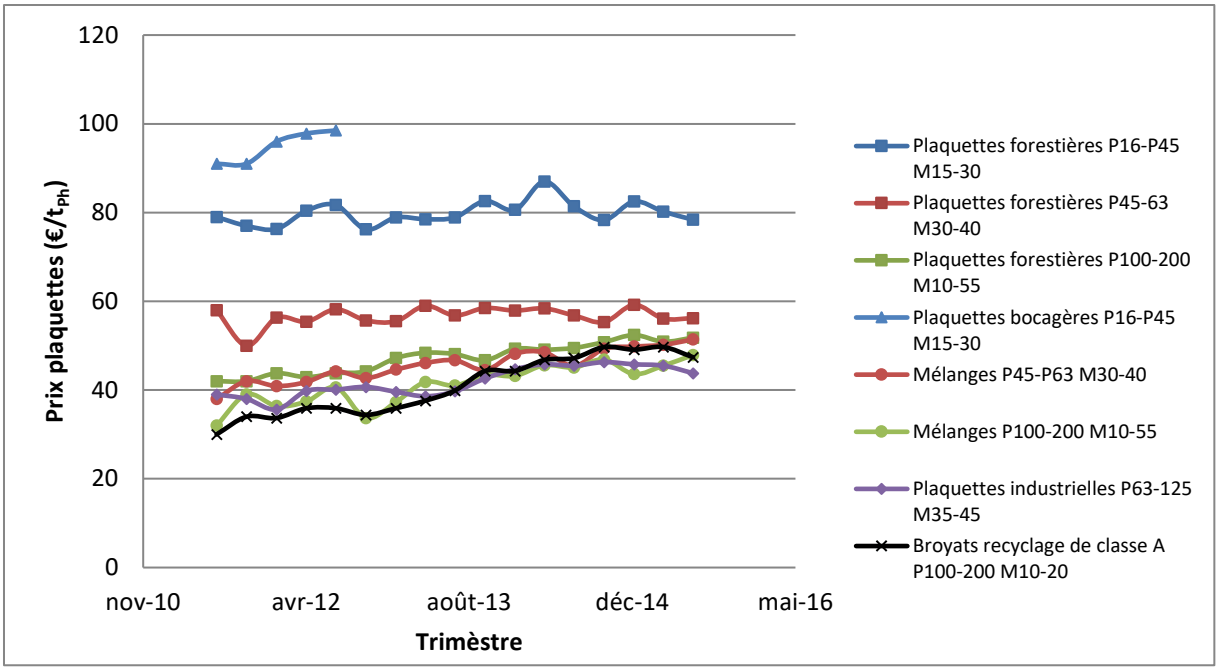


Figure 6 : Tarifs indicatifs des plaquettes (Source : fnbois.com) [CEEB, 2017]

Cette figure montre que le prix des plaquettes dépend de l'humidité et de la granulométrie, comme expliqué précédemment. Les plaquettes sèches sont vendues plus chères car le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de ce combustible augmente quand son humidité diminue, augmentant ainsi sa valeur marchande. De plus, fabriquer des plaquettes sèches de faible granulométrie entraine une augmentation du coût de fabrication des plaquettes car des opérations de criblage et de séchage se rajoutent à l'opération de déchiquetage. En résumé, plus les plaquettes sont sèches et petites, plus le prix de production et donc de vente est élevé. Au cours de ces dernières années, le prix des plaquettes de grosse granulométrie ne cesse d'augmenter suite à la forte demande des chaufferies de grande puissance et à l'installation de nouvelles chaufferies (figure 7).

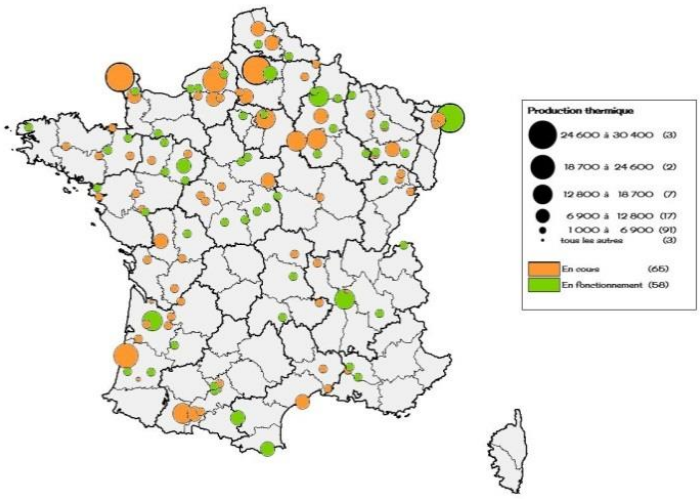


Figure 7 : Installation de chaudière biomasse entre 2009 et 2015

(Source : agreste.agriculture.gouv.fr)[AGRESTE, 2017]

La constante augmentation de demande en plaquettes de qualité supérieure nécessite l'utilisation de machines de production de plaquettes de plus en plus performantes et productives. La partie II. présente les différentes machines de déchiquetage existantes, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques.

II. Le fonctionnement d'une déchiqueteuse bois

L'opération de déchiquetage est réalisée par une machine appelée déchiqueteuse. Le fonctionnement global de la déchiqueteuse est décrit sur la figure 8. La déchiqueteuse se compose de trois parties : l'amenage, la coupe et l'éjection.

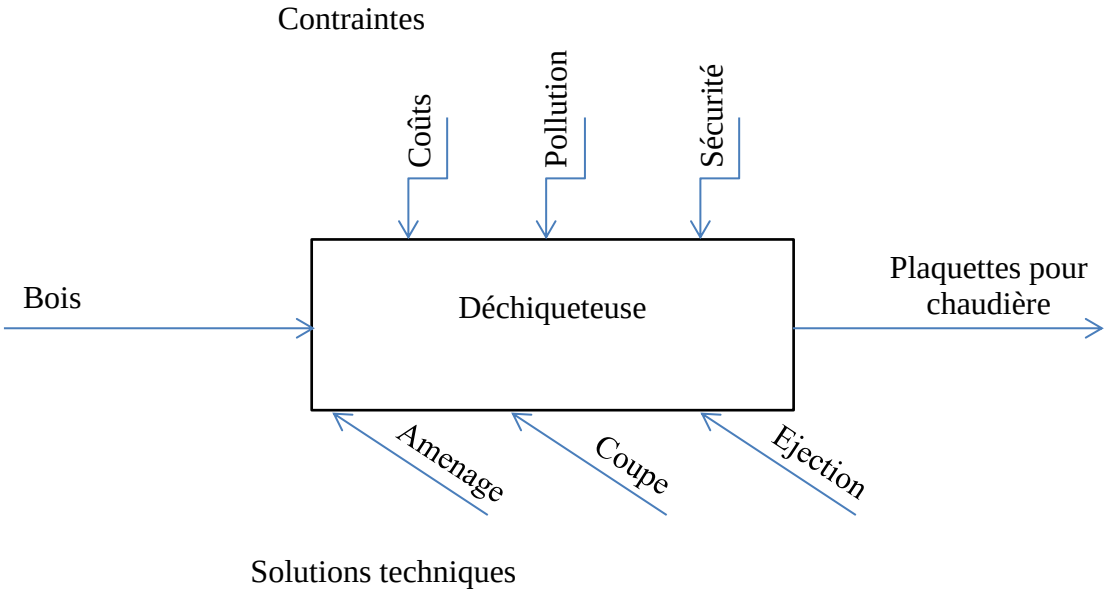
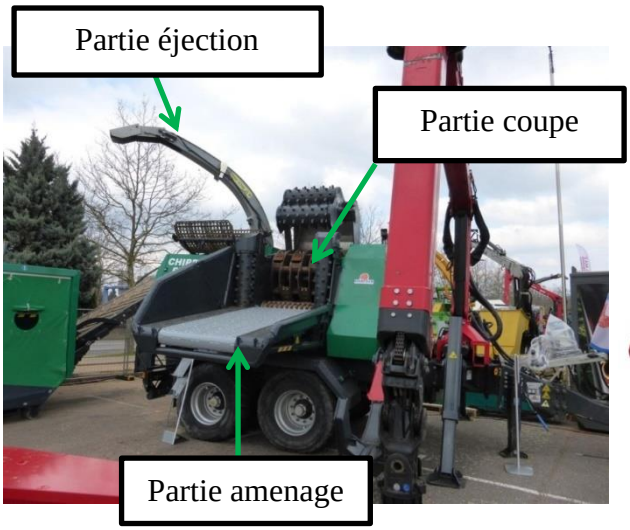
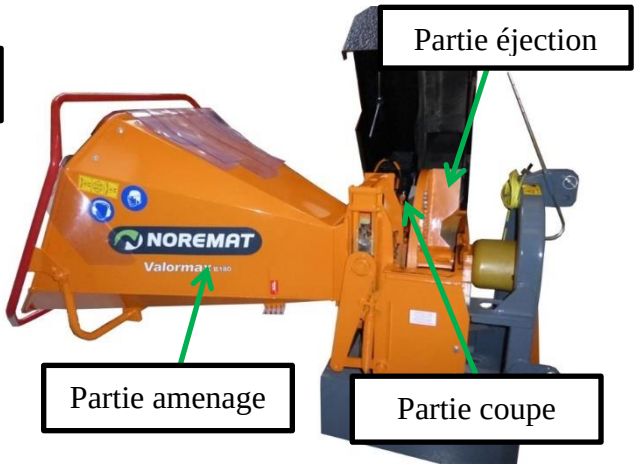


Figure 8 : IDEF 0 simplifié de la déchiqueteuse.

La figure 9 illustre ces trois parties pour une déchiqueteuse à disque et à rotor.



a.



b.

Figure 9 : Les trois parties fonctionnelles d'une déchiqueteuse à rotor (a). et d'une déchiqueteuse à disque (b) (Source : SL)

II.1. La partie amenage.

Cette partie permet l'acheminement de la matière ligneuse jusqu'à la partie coupe et son maintien lors de la coupe. Il existe différents systèmes d'amenage.

II.1.1. *Les rouleaux ameneurs.*

Des rouleaux cylindriques motorisés viennent saisir le bois et l'amener à la partie coupe en continue par un mouvement de rotation et un contact linéique (figure 10). Ils sont positionnés de manière verticale ou horizontale par rapport au système de coupe. Ces rouleaux peuvent être lisses mais sont généralement munis de pointes améliorant la préhension de la matière ligneuse. La variation de la vitesse de rotation des rouleaux permet de régler l'avance du bois. L'alimentation des rouleaux en matière à broyer est effectuée manuellement pour les petits broyeurs et à l'aide d'un grappin pour les déchiqueteuses à gros rendement.

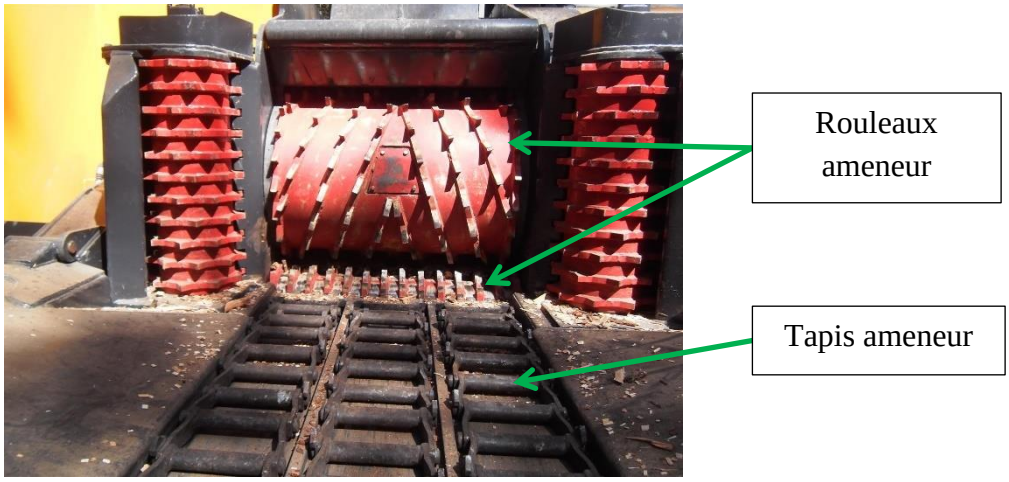


Figure 10 : Partie amenage composée d'un tapis ameneur et de rouleaux ameneurs (Source : SL)

II.1.2. *Le tapis ameneur.*

Cet outil permet d'amener le bois posé sur une plateforme mobile de manière continue vers la partie coupe (figure 10). Il est composé d'un tapis en acier qui lui confère une résistance élevée aux chocs et aux éléments abrasifs. Le tapis est mis en mouvement par des rouleaux en rotation dont la vitesse est réglable. Contrairement aux rouleaux, le tapis permet d'amener tous les types de bois. Le tapis a un coût plus important que les rouleaux. Un rouleau supérieur au tapis proche de la coupe assure le maintien de la matière ligneuse lors de la coupe.

II.1.3. *L'anti stress : organe de sécurité*

L'anti stress est une sécurité pour éviter de bloquer le disque lors du déchiquetage d'un rondin en régulant l'avance de celui-ci (figure 11). L'utilisateur peut ainsi déchiqueter des diamètres de bois importants avec une machine sous dimensionnée. Si la vitesse de rotation du disque diminue et dépasse le seuil de vitesse basse, le système arrête l'avance du rondin. L'arrêt de l'avance permet au moteur de fournir l'énergie nécessaire au rotor pour revenir à sa vitesse de

rotation nominale. Lorsque le seuil de vitesse haute est atteint, l'anti stress ne bloque plus l'avance du rondin qui recommence à avancer.

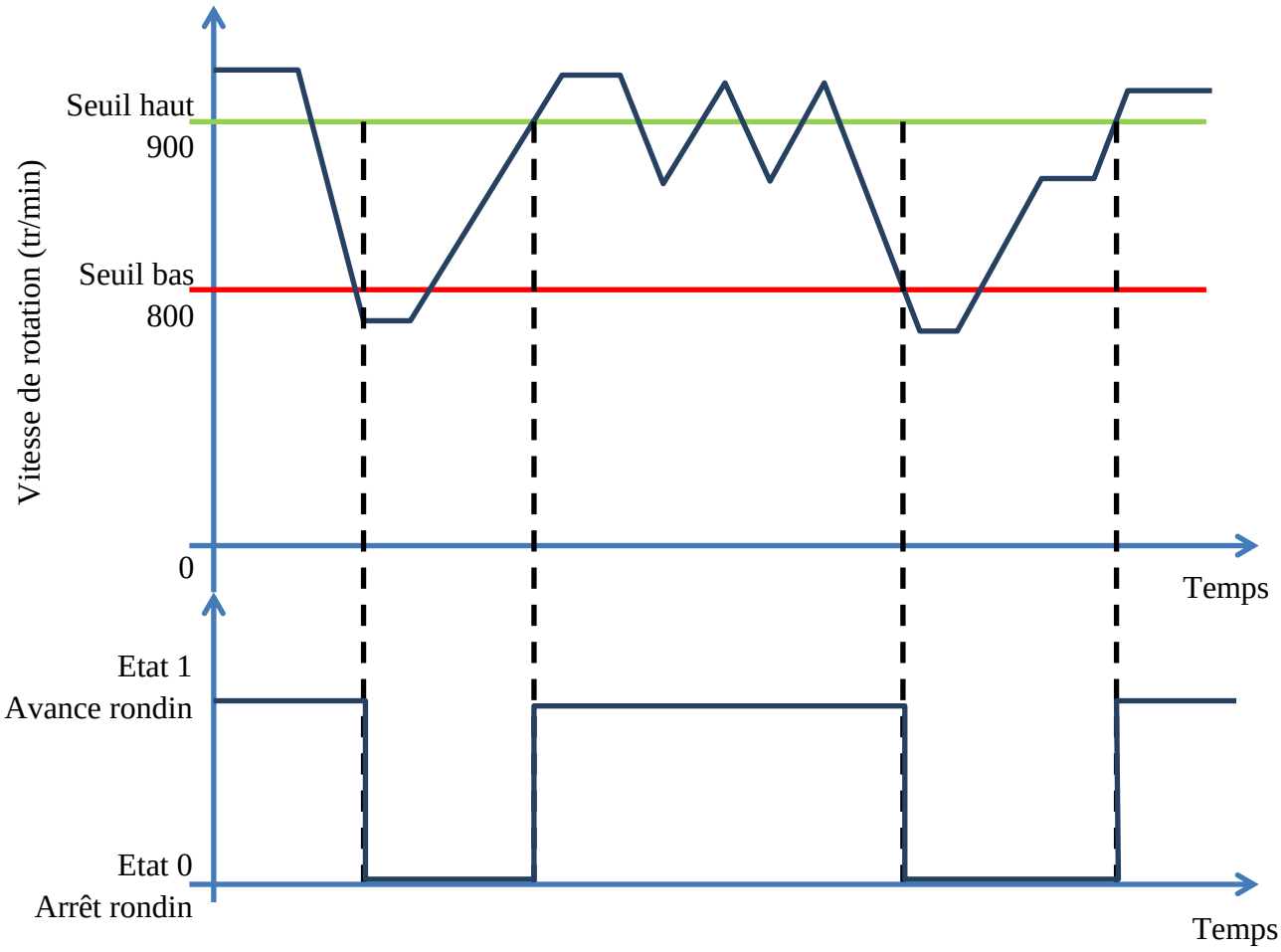


Figure 11 : Modèle de fonctionnement du système anti stress lors de la perte de vitesse du système de coupe

Sur notre déchiqueteuse, les plages de vitesses de rotation hautes et basses sont modifiées et réglées selon la vitesse de rotation de la partie coupe. L'arrêt ou l'avance des rondins par l'anti stress est réalisé par une électrovanne qui pilote l'alimentation en huile des rouleaux ameneurs.

II.2. La partie coupe.

Cette partie transforme le bois en plaquettes. La formation des plaquettes est réalisée lors de la coupe du bois. Deux grandes technologies existent pour créer les plaquettes et définissent le type de la déchiqueteuse. Le mécanisme de formation des plaquettes est détaillé dans le chapitre 2.II.1.1.

II.2.1. *La déchiqueteuse à disque.*

Le principe de fonctionnement de la déchiqueteuse à disque est illustré sur la figure 12. Des couteaux sont fixés radialement sur un disque en rotation. 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 de cisaillement entre le couteau et le contre couteau.

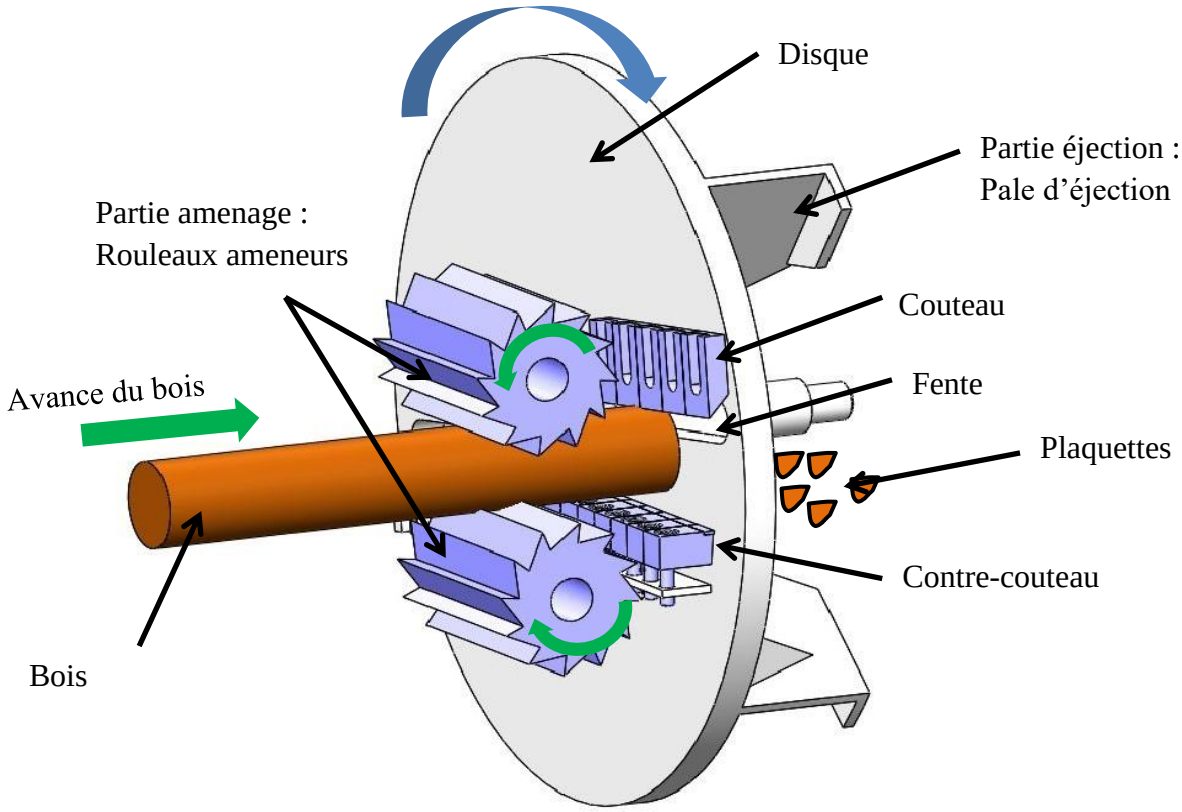


Figure 12 : Déchiqueteuse à disque [Labbé, 2017]

Par les efforts qui sont générés sur la tranche par les couteaux, la tranche se fragmente créant les plaquettes. Une fente dans le disque située en dessous des couteaux permet d'évacuer les plaquettes vers l'arrière du disque. Des pales d'éjection fixées au disque permettent l'évacuation des plaquettes vers la goulotte d'éjection.

II.2.2. *La déchiqueteuse à rotor.*

Des couteaux sont fixés tangentiellement sur un cylindre appelé rotor (figure 13). Les plaquettes sont formées par un mécanisme de coupe similaire à celui du broyeur à disque. Une grille de calibrage généralement placée en dessous du rotor permet par la taille de ses mailles de limiter et de calibrer la taille des plaquettes. Une vis sans fin permet d'amener les plaquettes vers la zone d'éjection. Pour ce type de coupe, plusieurs rotors et couteaux existent.

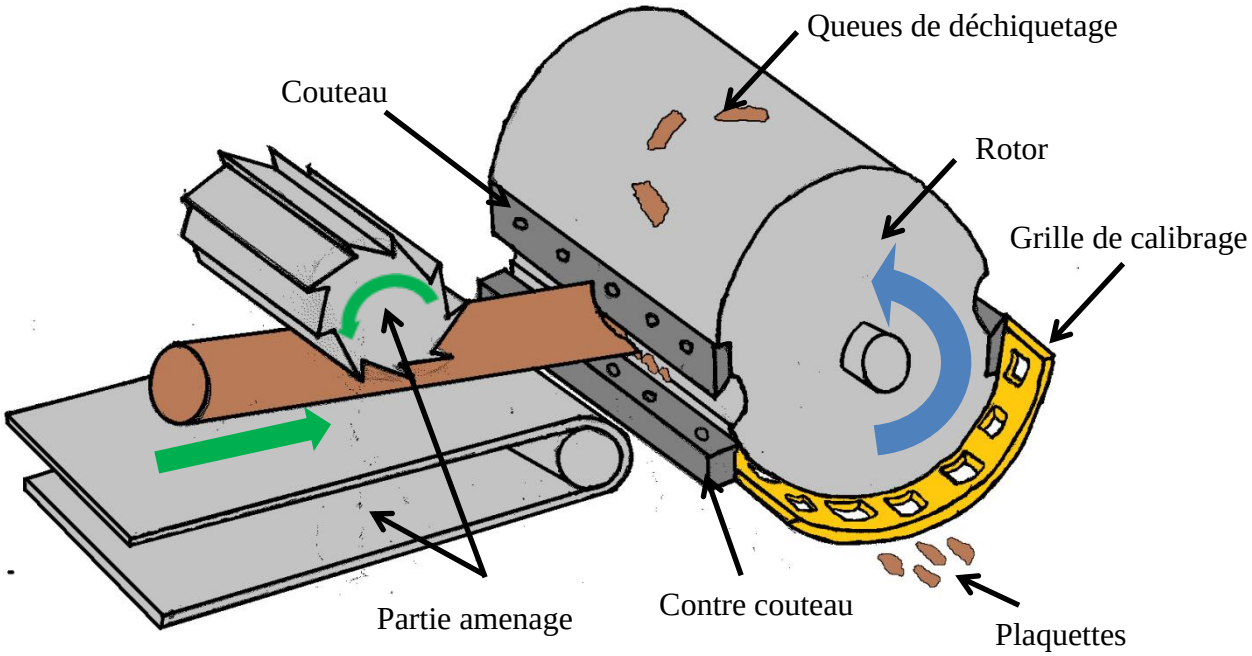


Figure 13 : Déchiqueteuse à rotor

Le tableau 3 regroupe l'ensemble des informations concernant la partie coupe et les caractéristiques techniques présentes chez les différents fabricants de déchiqueteuse. Ces informations sont basées sur les arguments commerciaux des différents constructeurs par rapport au type de machine.

		Déchiqueteuse à disque	Déchiqueteuse à rotor
Matière entrante	Types d'utilisation	Bois énergie ou compost	Toute utilisation
	Type de bois	Bois de taillis ou de futaie	Tous types de bois
	Diamètre admissible (mm)	< 760	< 910
	Corps étrangers tolérés	Non	Selon le rotor
Caractéristiques machine	Système de broyage	Disque	Rotor à couteaux fixes ou mobiles
	Prix (K€)	10 à 200	10 à 300
	Puissance (Ch)	35 à 300	35 à 600
	Débit de plaquettes produites (m^3/h)	5 à 150	5 à 400
	Consommation (L/h)	6 à 50	10 à 60
	Niveau sonore (dB)	> 90	> 90
Qualité produit fini	Système de calibrage (option)	Eventuellement peigne	Grille de calibrage
	Qualité (fine, queue)	Très peu de fines et	Très peu de queues

	queues

Tableau 3 : Récapitulatif des caractéristiques des déchiqueteuses à rotor et à disque

A partir de ces données, nous choisissons de travailler sur les déchiqueteuses à disque car ce système permet de réaliser des plaquettes mieux calibrées limitant ainsi les opérations supplémentaires comme le criblage. Le principe de coupe de cette déchiqueteuse est également plus simple que celui des déchiqueteuses à rotor. En effet, une opération d'affinage des copeaux au niveau de la grille de calibration vient s'ajouter à l'action de coupe au niveau du contre couteau pour les broyeurs à tambour. L'influence des paramètres de coupe avance à la dent fz, vitesse de coupe Vc, angle de taillant du couteau β et angle d'amenage du rondin ρ est étudié au cours de la thèse (figure 14).

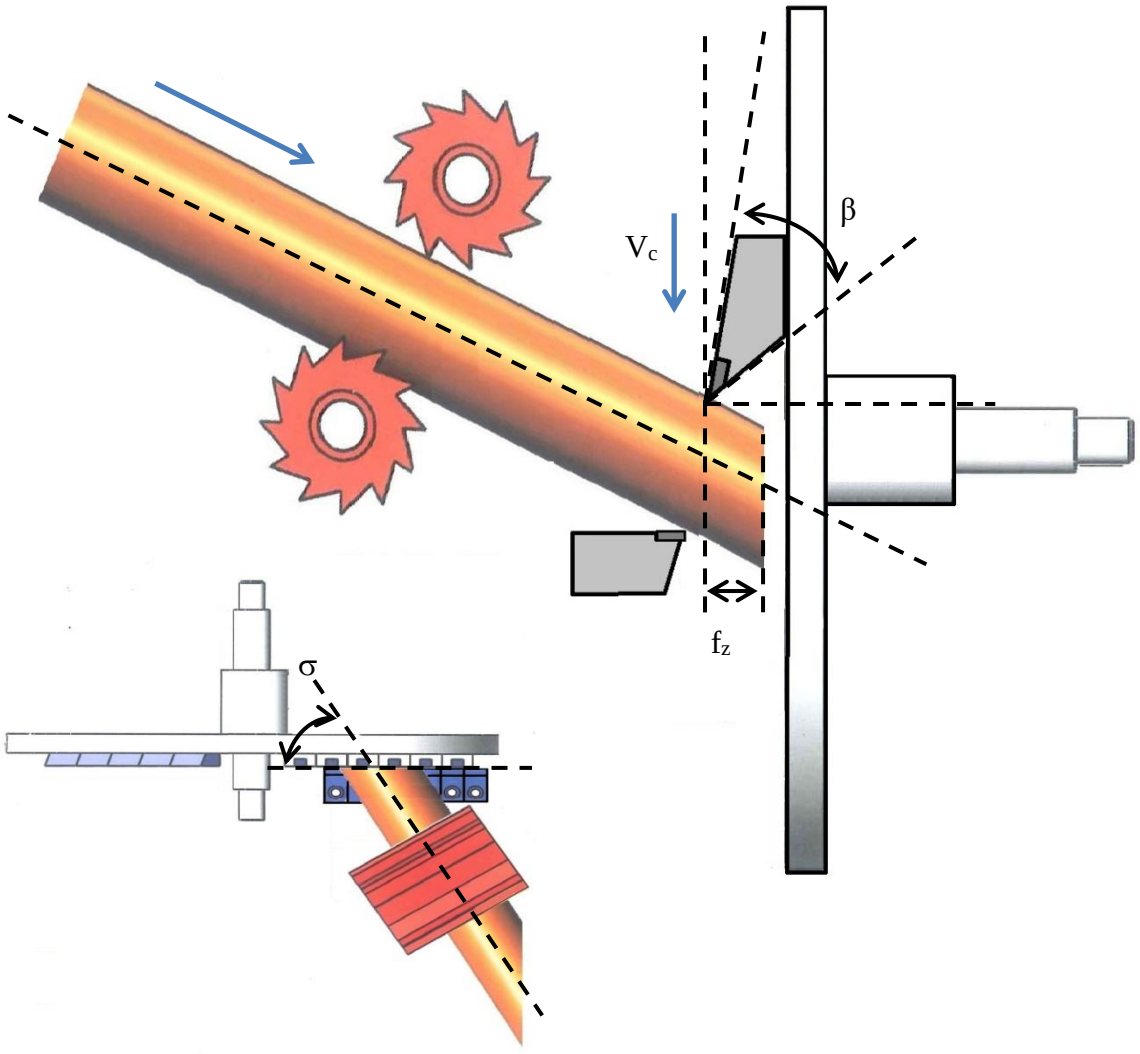


Figure 14 : Paramètres de coupe de la déchiqueteuse à disque étudié au cours de la thèse.

II.3. La partie éjection.

Cette partie permet d'évacuer les plaquettes de la zone de coupe vers une zone de stockage des plaquettes produites (figure 15). Deux systèmes sont couramment utilisés.

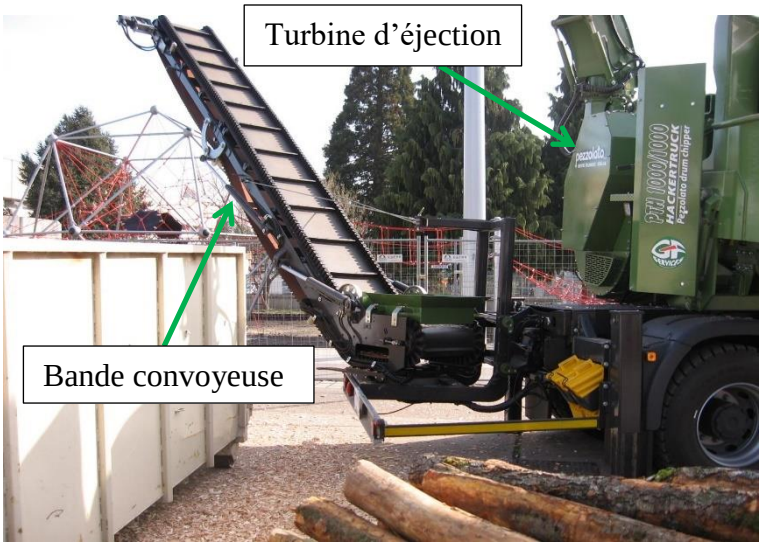


Figure 15 : Exemple des deux systèmes d'éjection (source : SL)

II.3.1. *La turbine d'éjection.*

L'éjection est assurée par une turbine qui propulse les plaquettes hors de la zone de coupe. Des pales fixées sur le disque en rotation éjectent les plaquettes par contact. Les pales créent également un flux d'air qui transporte les plaquettes donnant plus de puissance à l'éjection pour augmenter la distance d'éjection. Une goulotte permet de diriger le flux des plaquettes généré par la turbine vers la zone désirée. Certains systèmes combinent la géométrie du système de coupe et celle de l'éjection afin de rendre la machine plus compacte et moins couteuse.

II.3.2. *La bande convoyeuse.*

Une bande convoyeuse positionnée en dessous de la partie coupe récupère les plaquettes qui sont amenées à la zone désirée. La hauteur et la distance d'éjection sont limitées par la longueur de la bande et l'orientation de l'éjection est unique. Les intérêts de ce système sont qu'il consomme moins d'énergie, qu'il ne modifie pas les caractéristiques des plaquettes produites et qu'il se détériore moins rapidement au contact des plaquettes que la turbine.

II.4. La source de puissance pour la rotation de l'élément de coupe :

Après avoir décrit les trois parties constituant un broyeur, je souhaite décrire les différentes sources d'alimentation du broyeur qu'il est possible de rencontrer. En fonction des lieux de déchiquetage, la source d'alimentation des déchiqueteuses diffère, comme l'illustre le tableau 4.

Type de moteur	Descriptif	Lieux	Intérêts	Limites
Thermique indépendant	Moteur thermique fournit la puissance nécessaire à l'ensemble de la déchiqueteuse directement	Bords de route Plateformes industrielles et forestières	Autonomie élevée Mobilité Puissance (50 à 500 ch) Adapté à tous les terrains	Coût machine élevée Emissions de particules
Prise de force de tracteur	Le moteur thermique du tracteur fournit la puissance nécessaire à la déchiqueteuse via une transmission par cardan	Bords de route Plateformes industrielles et forestières	Coût machine faible Mobilité Adapté à tous les terrains	Dépendant de la source Puissance de 50 à 300 ch)
Electrique	Moteur électrique fournit la puissance nécessaire à l'ensemble de la déchiqueteuse directement	Plateformes industrielles avec installation électrique	Puissance 0 émission Coût machine	Poste stationnaire
Hydride thermique électrique	La puissance nécessaire de la déchiqueteuse est donnée par des moteurs électriques dont la puissance électrique est transmise par des batteries et une génératrice couplée à un moteur thermique	Bords de route Plateformes industrielles et forestières	Autonomie élevée Mobilité Puissance (50 à 500 ch) Adapté à tous les terrains Encombrement	Emissions de particules

Tableau 4 : Différentes sources d'énergie des déchiqueteuses.

Actuellement, le déchiquetage nécessite de déplacer facilement la machine vers les zones forestières, urbaines et rurales. Les déchiqueteuses sont généralement entrainées par un moteur thermique suite à ce besoin de mobilité. Des évolutions comme les déchiqueteuses hybrides font leur apparition ces dernières années afin d'améliorer la performance énergétique des déchiqueteuses. Selon un sondage réalisé par Spinelli et Hartsough [Spinelli, 2001] auprès de 31 propriétaires de déchiqueteuses mobiles italiens, 35% des déchiqueteuses sont alimentées par prise de force contre 65% qui possèdent leur propre moteur d'alimentation. Concernant le parc de déchiqueteuses vendues par Noremat, 55 % sont alimentées par prise de force alors que 45 % sont motorisées.

Au cours de la recherche, trois sources d'énergie différentes à savoir le moteur thermique, électrique et hydraulique sont comparées. Ces trois systèmes sont équipés d'un système de prise de force et disposent d'une puissance nécessaire permettant d'entrainer la déchiqueteuse.

III. Les aspects réglementaires et économiques des déchiqueteuses :

III.1. La réglementation et utilisation :

III.1.1. *La sécurité.*

Comme tous les appareils de coupe, le broyeur reste un appareil très dangereux. D'après l'étude de reconception menée par Al Bassit et Tricot [Al Bassit, 2012], 3 accidents et 2 décès sont survenus entre 2008 et 2010. La cause de ces accidents semble provenir principalement du happement de l'utilisateur par les rouleaux ameneurs de la déchiqueteuse suivi de la coupe des membres par les couteaux. C'est pourquoi la norme NF EN 13525 est mise en application sur la sécurité déchiqueteuses à chargement manuel, ainsi que la directive machine n° 2006/42/CE afin de définir les exigences que doivent répondre ces machines en termes de sécurité. Cette norme s'applique uniquement aux déchiqueteuses à chargement manuel et définit les exigences pour atteindre le niveau de sécurité attendu par la directive machine. Les constructeurs doivent par exemple éloigner l'utilisateur de la zone de dangers en utilisant une goulotte d'alimentation et en ajoutant des organes de sécurité. Pour les autres déchiqueteuses, seule la directive machine s'applique. Les pouvoirs publics par la note d'instructions ministérielle référencée SG/SAFSL/SDTPS/2016-700 sensibilisent les constructeurs à donner priorité à la sécurité dans la conception de leur matériel. Cette note rappelle la situation et le contexte ayant conduit à la décision de la Commission européenne du 17 décembre 2014 de retirer de la liste des normes harmonisées la norme relative aux déchiqueteuses à goulotte horizontale et chargement manuel. Elle présente les conséquences de ce retrait concernant les machines en service.

III.1.2. *Le bruit.*

Les machines actuelles sont dites très bruyantes car leur émission sonore mesurée en décibels est supérieure à 90 dBA au poste de travail et peut dépasser 110 dBA. Actuellement sur les déchiqueteuses à chargement manuel, le bruit émis au poste de chargement est compris entre 95 et 105 dBA [HSL, 2008], obligeant l'utilisateur à s'équiper de protections auditives conformément au code du travail.

III.1.3. *La pollution par les machines.*

La source de puissance généralement utilisée pour alimenter les déchiqueteuses est le moteur thermique. Ce type de moteur permet de fournir des puissances élevées entre 30 et 500 ch. Il est très mobile et peut être utilisé sur tous les terrains avec une très bonne autonomie. Néanmoins, ce type de moteur émet des particules polluantes et des gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone. Ces moteurs font l'objet de recherche et développement afin de les rendre plus performants et de limiter leurs émissions polluantes. Une étude de Manzone [Manzone, 2015] évalue les émissions de polluants de trois déchiqueteuses. Actuellement, la majorité des études sur les déchiqueteuses sont consacrées à réduire l'énergie nécessaire pour broyer le bois, ce qui permet directement de réduire les émissions de polluant tout en cherchant également à utiliser d'autres types de moteurs. Un brevet n° FR2980124 B1 déposé par Bugnot Michel [Bugnot, 2011] a également proposé de laisser le moteur se ralentir lorsque l'opérateur n'est pas présent en face de la goulotte. Notre travail s'inscrit tout à fait dans cette dynamique

La déchiqueteuse choisie pour notre étude est une machine du commerce, qui respecte les normes de sécurité en vigueur. Le bruit de la machine se trouve dans les plages de bruit des déchiqueteuses. Nous ne travaillons pas sur les aspects sécurité, acoustique ou pollution des déchiqueteuses dans le cadre de la thèse, même si ces aspects sont importants lors de la conception d'un broyeur.

III.2. Les coûts machines

Comme je l'ai indiqué précédemment, le prix des plaquettes est lié à leur coût de fabrication. Dans le processus de fabrication des plaquettes, il n'y a que deux coûts : le coût du bois et le coût machine. Dans notre étude, je ne parle que du coût machine.

III.2.1. *Le coût horaire des machines :*

Le coût horaire d'utilisation d'une déchiqueteuse prend en compte le coût de son acquisition, de son entretien, de la main d'œuvre et des outils liés à la machine comme détaillé dans le tableau 5.

Désignation du coût	Description	Information sur la valeur
Investissement machine	Prix d'achat de la machine	Donnée par le vendeur en €
Utilisation horaire annuelle	Temps d'utilisation de la machine par an	Estimation en heure / an
Amortissement annuel	Estimation de la perte de valeur de la machine par an	Estimation en %
Durée de vie de la machine	Nombre d'années d'utilisation de la machine	Estimation en année
Valeur résiduelle	Valeur de la machine après les X années d'utilisation	Estimation en €
Frais financiers annuels	Frais d'emprunts	Estimation en €
Coûts fixes	(Investissement – Valeur résiduelle) / (Utilisation horaire annuelle x durée de vie) + Frais financier / Utilisation horaire	€/h
Coût Réparation et Maintenance	Coût de l'entretien de la machine par mois	Estimation en €/h
Coût main d'œuvre	Coût du personnel utilisant la machine par mois	Estimation en €/h
Coût carburant	Coût d'utilisation du carburant par mois	Estimation €/h
Coûts variables	Coût de réparation et maintenance + Coût gasoil + Coût main d'œuvre (€/h)	
Coût total	Coûts variables + coûts fixes (€/h)	

Tableau 5 : Détail des différents coûts machines

Les coûts fixes sont les coûts d'acquisition de la machine. Le prix de la machine dépend de la productivité, de la puissance et du type de machine.

Les coûts variables sont les coûts liés à l'entretien et au fonctionnement de la machine. Ils comprennent les coûts en carburant et en main d'œuvre (M.O), qui varient fortement d'un pays à l'autre. Les coûts de réparation et de maintenance (R&M) font également partie des coûts variables.

La figure 16 présente une synthèse des coûts horaires machines des broyeurs en fonction de leur puissance, réalisée à partir de différentes études [Webster, 2007], [Spinelli, 2001], [Spinelli, 2014], [Asikainen, 1998], [Bois énergie, 2008]. Les coûts horaires machines présentés correspondent au coût total défini dans le tableau 5.

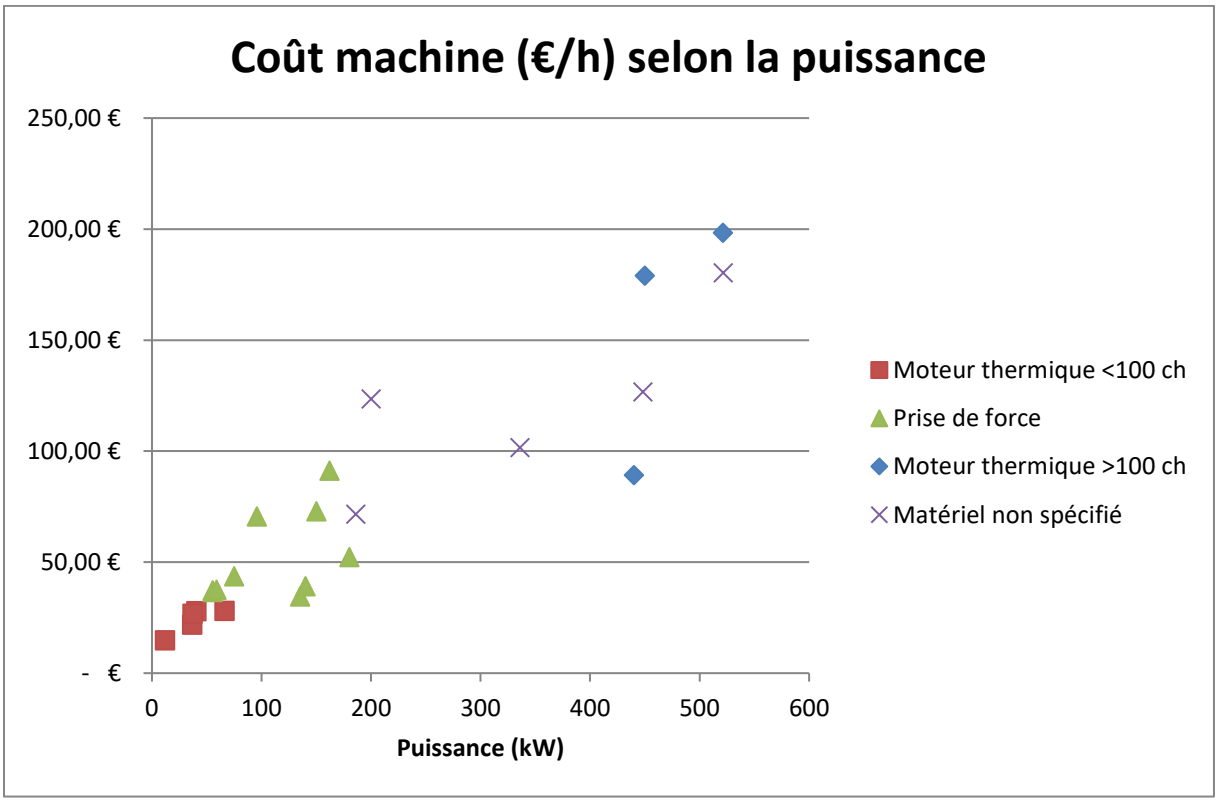


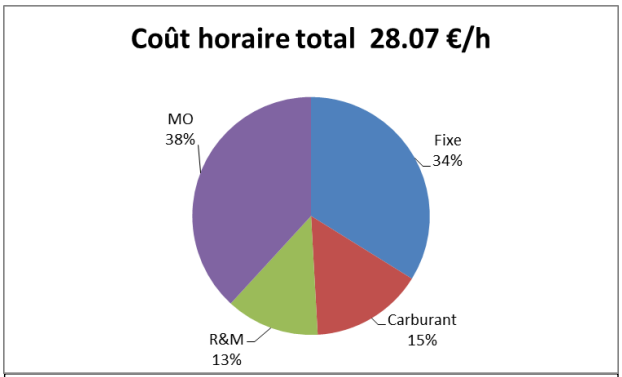
Figure 16 : Coût horaire des déchiqueteuses en fonction de la puissance globale

Ce graphique montre qu'il y a une évolution du coût horaire en fonction de la puissance de la machine. En effet, le prix d'investissement, le coût R&M et le coût en carburant sont plus élevés pour les machines plus puissantes. La disparité des données peut s'expliquer de plusieurs façons et est illustrée sur la figure 17.

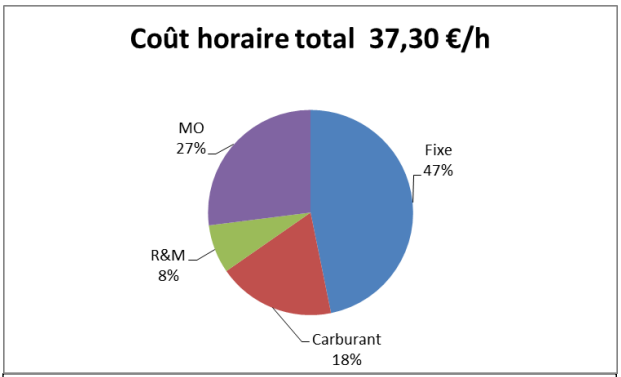
Tout d'abord, une augmentation de la durée d'exploitation d'une machine permet d'amortir son coût initial sur un nombre d'années plus élevé. Cependant, plus la machine est vétuste, moins la machine est fiable et efficace, augmentant ainsi les coûts R&M ainsi que sa consommation en carburant.

Ensuite, plus la machine est complexe et plus le niveau de qualification de l'opérateur doit être élevé, entrainant un coût M.O. plus élevé.

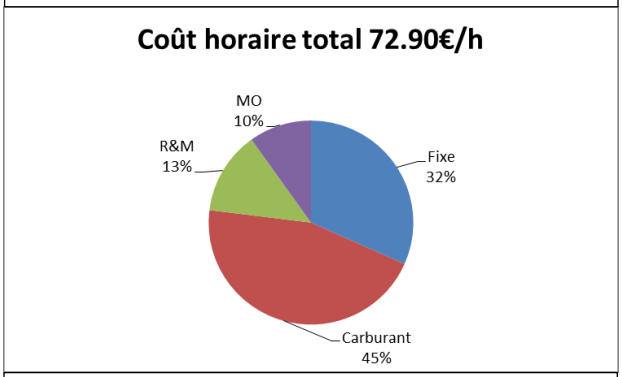
Enfin, les rémunérations, le prix du carburant, le prix de la machine, le prix des pièces et le coût du changement (R&M) varient d'un pays à l'autre.



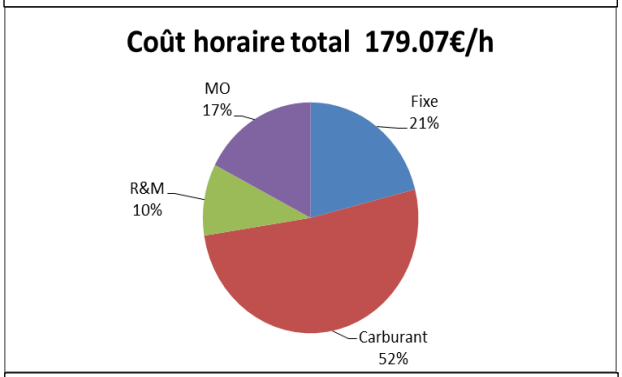
a) Déchiqueteuse 66 kW Angleterre [Webster, 2005]



b) Déchiqueteuse + tracteur 55kW Angleterre [Webster, 2007]



c) Déchiqueteuse + tracteur 150kW République Tchèque [Liska, 2010]



d) Déchiqueteuse 450 kW Italie [Spinelli, 2015]

Figure 17 : Importance relative des coûts MO, R&M, fixe et en carburant sur le coût horaire de broyeurs dans différents pays.

Suivant les pays, le coût lié au carburant varie de 15 à 50% du coût horaire. Après la mécanisation de l'alimentation qui est déjà réalisée sur de nombreux broyeurs, la réduction de la consommation en carburant du broyeur est le deuxième poste qui a le plus d'influence sur la réduction du coût horaire du broyage.

III.2.2. *Le coût de la machine à la tonne de plaquettes produites :*

Une autre façon d'aborder l'efficacité énergétique des broyeurs est de s'intéresser aux coûts estimés pour produire une quantité de plaquettes. Actuellement, l'unité pour évaluer la quantité de plaquettes produite est la tonne de plaquettes sèches produites (unité : t_{Ps}).

Le coût à la tonne de plaquettes sèches est défini par le rapport entre le coût horaire de la machine en €/h et la quantité de plaquettes produites en une heure de déchiquetage en t_{Ps}/h. La figure 18 illustre la méthode utilisée pour évaluer ce coût.

	Machine manuelle dia 25			
Investissement	22 000			
Débit horaire moyen mc/h	7 (branchage)		15 (perche)	
Utilisation annuelle en heures de rotor/an	200	400	200	400
Volume annuel produit (map)	1400	2800	3000	6000
Volume annuel en tonnes sèches	378	756	810	1620
Durée d'amortissement	7	5	7	5
Taux dépréciation	15	15	20	20
Valeur résiduelle	7053	9762	4614	7209
Amortissement annuel	2135	2448	2484	2958
Frais financiers annuels (4.5%)	654	715	599	657
Charges fixes/h rotor	13.95	7.90	15.41	9
Entretien/réparation €/h	5	5	5	5
Coût /h rotor	19	13	20	14
Tracteur 100 ch (carb compris)**	28	28	28	28
Main d'œuvre déchiqueteuse * Principale complémentaire	1+2 MO 30 45	1+2 MO 30 45	1+2 MO 30 45	1+2 MO 30 45
Total €/h rotor	122	116	123	117
Coût en €/map	**17.4**	**16.6**	**8.2**	**7.8**
Coût en €/t sec	**70**	**66**	**33**	**31**

$$\text{Productivité} = \frac{\text{Volume annuel}}{\text{Utilisation annuel}}$$

$$\text{Coût machine en } t_{Ps} = \frac{\text{Coût machine à l'heure}}{\text{productivité}}$$

Figure 18 : Exemple de calcul du coût par tonne de plaquettes sèches pour une déchiqueteuse à chargement manuel [Bois énergie, 2008]

Ce critère représente le coût de production des plaquettes. Il est très intéressant puisqu'il permet de définir le coût réel des plaquettes par tonne de plaquettes sèches. Il permet également de comparer l'efficacité des machines en prenant en compte la quantité de plaquettes produites appelée également productivité. Ce calcul montre que le coût des plaquettes est directement lié à la productivité de la machine, mais pas seulement comme le montre la figure 19.

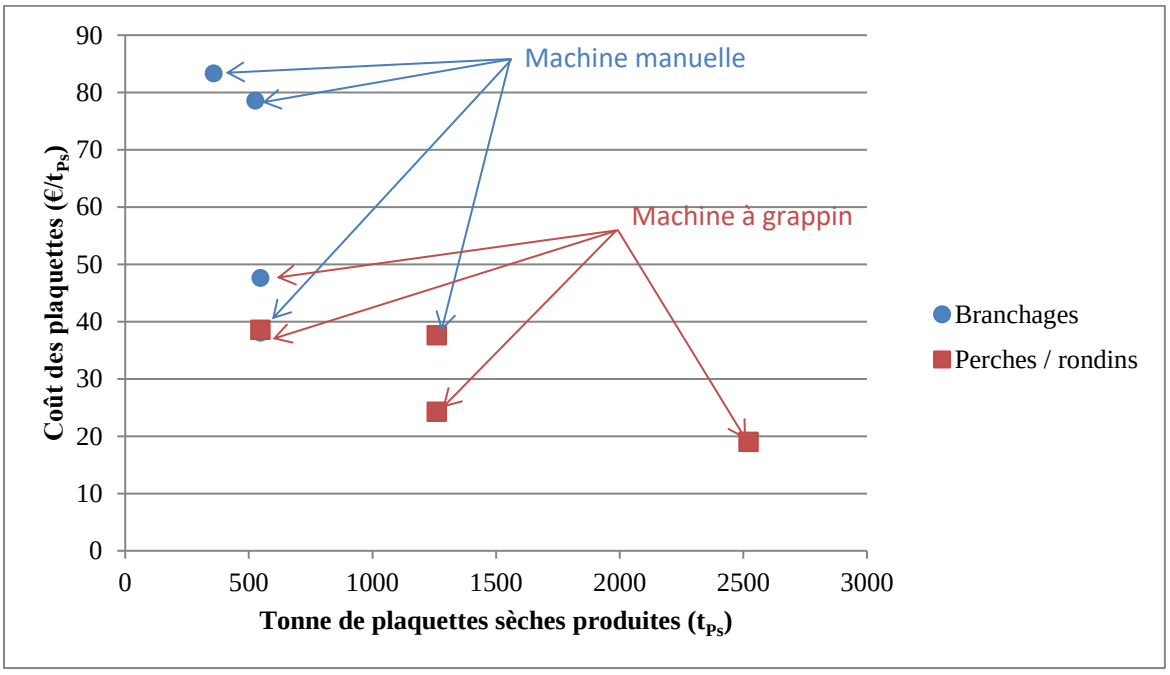


Figure 19 : Evolution du coût de fabrication des plaquettes en fonction de la quantité produite, du type de bois et du type de machine. [Bois énergie, 2008]

La figure 19 permet de mettre en évidence plusieurs points. Tout d'abord, le coût des plaquettes dépend du type de machine, de la productivité, et de la matière à broyer. De plus, l'investissement et le coût horaire plus élevé pour une machine à grappin (99000 € et 134,25 €/h) conduit à produire une plaquette moins couteuse de 30 à 50% qu'une machine à alimentation manuelle (22000 € et 119,5 €/h). Il faut enfin rappeler que la productivité d'une machine manuelle est quasiment identique à celle d'une machine à grappin pour un broyage de rondins ou de perches mais s'effondre dans le cas du broyage de branchages.

Les études de [Webster,2005], [Liska, 2010] et [Mihelic, 2015] obtiennent des coûts à la tonne sèche pour les déchiqueteuses à 20 €/t_{Ps}. En plus d'augmenter la productivité en diminuant la consommation, ces études ont mis en évidence l'importance de diminuer le nombre d'opérateurs sur la machine et soulignent que le volume apparent de la matière à broyer a également une grosse influence. Au niveau des machines de fortes puissances, nous constatons que le coût de carburant est le coût le plus important sur les machines et que le coût machine à l'heure augmente avec la puissance. La forte consommation de carburant de 50 à 60 L/h est la cause directe de ce coût élevé (figure 18). Ainsi, utiliser des machines moins énergivores et donc moins consommatrice en carburant permettra de réduire ce coût.

IV. Conclusions

Le broyage du bois trouve son origine dans la volonté de réduire en volume des déchets issus de la transformation du bois et de la taille des haies, des accotements routiers et fluviaux. Les plaquettes bois sont devenues par la suite des produits connexes de la transformation du bois possédant une valeur marchande. Ils ont en effet l'avantage d'être calibrés, permettant ainsi l'alimentation automatique des chaudières en plaquettes. Notre recherche est centrée autour des plaquettes bois pour les petites chaudières. La production de ces plaquettes est réalisée au moyen de déchiqueteuses à disque ou à rotor. Les déchiqueteuses restent des machines dangereuses, bruyantes, polluantes et couteuses. Les enjeux économiques, écologiques et environnementaux sont évidents mais il reste à rendre les broyeurs plus sûrs, plus propres et plus économiques. En dernier lieu, nous avons montré que le coût de la consommation en carburant représente entre 20 et 50 % du coût horaire de fonctionnement de la déchiqueteuse. Cette constatation nous amène à augmenter l'efficacité énergétique des broyeurs, ce qui est un des objectifs de la thèse. Nous allons dans le chapitre suivant définir les critères de performance énergétique des broyeurs développés au cours de la thèse et présenter les outils pour les mesurer.

Chapitre 2 :

Détermination de la performance énergétique de coupe

Consommer moins d'énergie permet à toute machine d'être à la fois plus écologique et d'avoir un coût de fonctionnement plus économique. Développer un bon critère de performance énergétique permet de comparer différentes machines d'usage équivalent du point de vue de leur consommation énergétique. La consommation d'une machine varie fortement en fonction de son usage. Tout d'abord, les déchiqueteuses connaissent des périodes de fonctionnement non stationnaires telles que les démarrages et les arrêts comme toutes machines. Ces périodes ont une forte influence sur leur consommation d'énergie du fait de la forte inertie de leur rotor. De plus, les déchiqueteuses passent alternativement d'une phase de coupe à celle de rotation à vide de leur rotor en attendant d'être alimentée en matière. Il convient de proposer un critère de performance énergétique et une méthodologie de mesure de ce critère prenant en compte les spécificités décrites précédemment.

Dans ce chapitre, un état de l'art des méthodes qui existent est réalisé pour évaluer la performance énergétique des déchiqueteuses de manière générale jusqu'à la coupe. Je recense dans une première partie l'ensemble des critères de performance énergétique présents dans la littérature ainsi que les moyens existants actuellement pour les mesurer. Le critère de performance énergétique choisi est défini à ce moment-là pour la suite de mes travaux de recherche. Un état de l'art sur les différents travaux de recherche qui ont été menés sur les déchiqueteuses clôt ce chapitre pour définir les axes de recherche dans ce domaine à aborder.

I. Les différents critères de performance énergétique évalués sur les déchiqueteuses

Le critère de performance énergétique des déchiqueteuses est défini comme le rapport entre l'énergie consommée par la déchiqueteuse et la quantité de plaquettes produites ou la quantité de bois déchiqueté. L'énergie consommée est définie de deux manières différentes : soit par la quantité de carburant consommée en litre de carburant (majoritairement du gasoil) pour les moteurs thermiques, soit par le nombre de kilowattheure pour les moteurs électriques. Le bois à déchiqueter et les plaquettes produites peuvent être définis soit par leur volume, soit par leur masse. Les différents critères de performance énergétique rencontrés dans la littérature sont répertoriés dans le tableau 6.

	Bois			Plaquettes		
	Volume	Masse brute	Masse anhydre	Volume	Masse brute	Masse anhydre
Consommation de carburant	L/m^3	L/t_{Bh}	L/t_{Bs}	L/MAP	L/t_{Ph}	L/t_{Ps}
Consommation d'énergie	kWh/m^3	kWh/t_{Bh}	kWh/t_{Bs}	kWh/MAP	kWh/t_{Ph}	kWh/t_{Ps}

Tableau 6 : Critères de performances énergétiques

Afin de mesurer ces critères de performance énergétique, plusieurs méthodes sont utilisées. Le choix du critère dépend de la complexité, de l'encombrement, des coûts, de la méthodologie et des instruments de mesure.

I.1. La quantité de bois broyé

Le rondin de bois peut être considéré de forme tronconique. Son volume est calculé en utilisant les diamètres en bout du rondin et sa longueur. La formule utilisée pour calculer le volume de bois est :

$$V_{Bois} = \frac{1}{3} \times \pi \times L_{Bois} \times \left(\emptyset^2_{Bout\ Bois,1} + \emptyset^2_{Bout\ Bois,2} + \emptyset^2_{Bout\ Bois,1} \times \emptyset^2_{Bout\ Bois,2}\right)$$

V_{Bois} : Volume de bois (m^3), L_{Bois} : Longueur du rondin (m), $Ø_{Bout\ Bois,\ i}$: Diamètre en bout pour chaque extrémité noté 1 et 2 (m)

Cette méthode devient inutilisable pour d'autres sources de matière ligneuse. Peser la quantité de matière ligneuse broyée permet de contourner cette difficulté, mais cette mesure dépend de l'humidité et de l'essence de bois broyé. C'est pour cette raison que la masse anhydre est généralement utilisée car elle représente la masse du bois sans tenir compte de la masse d'eau contenue dans le bois.

I.2. La quantité de plaquettes déchiquetées.

La plaquette est un produit plus uniforme que la matière broyée ce qui facilite sa mesure. On peut soit peser, soit déterminer le volume de plaquettes. Le volume occupé par les plaquettes dans un semi-remorque est une grandeur souvent utilisée car elle est peu couteuse et facile à mesurer. Cependant, le volume de plaquettes entre différents essais est très variable. En effet, le volume de plaquettes défini en MAP est une unité qui varie en fonction de la taille des plaquettes, de leur disposition et de leur compacité. La mesure de la masse de plaquettes déchiquetées est également préférée, avec toujours la restriction de l'eau présente dans le bois. Spinelli et al. [Spinelli, 2011, 2012a, 2013], Nati et al. [Nati, 2014] Eliasson et al. [Eliasson 2015] utilisent cette méthode en pesant la quantité de bois déchiqueté puis en calculant la quantité de bois anhydre par la formule de détermination de l'humidité des plaquettes selon l'ancienne norme NF EN 14774.

I.3. L'énergie consommée par la déchiqueteuse.

Cette énergie peut être déterminée à différents endroits de la chaîne cinématique de la déchiqueteuse. L'énergie est déterminée soit par l'énergie directement consommée par la source d'énergie pour fournir l'énergie nécessaire à la déchiqueteuse [Spinelli, 2011], [Di Fulvio, 2015], soit par l'énergie consommée entre la source d'énergie et la déchiqueteuse [Kovac, 2011], [Spinelli, 2012a] soit par les efforts qui sont induits lors de la coupe et au niveau de la déchiqueteuse [Abdallah, 2010], [Hellström, 2010]. Ces trois méthodes actuellement utilisées sont décrites dans les parties II.1. et II.2.

I.4. Le critère de performance énergétique choisi pour notre recherche

La disparité des critères de performance énergétique rend difficile le travail de comparaison entre les données des différentes déchiqueteuses étudiées dans la littérature. En effet, certains chercheurs expriment leurs résultats en litre de carburant par MAP [Magagnotti, 2016], [Manzone, 2015], d'autres les expriment en litre par tonne de plaquettes sèches ou humides

[Spinelli, 2013, 2015, 2016], [Nati, 2010, 2014], [Eliasson, 2015]. Pour finir, d'autres chercheurs utilisent le kilowattheure par tonne de plaquettes sèches [Di Fulvio, 2015]. Quel que soit le choix de l'unité pour définir la performance énergétique de la déchiqueteuse, une valeur la plus basse possible signifie que la machine est meilleure énergétiquement car la machine demande moins d'énergie pour une même quantité de plaquettes produites. Ces critères peuvent induire en erreur le lecteur qui s'attend à avoir une machine plus performante lorsque la valeur de celle-ci est la plus élevée. Nous proposons d'utiliser au cours de nos travaux un critère de performance énergétique définit par :

$$\frac{Tonnes\ de\ plaquettes\ sèches\ produites}{Energie\ consommée\ par\ la\ déchiqueteuse}\ \text{unité :}\ \frac{t_{Ps}}{kWh}$$

Le choix du critère « tonnes de plaquettes sèches » a tout d'abord l'avantage de s'affranchir à la fois du degré d'humidité et de la forme de la biomasse broyée. De plus, le réglage des paramètres de broyage qui modifie la taille des plaquettes obtenues et par conséquent le coefficient de foisonnement n'a pas d'influence sur les tonnes de plaquettes sèches produites. Cette donnée permet de prendre en compte uniquement ce qui a été produit et cette donnée est facilement quantifiable.

L'énergie consommée par la déchiqueteuse est exprimée en kilowattheure, ce qui permet d'intégrer toutes les sources d'énergie qui existent. La détermination de l'énergie de cette manière permet également d'évaluer toutes les déchiqueteuses quelle que soit sa source d'énergie. La méthodologie de détermination de l'énergie dans le cadre de mes travaux de recherche est détaillée dans le chapitre 3 II.

Pour finir, le choix de diviser le nombre de tonnes de plaquettes sèches produites par l'énergie consommée par la déchiqueteuse rend le critère plus réalise en plus d'être robuste et précis. De cette manière, une augmentation de la valeur de notre critère de performance énergétique correspond à une amélioration de performance de la déchiqueteuse.

II. L'état de l'art des méthodes de mesure des performances énergétiques.

Maintenant que le critère de performance est défini, la méthodologie de mesurer l'énergie consommée reste à choisir. Les méthodologies actuellement utilisées pour la détermination de l'énergie à chaque endroit de la déchiqueteuse sont illustrées sur la figure 20.

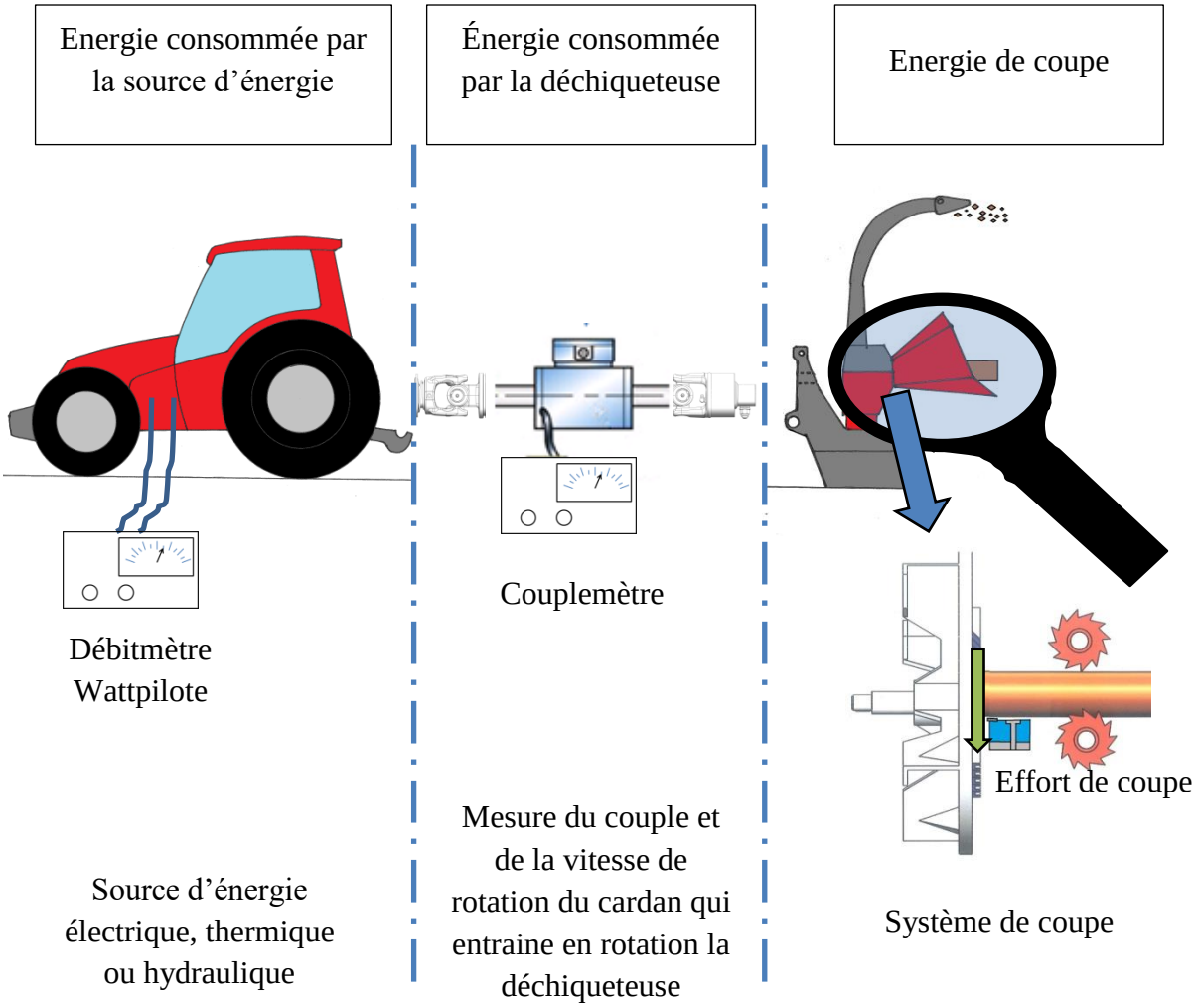


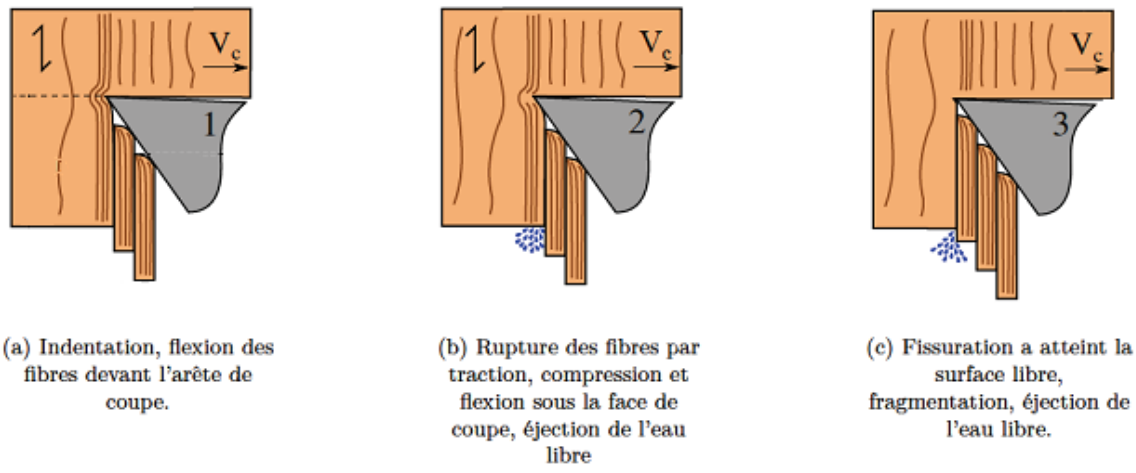
Figure 20 : Méthodes d'évaluation des performances énergétiques de la déchiqueteuse sur le système

II.1. L'énergie de coupe

Mesurer l'énergie consommée lors de la coupe permet de caractériser l'opération de broyage au plus près de la zone de coupe. Deux méthodes de mesures existent aujourd'hui pour déterminer cette énergie. Avant de les présenter, je vais d'abord introduire cette partie par le mécanisme de formation des plaquettes.

II.1.1. *Le mécanisme de formation des plaquettes*

[Hartler 1963], [Lauchlman, 1979], [Hellström, 2010] et [Pfeiffer, 2015] ont étudiés le mécanisme de formation des plaquettes pour des vitesses de coupe inférieures à 7m/s. Cette vitesse est bien inférieure à la vitesse de coupe en broyage qui est comprise entre 20 et 40 m/s. L'étude la plus récente qui étudie la formation des plaquettes est réalisée pour des vitesses de 6,8 m/s [Pfeiffer, 2015]. Lors de son étude, Pfeiffer identifie le mécanisme de formation des plaquettes sur du hêtre et du douglas. Il identifie trois phases illustrées sur la figure 21.



(a) Indentation, flexion des fibres devant l'arête de coupe.

(b) Rupture des fibres par traction, compression et flexion sous la face de coupe, éjection de l'eau libre

(c) Fissuration a atteint la surface libre, fragmentation, éjection de l'eau libre.

Figure 21 : Mécanisme de formation des plaquettes [Pfeiffer, 2015]

Tout d'abord, le couteau pénètre dans le bois où l'arête de coupe fait fléchir les fibres du bois. Lorsque la limite de traction du bois est atteinte au niveau de l'arête de coupe, les fibres se séparent. C'est la deuxième phase de fabrication des plaquettes. Selon Hartler [Hartler 1963], cette rupture traduit la longueur de la plaquette (figure 22). Enfin, lorsque la limite de cisaillement ou de fendage du bois est atteinte, une fissure est générée et se propage de l'arête de coupe jusqu'à la zone libre du bois. Cette fissuration dissocie totalement une partie du bois créant ainsi la plaquette. C'est la troisième phase et le cycle de formation de la plaquette recommence à la première phase. Pour Hartler, ce cisaillement donne l'épaisseur de la plaquette. Ce mécanisme de formation est également identique à celui évoqué par Mc Lauchlman [Mc Lauchlan,1979]. Ces études mettent en évidence une partie de la formation des plaquettes mais ne détermine pas comment les plaquettes se dissocient pour donner la largeur de celle-ci que traduit Hartler par fracture.

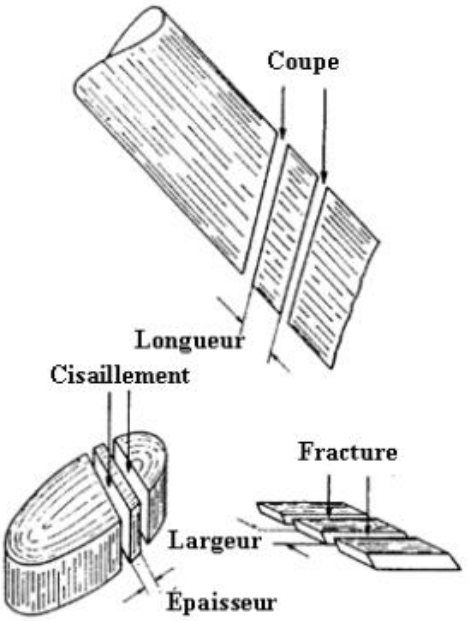


Figure 22 : Formation de la plaquette selon Hartler [Hartler, 1963]

Hellström identifie trois types de formation des plaquettes selon les frottements du couteau et du bois (figure 23) et pour une vitesse de coupe de 0.001m/s. Le mode de formation des plaquettes illustré sur la figure 23 correspond à la formation de la plaquette pour un frottement du couteau sur le bois du plus faible au plus important.

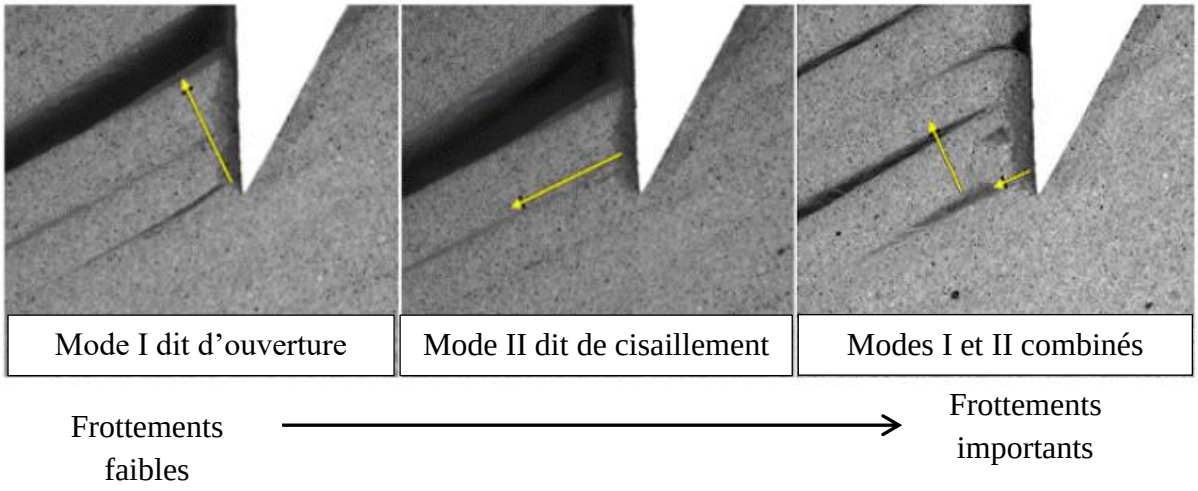


Figure 23 : Les trois modes de formation de formation des plaquettes selon l'importance des frottements du couteau contre le bois [Hellström : 2010]

Le mode I de la mécanique de la rupture : le mode d'ouverture provient d'une traction normale au plan de fissure. Le mode II, nommé mode de cisaillement est une formation de la plaquette par fissuration dans la longueur de la plaquette suite à un cisaillement agissant parallèlement au plan de fissure. Il semble que cette formation ressemble à celle évoquée par Pfeiffer. Le troisième mode correspond à la combinaison des deux modes présentés où la plaquette se fissure dans la longueur puis se décolle du couteau.

Selon la formation de la plaquette, la forme des plaquettes est différente selon les efforts de coupe. C'est pourquoi, la mesure des efforts de coupe lors de la coupe nécessite des outils et méthodes complexes.

II.1.2. *La mesure de l'effort subi par le porte couteau*

Hellström [Hellström, 2011] a instrumenté une déchiqueteuse à disque en remplaçant le porte couteau classique par une platine dynamométrique tridimensionnelle (figure 24).

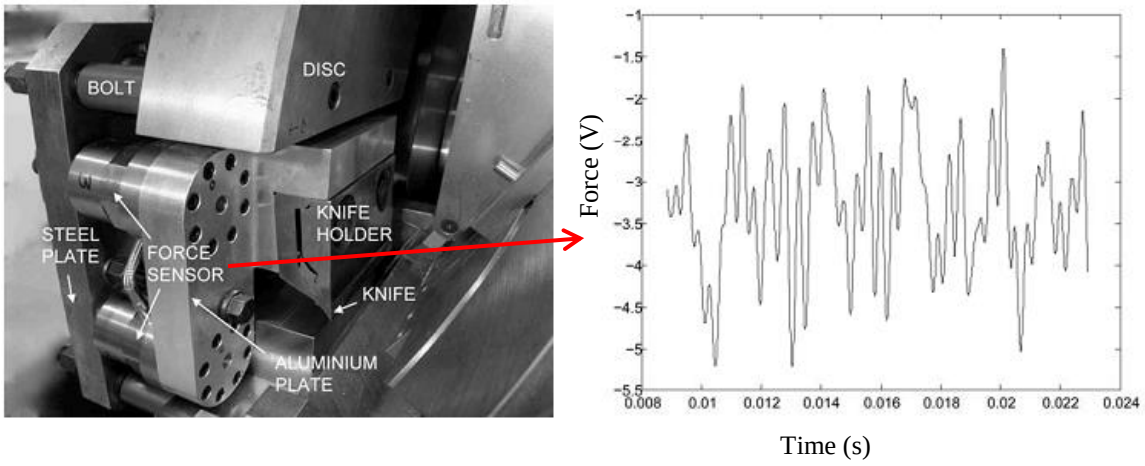


Figure 24 : Système de mesure et allure de l'effort de coupe par Hellström [Hellström, 2011]

Lors de la coupe, l'effort de coupe subi par les supports de couteaux est mesuré. Les erreurs de mesure dues au comportement dynamique de la platine sont corrigées à l'aide d'un modèle masse-ressort. Connaissant la vitesse de coupe par la mesure de vitesse de rotation du disque, l'énergie de coupe est déterminée pour une fréquence d'acquisition de 50 kHz. Ce système a pour inconvénient de modifier la dynamique de la déchiqueteuse par l'introduction du capteur de mesure, et de créer une incertitude sur la précision de la mesure par le traitement du signal purement théorique et non expérimental.

II.1.3. *L'effort de coupe obtenu par mesure de la déformation du contre couteau*

Abdallah et al. [Abdallah, 2010] proposent une seconde méthode pour mesurer les efforts de coupe à partir de la déformation du contre-couteau (figure 25).

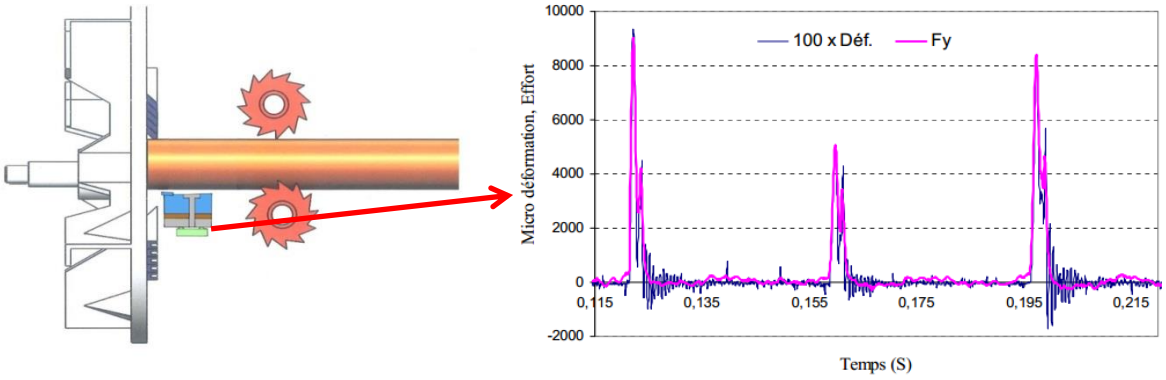


Figure 25 : Mesure et allure de l'effort de coupe par Abdallah [Abdallah, 2010]

Cette méthode a pour avantage de ne pas modifier la déchiqueteuse et de conserver intact son comportement dynamique. Dans un premier temps, la sensibilité dynamique reliant la déformation du contre couteau à l'effort subit par celui-ci est mesurée lorsque la déchiqueteuse est à l'arrêt. Pour cela, un effort connu est appliqué sur le contre couteau par un marteau d'impact et la déformation résultante est mesurée. Cette méthode s'inspire des travaux de Auchet et al. [Auchet, 2004]. Connaissant l'effort et la vitesse de coupe, l'énergie

de coupe par unité de largeur du rondin est ainsi déterminée. Cette méthode a cependant pour inconvénient de ne mesurer que la composante de l'effort normale à la face du contre couteau.

En conclusion, ces méthodes de mesure de l'effort de déchiquetage au plus près de la coupe permettent de mieux comprendre les facteurs influençant la formation des plaquettes bois. D'autres méthodes visent à mesurer la performance énergétique des déchiqueteuses entre la déchiqueteuse et la source d'énergie et au niveau de la source d'énergie.

II.2. L'énergie consommée par la déchiqueteuse.

L'énergie d'une opération de déchiquetage est définie à partir de la mesure de la puissance consommée par la déchiqueteuse et de la durée du déchiquetage. L'énergie calculée est l'aire sous la courbe de la puissance en fonction du temps (figure 26). Cette mesure est utilisée par Kovac et al. [Kovac, 2011], Spinelli et al. [Spinelli, 2012a], [Spinelli, 2012b], [Spinelli, 2013], Assirelli et al. [Assirelli 2013], Pochi et al. [Pochi, 2015]. Un couplemètre et un capteur de vitesse sont positionnés au niveau de la transmission par cardan entre le tracteur et la déchiqueteuse. La puissance de broyage est définie par le produit du couple transmis par le cardan et de la vitesse de rotation de l'arbre de la déchiqueteuse :

$$Puissance\ (kW) = Couple\ (Nm)\ \times\ Vitesse\ de\ rotation\ (rad/s)$$

L'allure de la courbe de puissance de déchiquetage au cours du temps (figure 26) permet facilement de déterminer les zones de déchiquetage.

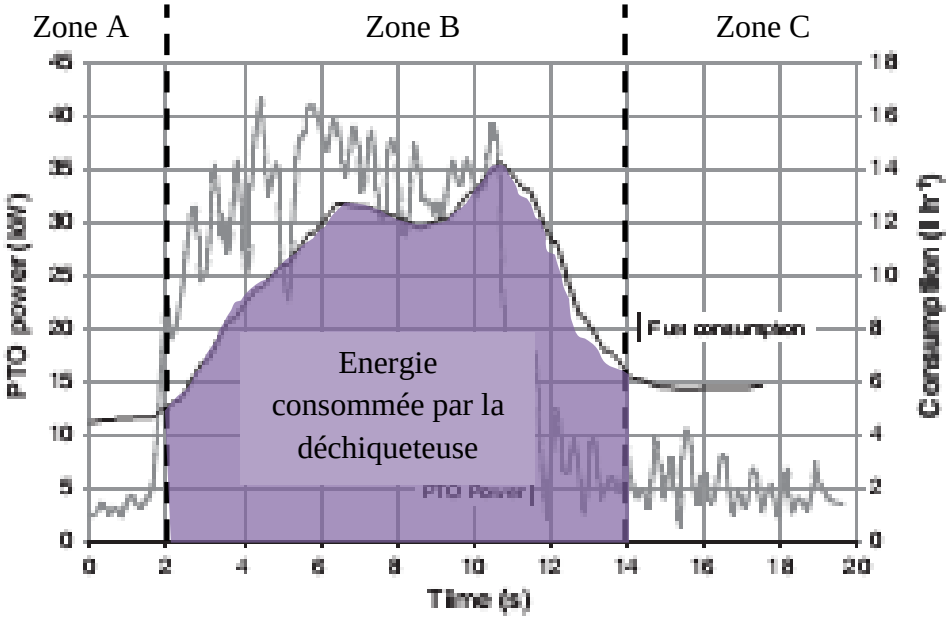


Figure 26 : Mesure de puissance et consommation de carburant lors d'un essai de déchiquetage [Spinelli, 2012a]

Avant le déchiquetage (Zone A) la puissance est constante et est minimale. Au cours du déchiquetage (Zone B) la puissance augmente fortement jusqu'à se stabiliser à une certaine valeur. Au cours du déchiquetage du bois, la puissance décroît légèrement. Après le déchiquetage (Zone C) la puissance s'effondre et revient à sa valeur de départ. Lorsque les

zones de déchiquetage sont définies, l'énergie consommée par la déchiqueteuse peut être quantifiée.

La détermination de l'énergie par cette méthode permet d'évaluer les déchiqueteuses dans leur globalité.

II.3. L'énergie consommée par la source d'énergie

II.3.1. *La puissance fournie à la déchiqueteuse par une source de puissance électrique.*

Abdallah et al. [Abdallah 2010] et Di Fulvio et al. [Di Fulvio 2015] déterminent l'énergie en mesurant la puissance qui est transmise par la source de puissance électrique à la déchiqueteuse. Le produit de l'intensité et de la tension électrique délivrée au moteur permet d'obtenir la puissance consommée. La précision de mesure est définie par le système de mesure de la puissance. Un exemple de la mesure de puissance électrique au niveau de la source d'énergie est illustré sur la figure 27.

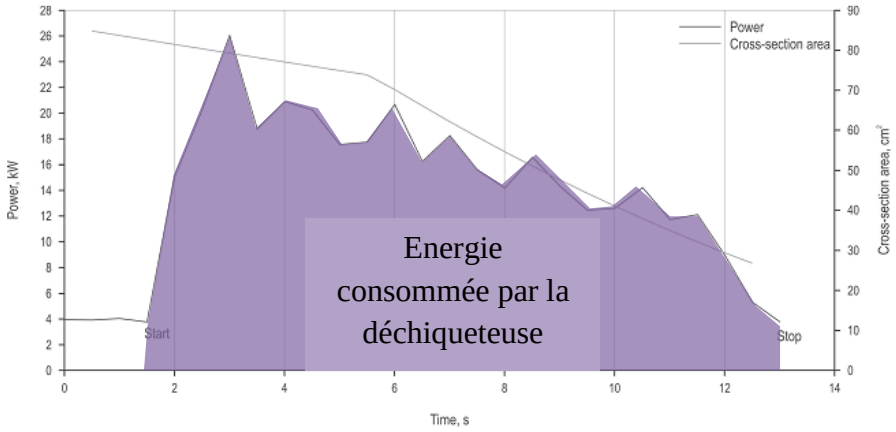


Figure 27 : Evolution de la puissance électrique fournie au moteur [Di Fulvio, 2015]

La mesure en amont du moteur permet facilement d'intégrer le système de mesure. Cependant, cette mesure ne peut se faire que sur les déchiqueteuses munies d'un moteur électrique. De plus, les phénomènes dynamiques observés lors de la coupe sont plus difficiles à percevoir à ce niveau. Ceci s'explique par les phénomènes induits par le moteur électrique et par l'éloignement de la source d'énergie par rapport à la zone de coupe qui lisse la mesure et rend le système moins dynamique.

II.3.2. *La consommation de carburant de la déchiqueteuse*

Trois méthodes évaluent la quantité de carburant consommée par la source de puissance lors du broyage

Assirelli et al. [Assirelli, 2013], Manzone et Spinelli [Manzone, 2013] estiment la consommation en carburant lors d'une opération de broyage en mesurant la quantité de carburant nécessaire à ajouter pour remplir à nouveau le réservoir de la machine. Le complément de carburant est évalué par la quantité de carburant introduite avec un récipient de précision (fiole jaugée de 2 L ou doseur pesé). Cette méthode facile à mettre en œuvre et

peu couteuse évalue la performance énergétique de la machine par une mesure globale de l'essai. Cependant, elle ne permet ni une mesure précise ni une mesure de consommation instantanée.

Stokes et al. [Stokes, 1987] proposent de mesurer la puissance fournie par le moteur à explosion à la déchiqueteuse. Pour cela, il mesure la pression du carburant et la vitesse de rotation du moteur. En complétant ces mesures par les données du constructeur du moteur, il détermine la puissance fournie par le moteur. Cette méthode est proche de la méthode de mesure de puissance du moteur électrique mais elle est appliquée au moteur à explosion. Ce moyen de mesure s'intègre facilement au système mais la précision est inférieure à la méthode de mesure par débitmètre.

En dernier lieu, Spinelli et al. [Spinelli, 2013], Facello et al. [Facello, 2012] utilisent un débitmètre afin de mesurer le volume de carburant consommé par la déchiqueteuse. Le débitmètre envoie une impulsion dès que le moteur consomme 5mL de gasoil, ce qui constitue la précision du capteur. Deux thermocouples sont également utilisés pour améliorer la précision de la mesure de débit. La connaissance de la température permet de définir la masse volumique et la viscosité du carburant. Lorsque la température augmente, le carburant est plus fluide ce qui modifie le débit de carburant. Cette méthode permet de définir instantanément une consommation plus précise pour des temps de broyage plus courts que ceux de la méthode précédente.

Comme on peut le voir sur la figure 26, la mesure de la puissance globale de la déchiqueteuse est plus dynamique que le débit mesuré au niveau de la source d'énergie. L'intérêt de se rapprocher de la coupe pour augmenter la précision de mesure et pour mieux comprendre le comportement de la déchiqueteuse lors de la coupe est ainsi mis en évidence.

II.4. La comparaison des différentes méthodes d'évaluation de la performance énergétique

Trois principales méthodes d'évaluation de la performance énergétique à différents niveaux de l'opération de déchiquetage existent. La première méthode permet de déterminer la performance énergétique au niveau de la coupe de la matière ligneuse. Cette méthode a plutôt pour vocation de comprendre les phénomènes intervenants lors de la formation des plaquettes. La deuxième méthode permet d'évaluer la performance énergétique de la machine dans sa globalité en intégrant les trois fonctions : coupe, amenage et éjection. Enfin la troisième méthode évalue le système dans sa globalité en prenant en compte la source d'alimentation. Le tableau 7 résume les différentes méthodologies d'évaluation des performances énergétiques des déchiqueteuses.

Evaluation		Moyens et outils de mesure	Coût	Exploitation des résultats [Précision]	Mise en œuvre	Sources
Quantité de bois	Masse	Balance et humidimètre	Faible	Bonne sur bois sec uniquement [Bonne]	Facile quel que soit le bois	Pochi 2015 Di Fulvio 2015
	Volume	Mètre, pieds à coulisse	Faible	Bonne sur rondin uniquement [Bonne]	Facile à difficile selon le bois	Assirelli 2013
Quantité de plaquettes	Masse	Balance et récipient	Faible à élevé	Bonne sur bois sec uniquement [Bonne]	Facile	Spinelli 2011, 2012b Facello 2012
	Volume	Mètre et récipient	Faible à élevé	Médiocre [Médiocre]	Facile	
Energie de coupe	Par l'effort de coupe dans le porte couteau	Capteur de force	Elevé	Bonne [Bonne]	Difficile	Hellström 2010
	Par l'effort de coupe dans le contre couteau	Capteur de force	Elevé	Bonne [Bonne]	Difficile	Abdallah, 2011
Energie globale consommée par la déchiqueteuse	Par le produit du couple et de la vitesse de rotation	Couplemètre et codeur	Elevé	Bonne [Bonne]	Difficile	Kovac 2011 Spinelli 2012a Assirelli 2013 Pochi 2015
Energie globale consommée par la source d'énergie	Puissance fournie par la source d'énergie électrique	Wattpilote	Elevé	Bonne [Bonne]	Facile	Abdallah 2010 Di Fulvio 2015
	Consommation de carburant	Débitmètre ou Remplissage réservoir	Faible à modéré	Faible à bonne [Bonne]	Facile	Assirelli, 2013 Manzone, 2013 Spinelli, 2013 [Facello, 2012]

Tableau 7 : Récapitulatif des différents moyens de mesure pour évaluer la performance énergétique

Plus la mesure s'effectue loin de la zone de coupe et plus la mesure du phénomène de formation des plaquettes est amortie. Positionner le système de mesure en sortie de la déchiqueteuse permet cependant de prendre en compte le comportement du broyeur en s'affranchissant du rendement de la source d'énergie. Par contre, les méthodes proposées pour déterminer l'énergie consommée par la déchiqueteuse sont actuellement souvent développées spécifiquement pour chaque déchiqueteuse au cas par cas. Je présente dans le chapitre 3 notre protocole de mesure du critère de performance de l'opération de déchiquetage applicable à tous les types de déchiqueteuse. Le paragraphe suivant est consacré à l'influence des paramètres de broyage sur les performances énergétiques d'après les données présentes dans la littérature

III. L'état de l'art de l'influence des paramètres de déchiquetage sur les performances énergétiques.

Contrairement à ce qui est présenté au chapitre II. où l'état de l'art caractérise les différents moyens de détermination de l'énergie lors de la coupe, cette partie présente les différents recherches menées sur les paramètres de déchiquetage et leur influence sur la performance énergétique de la déchiqueteuse. Cette analyse permet de définir les axes de recherches à mener sur les déchiqueteuses. Dans la plupart des cas, les déchiqueteuses sont configurées dans leur état de fonctionnement normal défini par les constructeurs. De plus, les études sont généralement réalisées in situ, ce qui caractérise la performance énergétique des déchiqueteuses dans leurs conditions réelles de fonctionnement.

Certaines études de Spinelli et al. [Spinelli, 2012a, 2012b, 2013, 2015] ont défini la performance énergétique en exprimant à la fois l'énergie consommée par la déchiqueteuse en kilowattheure par litre de carburant consommé. En effectuant le rapport entre ces deux expressions de l'énergie sur 25 valeurs provenant de différentes publications, on obtient une valeur moyenne de 2,57 kWh/L avec un écart type de de 0,35. Il semble que les énergies présentées par Spinelli et al. ne tiennent pas compte de la consommation à vide de la source d'énergie. Les résultats présentés dans cette partie sont convertis en utilisant ce coefficient de conversion afin d'exprimer l'ensemble des résultats de la littérature sur la performance énergétique en tonnes plaquettes sèches par kilowattheure.

III.1. L'influence du type de bois déchiqueté

Le type de bois déchiqueté a une forte influence sur la performance énergétique. Manzone [Manzone, 2015] constate que la déchiqueteuse est 40 % plus performante lors du déchiquetage d'arbres entiers que de branches en peuplier dans des conditions identiques. Spinelli et al. [Spinelli, 2011 et 2013] constatent que la performance énergétique est meilleure lors du déchiquetage de rondin par rapport aux branches et que l'écart entre les deux est de 7 à 29 % selon l'essence. Assirelli et al. [Assirelli, 2013] et Magagnotti et al. [Magagnotti, 2016] évaluent la performance énergétique sur des troncs, des connexes de scierie et des têtes d'arbre. Ils constatent également que la performance énergétique est meilleure pour des troncs que des têtes d'arbre ou des connexes de scierie. Les écarts sont de l'ordre de 15% et varient selon l'essence. Nati et al. [Nati, 2014] comparent les performances énergétiques entre des

bois d'éclaircie et des résidus forestiers. Les résultats montrent une augmentation de 30% de la performance énergétique lors du déchiquetage du bois d'éclaircie par rapport aux résidus forestiers. Toutes ces études, dont les résultats sont regroupés dans le tableau 8, indiquent que la quantité de matière déchiquetée instantanément est proportionnelle au rendement de l'opération de déchiquetage.

Type de bois	têtes d'arbre	Arbres entiers	Résidus forestiers	Connexes de scierie	Rondins et troncs	Branches
Performance énergétique moyenne (t_{Ps}/kWh)	0,148	0,140	0,128	0,128	0,120	0,101
Ecart type	0,039	0,028	0,071	0,042	0,048	0,024
Nombre de données	6	14	5	2	32	17

Tableau 8 : Influence du type de bois sur la performance énergétique

L'écart maximal de performance énergétique selon le type de bois est de 45%. Si l'on ne tient pas compte du résultat des têtes d'arbre, des résidus forestiers et des connexes de scierie de par le nombre réduit d'essais réalisés, nous constatons que le type de bois déchiqueté permettant d'obtenir une performance énergétique la plus élevée sont les rondins, les troncs et les arbres entiers. Ce type de bois déchiqueté ont des volumes plus importants que les autres ce qui permet à une même vitesse d'avance de broyer une quantité de bois plus importante. La littérature la plus abondante concerne les types de bois les plus déchiquetés dans le domaine de l'énergie.

III.2. L'influence de l'essence de bois

L'essence a peu d'influence sur la performance énergétique (Tableau 9). Une essence dont la masse volumique est plus élevée consomme plus d'énergie lors du déchiquetage mais produit des plaquettes plus lourdes. Comme la performance énergétique est définie par le rapport de la masse de plaquettes sèches produites sur l'énergie consommée, l'essence n'a pas d'influence sur la performance énergétique. La variation de l'essence entraine une variation de la performance énergétique de 10% globalement et de 20% au maximal pour le peuplier. Les écarts types pour chaque essence sont au maximum de 45% pour le châtaignier. Cet écart élevé peut s'expliquer par la disparité des machines utilisées dont les paramètres ne sont pas identiques.

Essence	Peuplier	Robinier	Mélèze	Hêtre	Châtaignier
Masse volumique (kg/m3)	599	632	739	777	817
Performance énergétique de la déchiqueteuse (t_{Ps}/kWh)	0,141	0,113	0,120	0,128	0,112
Ecart type	0,042	0,041	0,016	0,016	0,052
Nombre de données	36	7	4	4	19

Tableau 9 : Influence de l'essence sur la performance énergétique

Les essences de peuplier, châtaignier et robinier ont principalement fait l'objet d'étude. Elles sont très présentes dans le pays où les chercheurs travaillent, et sont utilisées dans le secteur de l'énergie.

III.3. L'influence de l'avance par dent

Di Fulvio et al. [Di Fulvio, 2015] étudient l'influence de l'avance par dent sur la performance énergétique d'une déchiqueteuse à disque montée sur un moteur électrique. L'avance par dent choisie est de 8 ou de 12 mm. L'augmentation de l'avance par dent entraine une augmentation de la performance énergétique. En effet, pour une avance par dent de 8 mm/dent, les performances énergétiques sont de 0,196, 0,160 et 0,167 t_{Ps}/kWh respectivement pour le bouleau, le pin et le sapin. Pour une avance de 12 mm/dent, la performance énergétique atteint 0,238, 0,192 et 0,196 t_{Ps}/kWh respectivement pour le bouleau, le pin et le sapin. Augmenter l'avance par dent de 8 à 12 mm permet d'améliorer la performance énergétique de 20%.

III.4. L'influence du type de déchiqueteuse utilisée : à disque ou à rotor

Spinelli et al. [Spinelli, 2013] comparent la performance énergétique d'une déchiqueteuse à disque et à rotor de taille quasi-identique dont la source d'énergie provient de la prise de force d'un tracteur de 100 kW. Lors du déchiquetage du peuplier, la performance énergétique pour la déchiqueteuse à disque est de 0,134 t_{Ps}/kWh et 0,112 t_{Ps}/kWh pour la déchiqueteuse à rotor. Pour le châtaignier, Spinelli et al. obtiennent des valeurs de 0,067 t_{Ps}/kWh pour la déchiqueteuse à disque et 0,056 t_{Ps}/kWh pour la déchiqueteuse à rotor. La performance énergétique de la déchiqueteuse à disque est 20% supérieure à celle du rotor quelle que soit l'essence ou le type de bois.

III.5. L'influence de l'usure des couteaux

L'usure des couteaux a fait l'objet de plusieurs études afin de déterminer le moment optimal de changement des couteaux ou d'évaluer l'influence de l'usure des couteaux sur la performance énergétique. Nati et Spinelli [Nati, 2010] mesurent l'évolution de la performance énergétique en fonction de l'usure des couteaux sur une déchiqueteuse. Ces essais cherchent à définir la quantité de bois qui peut être déchiquetée sans changer les couteaux. Nati et Spinelli constatent que l'usure maximale est atteinte après 215 tonnes de plaquettes produites, correspondant à une diminution de 49 % de la performance énergétique. Au cours de cet essai, Nati et Spinelli constatent que l'essence du bois et la grille de calibrage ont une influence très significative sur l'usure des couteaux qui évolue linéairement avec la performance énergétique. Ces constats sont plus nuancés dans l'étude de Manzone et Spinelli [Manzone, 2013] qui évaluent l'influence de l'usure des couteaux sur la performance énergétique d'une déchiqueteuse à rotor après 100 tonnes de bois déchiqueté. Ces résultats montrent qu'utiliser les couteaux neufs permet d'améliorer la performance énergétique de la déchiqueteuse de 11% par rapport aux couteaux usés. On peut supposer qu'un couteau ne peut pas être considéré comme usé après 100 tonnes de plaquettes produites.

Ce constat est également fait par Facello et al. [Facello, 2012] qui déterminent l'influence de l'usure sur la performance énergétique. Facello et al. utilisent des couteaux déjà usés dont le changement était nécessaire. Lors du déchiquetage de châtaignier, Facello et al. obtiennent un écart de performance énergétique entre les couteaux neufs et usés de 0,039 t_{Ps}/kWh et de 0,078 t_{Ps}/kWh pour le robinier. La performance énergétique est meilleure avec les couteaux neufs que les couteaux usés avec une valeur de 0,129 t_{Ps}/kWh pour les couteaux neufs et de

0,065 t_{Ps}/kWh pour les couteaux usés. L'écart de performance énergétique obtenu dans ce cas est de 50% environ. Cet écart est semblable aux résultats obtenus par Nati et Spinelli.

D'autres essais de Spinelli et al. [Spinelli, 2015], Nati et al. [Nati, 2014] évalue l'influence de l'usure des couteaux sur la performance énergétique. Contrairement aux essais décrits ci-dessus, l'usure des couteaux est réalisée en désaffutant les couteaux artificiellement à l'aide d'une meule. Les essais sont réalisés sur une déchiqueteuse avec des couteaux neufs et des couteaux désaffutés. Les essais de Nati et al. et Spinelli et al. montrent que la performance énergétique est influencée par l'usure des couteaux et que cette usure entraine une perte de performance énergétique de 30 à 45%.

III.6. L'influence des options présentes sur les déchiqueteuses à rotor

Spinelli et al. [Spinelli 2012] démontrent que la performance énergétique est meilleure lorsque la déchiqueteuse est équipée de couteaux que de marteaux. Lorsque la déchiqueteuse est équipée de couteaux, la performance énergétique moyenne lors du déchiquetage est de 0,074 t_{Ps}/kWh. Lorsqu'elle est équipée de marteaux, la performance énergétique de broyage est de 0,050 t_{Ps}/kWh. La déchiqueteuse équipée de couteau permet d'améliorer la performance énergétique de la déchiqueteuse de 15 à 30% selon le type de bois.

Spinelli et al. [Spinelli 2015] évaluent la performance énergétique d'une déchiqueteuse avec un rotor ouvert et l'autre avec un rotor fermé. Les essais montrent que le type de rotor a une influence sur la performance énergétique. La performance énergétique pour un rotor fermé est de 0,081 t_{Ps}/kWh alors qu'elle est de de 0,060 t_{Ps}/kWh pour le rotor ouvert. Cet écart de performance énergétique entre les deux types de rotor est de 35%.

Eliasson et al. et Nati et Spinelli évaluent l'influence de la taille des mailles des grilles de calibrage sur différentes déchiqueteuses du marché. Eliasson et al. travaillent sur des grilles à maille carré de 100, 50, 35 et 25 mm tandis que Nati et Spinelli travaillent sur des grilles à maille rectangulaire de 60 x 240 mm et 60 x 40 mm. Eliasson et al. obtiennent des valeurs comprises entre 0,121 et 0,185 t_{Ps}/kWh pour la première déchiqueteuse et comprises entre 0,056 et 0,129 t_{Ps}/kWh pour la deuxième déchiqueteuse. Le fait de passer d'une petite maille de 25 mm ou 35 mm à la grosse maille de 100 mm permet d'améliorer la performance de 50 à 130% selon la déchiqueteuse. Nati et Spinelli constatent la même chose avec une performance énergétique de 0,130 t_{Ps}/kWh pour la grille de 60 x 40 mm et de 0,146 t_{Ps}/kWh pour la grille de 60 x 240 mm. L'augmentation de la taille de maille a permis d'améliorer la performance énergétique de 12%. Ces variations de résultats peuvent s'expliquer par le type de bois déchiqueté utilisé par Nati et Spinelli différents de Eliasson et al.

Spinelli et al. [Spinelli, 2016] évaluent la performance d'une déchiqueteuse en modifiant la vitesse d'éjection. Pour cela, Spinelli et al. utilisent une déchiqueteuse à rotor où le système d'éjection est entrainé par un moteur hydraulique indépendant de la partie coupe. Les vitesses de rotation de la partie éjection sont de 519 et 1038 tr/min. Des connexes de scierie de peuplier et des troncs de châtaignier alimentent une déchiqueteuse à rotor d'un automoteur de marque Pezzolato. La performance énergétique pour une vitesse de rotation de 519 tr/min est de 0,202 t_{Ps}/kWh pour le châtaignier et 0,156 t_{Ps}/kWh pour le peuplier. A 1038 tr/min, la

performance énergétique est de 0,179 t_{Ps}/kWh pour le châtaignier et 0,143 t_{Ps}/kWh pour le peuplier. Diviser la vitesse d'éjection par deux entraine une hausse de la performance énergétique de 9 à 12% selon la source du bois.

III.7. Les axes de recherche pour la performance énergétique.

Comme je l'ai présenté au cours de la partie I.3., la performance énergétique est définie par le rapport entre la masse de bois anhydre déchiquetée et l'énergie consommée par la déchiqueteuse. Suivant ce critère, deux axes de recherche sont à suivre. Le premier consiste à réduire l'énergie qui est consommée par la déchiqueteuse lors du déchiquetage. Cela peut se faire par la réduction de la puissance nécessaire ou par la réduction du temps de déchiquetage. Le deuxième consiste à augmenter la quantité de bois déchiquetée.

Après avoir réalisé l'état de l'art sur les déchiqueteuses du point de vue de la performance énergétique, le tableau 10 montre les différents points étudiés actuellement et les résultats globaux.

Paramètres			Impact sur la performance énergétique
Bois	Type de bois	Branche, rondin, arbre entier, connexes de scierie	Très significatif
	Essence	Résineux et feuillus	Faible
	Humidité	20 – 120 %	Faible
	Diamètre	7 – 20 cm	Significatif
Machine	Système de coupe	Disque ou rotor	Faible
	Système de coupe d'un rotor	Creux ou fermé	Pas significatif
	Ajustement partie éjection	Vitesse d'éjection	Faible
	Grille de calibrage	Maille des grilles	Significatif
	Usure des couteaux	Couteaux neufs ou usés	Très significatif

Tableau 10 : Influence des paramètres étudiés sur la performance énergétique

Actuellement, l'usure des couteaux et le type de bois déchiqueté sont les deux paramètres les plus significatifs sur l'évolution de la performance énergétique des déchiqueteuses. Nous constatons que les études menées sur les performances énergétiques caractérisent les déchiqueteuses existantes dans les configurations normales d'utilisation. Ainsi, les études cherchent à déterminer le jeu de paramètres de chaque machine qui permet d'être la plus performante énergétiquement selon la puissance de la source d'énergie. Il est généralement constaté qu'augmenter la productivité des déchiqueteuses permet de les rendre plus performantes mais nécessite une puissance de la source d'énergie plus élevée.

Suivant ces propos, il faut donc retravailler sur les différentes parties de la déchiqueteuse pour définir les caractéristiques que doit avoir la machine pour déchiqueter le bois en consommant le moins d'énergie possible. Pour cela, ma recherche s'oriente vers la compréhension de

l'influence de chaque paramètre machine ou bois sur la performance énergétique. Après avoir effectué ces essais, je déterminerai les axes de recherche pour développer la déchiqueteuse la plus performante possible.

IV. Conclusions :

Au travers des différentes études présentes dans la littérature, la détermination de la performance énergétique n'est pas chose facile et l'influence des différents paramètres sur la performance énergétique n'est pas complètement déterminée. Le type de bois déchiqueté a une forte influence sur la performance énergétique. Nous avons fait le choix de n'étudier qu'un type de bois et de définir notre critère de performance énergétique par le rapport entre la masse de bois déchiqueté et la quantité d'énergie consommée par la déchiqueteuse. Ce critère est choisi afin d'évaluer toutes les déchiqueteuses du marché facilement et pour toutes les sources d'énergie. Pour l'évaluation de cette performance, il existe trois méthodes pour mesurer l'énergie : au niveau de la coupe, à la sortie de la déchiqueteuse et à la source d'énergie. Les résultats et la mesure diffèrent selon la méthode choisie. Plus on s'éloigne de la zone de coupe, plus le phénomène sera lissé mais le système sera moins dynamique et donc plus facile à mesurer. Pour finir, nous avons vu que beaucoup de paramètres sont étudiés par les différents chercheurs mais ces études sont orientées vers l'évaluation d'une machine du commerce ou vers une partie des paramètres de coupe de la déchiqueteuse sans définir le réglage approprié des paramètres de coupe pour optimiser la performance énergétique de celle-ci. Nous allons voir dans la suite quels sont les matériels et méthodes utilisés pour évaluer la performance énergétique de notre déchiqueteuse et les paramètres de coupe que j'étudie pour proposer une optimisation du broyage forestier effectué par une déchiqueteuse à disque.

Chapitre 3 :

Matériels et méthodes

Le critère de performance énergétique de l'opération de déchiquetage a été défini dans le chapitre 2 comme le rapport entre la masse de plaquettes anhydres produites et la quantité d'énergie consommée par la déchiqueteuse. Le but de ce chapitre est tout d'abord de présenter le banc d'essai de déchiquetage que nous avons développé et instrumenté. Le traitement des signaux des différents moyens de mesure pour l'évaluation de la performance énergétique des déchiqueteuses est ensuite décrit. Le travail de recherche est mené sur les déchiqueteuses à disque de petite capacité. La capacité de la déchiqueteuse ne modifie pas sa performance énergétique mais une faible capacité entraine un coût de fabrication des plaquettes plus élevé suite au coût initial de la machine plus difficile à amortir. Au niveau de la coupe, la déchiqueteuse à disque conserve son mode de coupe 90-90°. Le bois utilisé doit correspondre à la taille de la déchiqueteuse. Enfin, aux vues des nombreux cas d'études rencontrés dans la littérature, nous avons décidé de limiter notre étude autour d'un produit broyé homogène et de se concentrer sur l'influence de divers paramètres de coupe sur la performance énergétique.

Les orientations de notre étude sont schématisées sur la figure 28 :

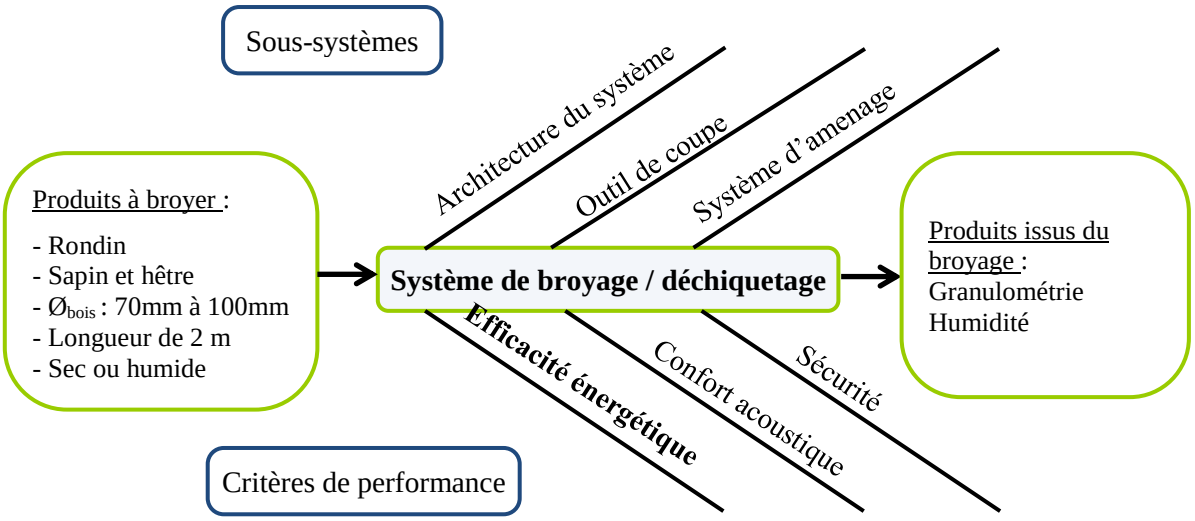


Figure 28 : Schéma global d'étude du système de broyage, déchiquetage

I. Le type de bois utilisé et produits issus du déchiquetage :

I.1. Le type de bois utilisé.

Comme exposé en introduction, nous choisissons de broyer des lots de bois les plus homogènes possibles, représentatifs des essences locales couramment déchiquetées. Des rondins d'une longueur de deux mètres de deux essences, diamètres et humidités différentes sont déchiquetés au cours de nos essais.

Les deux essences sont un feuillu, le hêtre (*Fagus Sylvatica*), et un résineux, l'épicéa (*Picea Abies*) (Cf. figure 29). Les rondins ont un diamètre compris entre 70 et 100 mm et sont fraichement abattus ou séchés. Les taux d'humidités pour le bois fraîchement abattu sont comprises entre 45% et 56% par rapport à 15 et 20% pour le bois séché. Ces deux essences sont fortement présentes dans la région Grand Est et sont couramment utilisées dans les

secteurs de l'industrie du papier, de la fabrication des panneaux de particules et de la production de combustibles. Ces deux bois ont des structures et masse volumique bien différentes. L'exploitation de ces essences est effectuée à l'aide d'abatteuses qui fournissent généralement des rondins de deux mètres de long plus faciles à sécher, à stocker, réduisant ainsi les coûts de transport et d'exploitation.

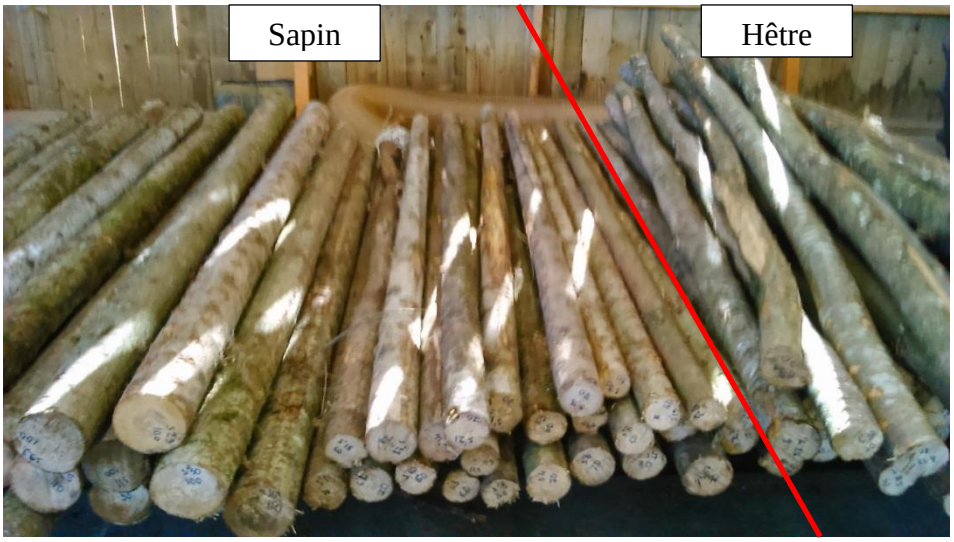


Figure 29 : Rondins utilisés pour les essais de déchiquetage : à gauche du trait : Le sapin, à droite du trait : Le hêtre

L'humidité, le diamètre moyen, la longueur et la masse du rondin sont mesurés pour caractériser tous les rondins déchiquetés. L'humidité des rondins est déterminée par un humidimètre à pointe Hydromette BL HT 70 de marque GANN. Une mesure de cette humidité est réalisée tous les 30 cm à une profondeur égale à la moitié du diamètre du rondin. Ainsi, l'homogénéité de l'humidité est vérifiée dans la longueur au cœur du bois.

Le rondin est pesé en utilisant une balance d'une capacité de 150 kg avec une précision de 20g. La longueur du rondin est mesurée à l'aide d'un mètre ruban de 5m de classe UE 2 avec une précision de 5 mm. Le diamètre moyen du rondin est déterminé en mesurant le diamètre du rondin tous les 30 cm à l'aide d'un pied à coulisse. La masse volumique du rondin est calculée selon l'humidité du bois et est définie par la formule :

$$m_v = \frac{masse\ du\ rondin\ à\ humidité\ H\%}{\pi \times \left(\frac{\emptyset_{rondin}}{2000}\right)^2 \times longueur\ rondin}$$ en kg/m^3.

I.2. Les produits issus du déchiquetage

Nous avons choisi dans notre étude de produire des plaquettes destinées à des chaudières automatiques de petite taille. La granulométrie des plaquettes est mesurée afin de contrôler la conformité dimensionnelle du produit issu du broyage. L'humidité est contrôlée afin de la comparer aux mesures réalisées par l'humidimètre à pointes au niveau des rondins

Pour chaque essai, le rondin déchiqueté est récupéré en totalité dans une caisse de 80L (figure 30). A la fin de l'essai, les plaquettes dans la caisse sont mélangées. Deux échantillons de 2L

et deux échantillons de 1L sont récupérés dans des barquettes en aluminium pour la mesure de la granulométrie et de l'humidité.

Figure 30 : Plaquettes récupérées lors du déchiquetage de 8 rondins

I.2.1. *L'humidité des plaquettes*

L'humidité des plaquettes est déterminée selon la norme NF EN ISO 18134-3

Deux barquettes vides de contenance 1 L en aluminium sont pesées sur une balance (2kg, précision au gramme) et leur masse notée m_{vide}. Les deux échantillons dans la caisse sont prélevés à l'aide des deux barquettes juste après la fin de l'essai. La masse des deux barquettes pleines est notée m_{humide}. Les deux barquettes sont déposées dans l'étuve ventilée à 105°C (maxi 120°C) pendant minimum 6h sans dépasser 24h. Après séchage, la masse des barquettes pleines est notées m_{sec}. L'humidité est calculée pour chaque barquette par la formule :

$$H\% = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{humide} - m_{vide}} x\ 100$$

I.2.2. *La granulométrie des plaquettes*

Pour être conforme à la catégorie de plaquettes P16, les tamis utilisés doivent comporter des mailles carrées respectivement de 45 mm, 16mm, 3,15 mm et 1 mm de côté ainsi qu'un fond qui récupère les fines. Chaque tamis vide est pesé et son poids est noté m_{ivide} où i correspond à la taille des mailles du tamis sur une balance de précision. Les différents tamis sont empilés sur le tamiseur par mailles croissantes. Lorsque les plaquettes sont sèches, la masse de l'échantillon dont on souhaite connaitre la granulométrie, $m_{échantillon,}$ est déterminée. Ensuite, les plaquettes sont disposées dans la colonne et les barquettes vides sont pesées ensemble notées m_{vide}. Le tamisage est lancé pendant 7 min sur la tamiseuse AS 200 de marque Retsch (figure 31). Lorsque le tamisage est terminé, chaque tamis avec les plaquettes est pesé et noté m_i où i correspond à la taille des mailles du tamis.

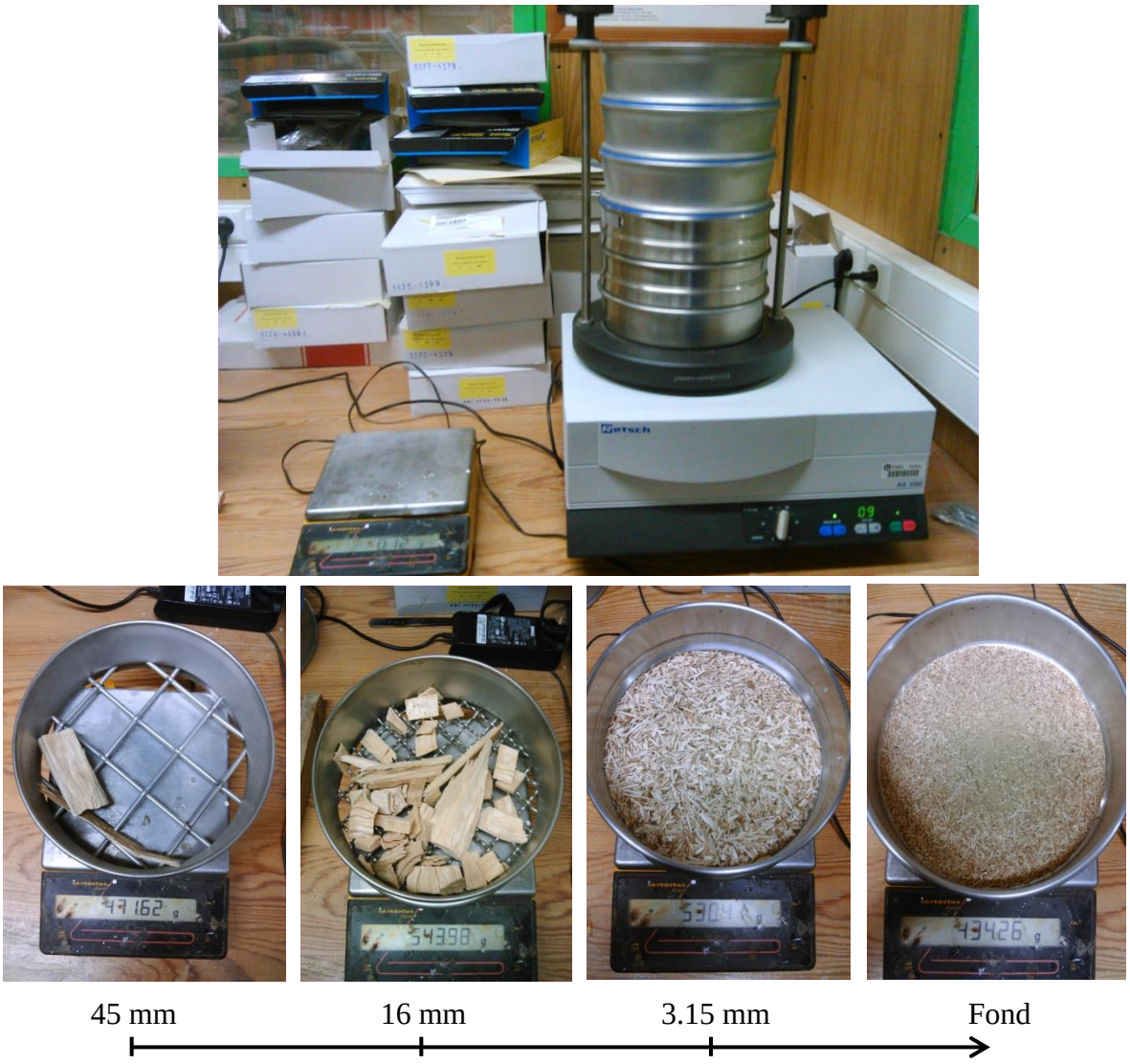


Figure 31 : Système d'analyse de la granulométrie : tamis oscillant et les différents tamis utilisés.

La détermination de la granulométrie est donnée par la formule :

$$\%\ plaquettes\ sur\ le\ tamis\ i = \frac{m_i - m_{ivide}}{\sum m_i - \sum m_{ivide}} \times 100$$

avec m_i la masse du tamis où i représente la taille de la maille.

Comme nous définissons la granulométrie pour chaque rondin et non le déchiquetage d'un ensemble de rondins, j'ai adapté la méthodologie de détermination de la granulométrie à un rondin sans analyser la totalité du rondin.

Pour cela, six rondins de hêtre ont été déchiquetés (tableau 11). Les configurations du bois et de la machine sont décrites dans le tableau 11. Après chaque déchiquetage, l'analyse granulométrique est réalisée sur l'ensemble du rondin.

n° essai	$Ø_{bois}$ (mm)	L_{Bois} (mm)	V_{Bois} (dm^3)	m_{Bois} (kg)	m_v (kg/m3)	H% (%)	V_c (m/s)	f_z (mm)
1	67	2245	7,9	6,58	785	28	33,5	17.7
2	132	2050	28,1	17,86	550	40	33,5	17.7
3	124	2050	24,8	19,00	620	50	33,5	3.5
4	106	1980	17,5	12,68	615	41	33,5	5.9
5	80	2040	10,3	7,90	675	38	33,5	5.9
6	122	1980	23,1	16,96	625	41	33,5	5.9

Tableau 11 : Paramètres de coupe pour la détermination de granulométrie des rondins

Les volumes de plaquettes varient de 15 à 80 L selon le diamètre et la longueur du rondin. Le tamis oscillant ne pouvant cribler que 2 L de plaquettes à la fois, une répétition de prélèvements de 2 L de plaquettes est réalisée de 10 à 28 selon la quantité de plaquettes issues du déchiquetage du rondin (figure 32). Les résultats de chaque essai sont illustrés sur la figure 32.

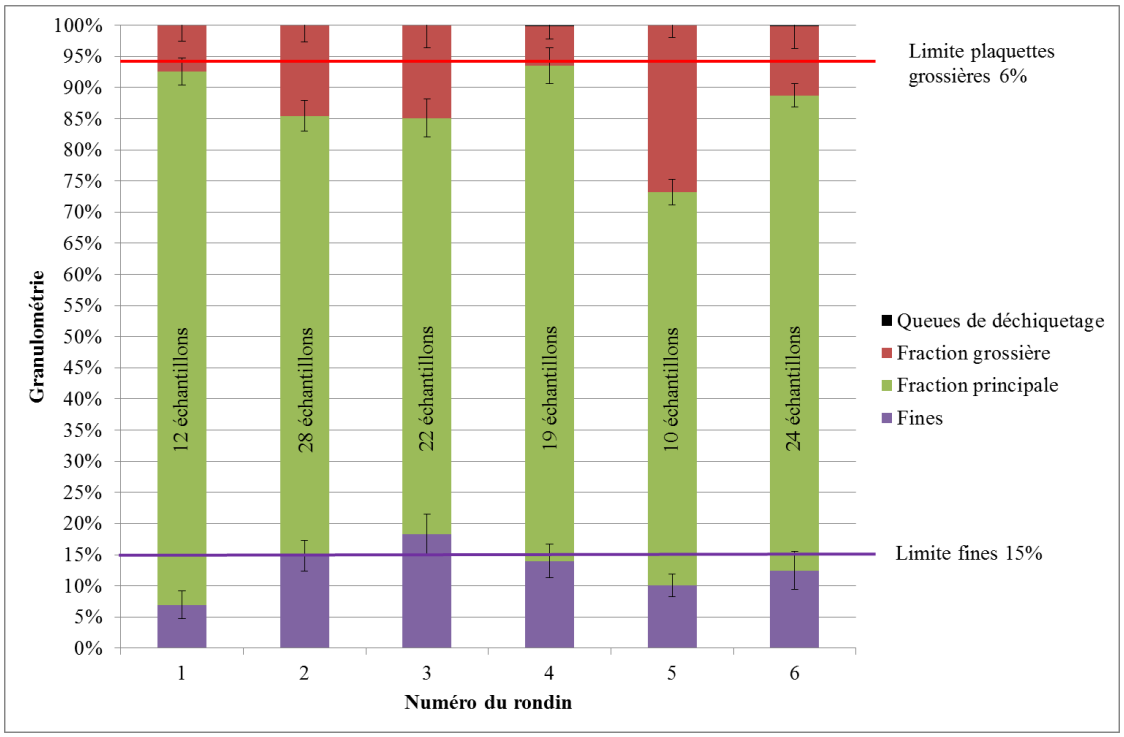


Figure 32 : Analyse granulométrique de la totalité de six rondins déchiquetés

Ces essais montrent pour chaque rondin déchiqueté que l'écart type mesuré entre les granulométries des différents prélèvements de chaque configuration est faible. Ceci montre que l'analyse granulométrie d'un rondin de bois déchiqueté peut se réduire à un prélèvement en minimisant l'erreur obtenue. Suivant la configuration de la déchiqueteuse et des caractéristiques du rondin, nous constatons également que la granulométrie varie. La granulométrie fait l'objet d'une étude en même temps que l'évaluation de la performance énergétique. Suivant ces résultats, nous évaluons la granulométrie en prélevant deux échantillons de plaquettes pour chaque rondin déchiqueté.

I.2.3. *La masse de plaquettes sèches*

La masse de plaquettes sèche est déterminée par la masse de plaquettes récupérées dans les caisses de 80 L pour chaque essai. Les caisses sont pesées à vide et notées $m_{caissevide}$. Après déchiquetage, la caisse est pesée avec l'échantillon notée $m_{caisseéchantillon}$. La formule utilisée pour définir la masse de bois sec est :

$$m_{Ps} = (m_{caisse\ échantillon} - m_{caisse\ vide}) \times (1 - \frac{H\%}{100})$$

avec H% :humidité du bois

Une balance de 150 kg avec une précision de 20 g est utilisée pour réaliser ces opérations.

II. Le banc d'essai de déchiquetage :

Le banc d'essai de déchiquetage développé afin de définir la performance énergétique de coupe et l'efficacité énergétique de la déchiqueteuse est illustré sur la figure 33.

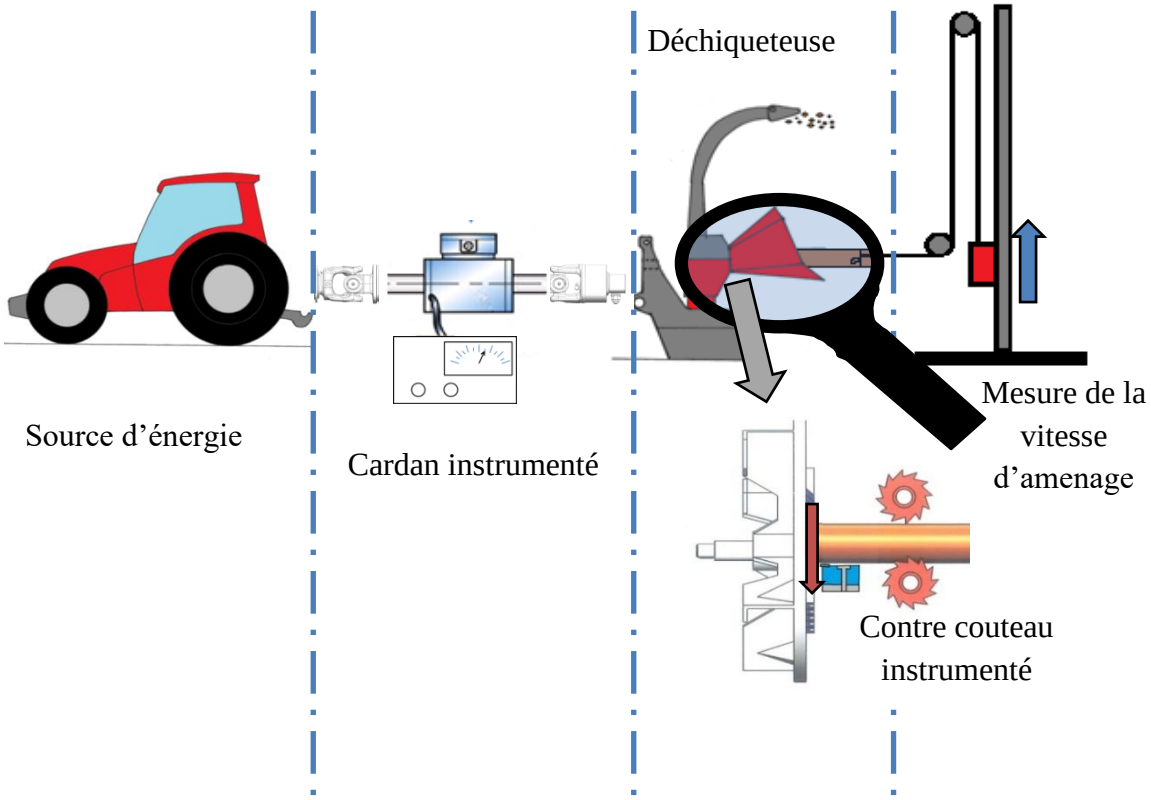


Figure 33 : Notre système complet de mesure de performance énergétique de coupe et de la déchiqueteuse

Chaque élément qui constitue ce banc d'essai est successivement présenté en partant de l'introduction du rondin jusqu'à la source d'énergie.

II.1. La mesure de la vitesse d'avance du rondin par capteur magnétostrictif.

La mesure de l'avance du rondin permet de contrôler la bonne correspondance entre l'avance réelle et la consigne. De plus, les périodes de déclenchement du système de sécurité anti stress est identifiable sur les courbes de déplacement du rondin, puisque pour rappel, ce système arrête l'avance du rondin si la vitesse de rotation du disque diminue de 10% par rapport à la vitesse de rotation nominale du disque. Il est également possible d'évaluer précisément la quantité de bois déchiqueté par la longueur, le volume et la masse de bois déchiqueté à partir de l'avance du rondin. Cette mesure n'a pas encore été réalisée au niveau des déchiqueteuses alors qu'elle a une forte influence sur la performance énergétique.

Nous équipons le banc d'essai d'un capteur magnétostrictif permettant de contrôler l'avance du rondin au cours de l'essai (figure 34). Il permet de mesurer le déplacement d'un objet en utilisant une onde magnétique. Le corps du capteur émet une onde au travers d'un tube d'une longueur pouvant aller jusqu'à 7m. Une partie mobile, équipée d'un aimant, est fixée au rondin par un fil de pêche tressé et glisse le long du tube. Lorsque l'onde émise au travers du tube arrive au niveau de l'aimant, l'onde est réfléchie pour revenir au corps du capteur. La grandeur mesurée est le temps de trajet de l'onde entre son émission et sa réception après réflexion sur la partie mobile du corps du capteur. Une option sur ce dispositif calcule la vitesse d'avance. Connaissant la distance à chaque instant de la partie mobile, le déplacement du rondin est défini par la distance parcourue par la partie mobile à tout instant.

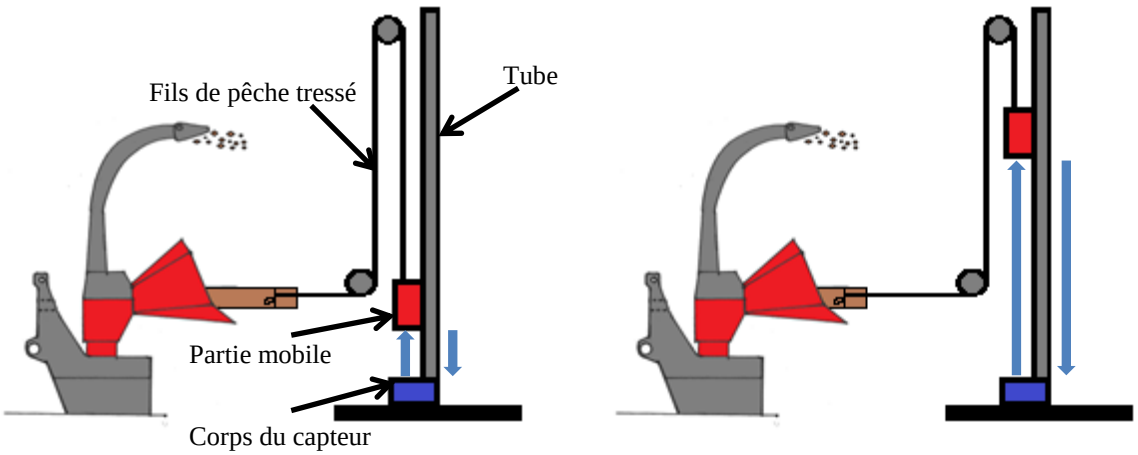


Figure 34 : Dispositif de mesure de l'avance et la vitesse du rondin

II.2. Le contre couteau instrumenté.

Un extensomètre (type Kistler 9232A) est fixé sur une plaque en acier qui maintient le contre couteau (figure 35). Lorsque le rondin est en contact avec le contre couteau lors de la coupe, la plaque se déforme sous la charge générée par la coupe. Cette déformation proportionnelle à l'effort de coupe est mesurée par l'extensomètre.

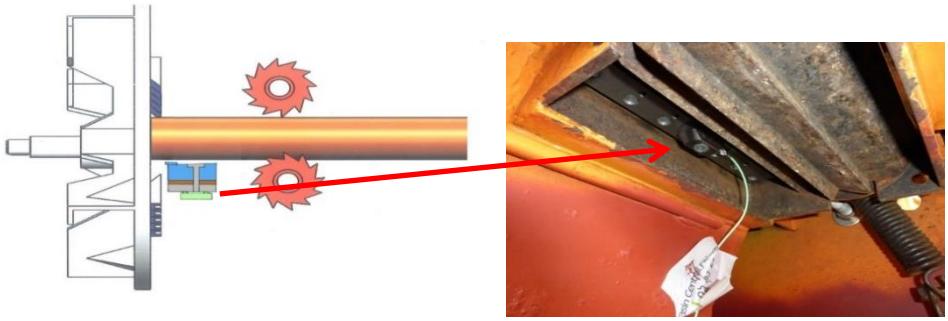


Figure 35 : Dispositif de mesure de l'effort de coupe par la mesure de la déformation du contre couteau

Ce capteur permet de mesurer des déformations comprises entre -600 et 600 µdéf. Un amplificateur de charge multicanaux (type Kistler 5070A) permet d'amplifier, et de convertir le signal de déformation mesuré en un signal analogique +/-10V. Ce capteur permet de mesurer les déformations dynamiques du contre couteau et d'en déduire les efforts de coupe entrainant ces déformations.

II.3. Les déchiqueteuses

Nous avons eu à disposition le modèle B160 et le modèle B180 qui sont deux déchiqueteuses à disque vendues par la société Noremat. Les caractéristiques des machines sont regroupées dans le tableau 11 :

Déchiqueteuse	B160	B180
Diamètre du disque	680 mm	800 mm
Couteaux	2 rangées de 5 couteaux	2 rangées de 7 couteaux
Type de couteaux	Monobloc avec plaquette carbure brasée	Monobloc avec plaquette carbure brasée
Angles des couteaux	$\alpha = 0°$, $\beta = 50°$, γ 40°	$\alpha = 0°$, $\beta = 50°$, γ 40°
Amenage	2 rouleaux ameneurs	2 rouleaux ameneurs
Entrainement des rouleaux	Moteurs hydrauliques dont la pompe est extérieure à la déchiqueteuse	Moteurs hydrauliques avec pompe montée sur l'axe du disque
Mode de coupe	90-90	90-90
Vitesse d'avance m/min	60	60
Vitesse de coupe à 1000 tr/min sur un couteau	11,5 - 35m/s entre les deux extrémités du couteau	12 - 39,5 m/s entre les deux extrémités du couteau
Ejection	4 pales fixées sur le disque	6 pales fixées sur le disque
Diamètre bois maxi	160 mm	180 mm
Puissance conseillée	26 kW	41 kW
Source de puissance	Par prise de force	Par prise de force
Vitesse de rotation du disque maxi	1500 tr/min	1000 tr/min

Tableau 12 : Caractéristiques des deux déchiqueteuses utilisées dans notre étude

Le système de sécurité anti stress est conservé sur les deux déchiqueteuses pour mesurer les performances des déchiqueteuses à grandes et petites vitesses de coupe.

Sur le modèle B160, la goulotte a été désolidarisée de la partie coupe et une charnière est ajoutée pour permettre de pivoter la goulotte et de modifier l'angle d'introduction du rondin. Ce nouveau réglage permet d'introduire des rondins selon des angles compris entre 90 et 55° par rapport à la partie coupe. Lorsque l'angle d'amenage est fixé à 55°, la largeur de coupe du bois forme une ellipse au lieu d'un cercle (figure n°36) et cette largeur devient supérieure au rayon du cercle formé par le diamètre du bois. Afin de limiter les oscillations du bois lors de son introduction dans la déchiqueteuse, une table d'amenage est développée (figure 36). Cette table d'amenage est constituée d'une poutre en « V » et d'un rouleau supérieur assurant le maintien continu du bois selon une trajectoire rectiligne. Cette table est également réglée pour permettre une introduction du bois horizontalement avec le rouleau ameneur inférieur.

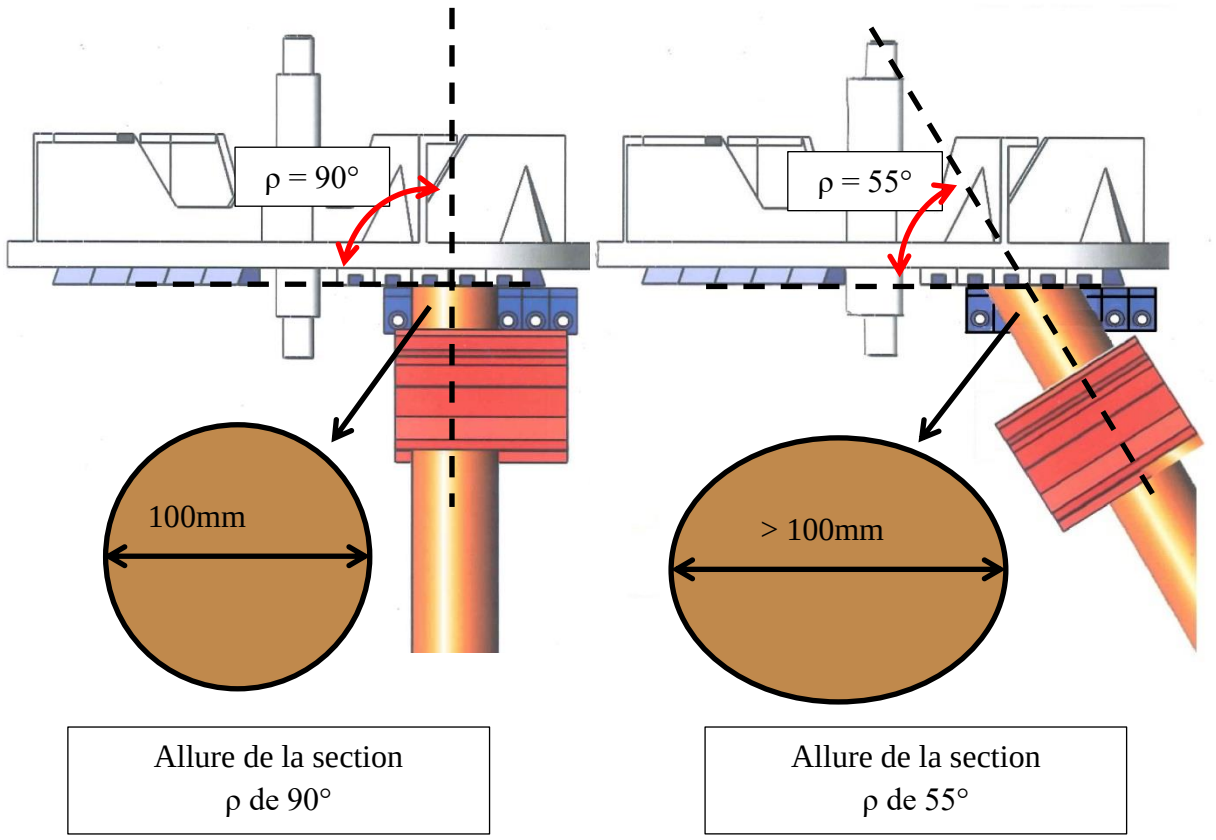


Figure 36 : Modification de l'angle d'amenage des rondins sur la déchiqueteuse B160

La partie éjection est modifiée pour récupérer la totalité des plaquettes produites (figure 37). Un tuyau composé d'une partie souple et rigide de diamètre 200 mm est fixé sur la partie supérieure de la goulotte d'éjection. Un couvercle est adapté pour se fixer sur une caisse de 80 L et pour recevoir le tuyau de diamètre 200 mm. Des évents sur le couvercle sont réalisés pour laisser s'échapper le flux d'air créé par la turbine mais pas les plaquettes.

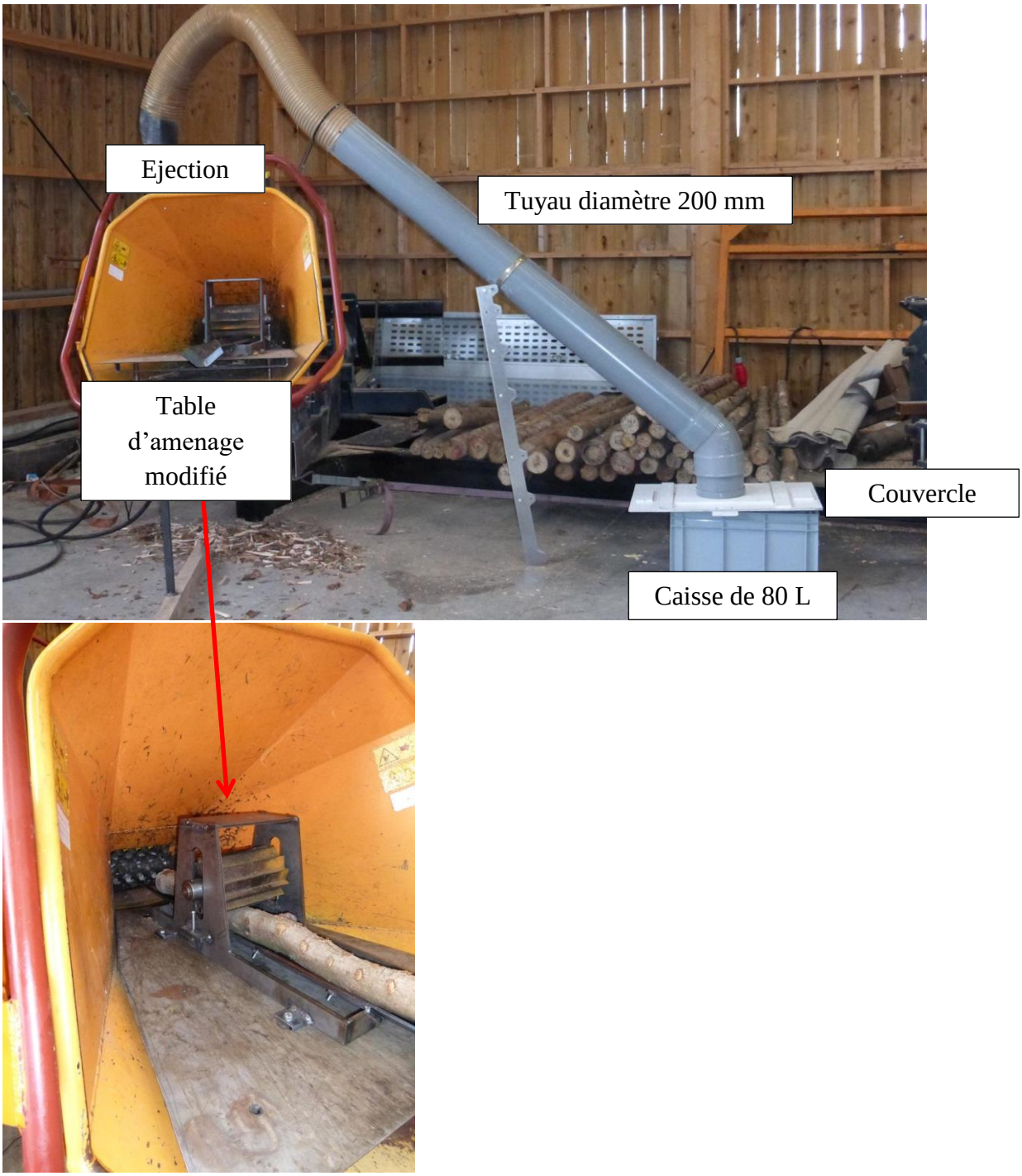


Figure 37 : Modification de l'éjection pour récupérer le bois déchiqueté sur la déchiqueteuse B160

Ce dispositif permet de recueillir toutes les plaquettes pour l'analyse de la granulométrie, pour la détermination de la masse de bois déchiqueté et de l'humidité du bois.

II.4. La mesure de la puissance de la déchiqueteuse par le cardan instrumenté

Le cardan est la pièce mécanique permettant de transmettre l'énergie de la source d'énergie à la déchiqueteuse. Nous instrumentons ce cardan afin qu'il puisse également mesurer l'énergie

globale consommée par la déchiqueteuse. Le cardan instrumenté mesure le couple transmis par le cardan et la vitesse de rotation en sortie de cardan est mesurée par un codeur spécialement développé pour nos besoins.

II.4.1. *La mesure du couple transmis par le cardan :*

La mesure du couple est basée sur le principe de la mesure de la torsion de l'arbre en rotation (figure 38).

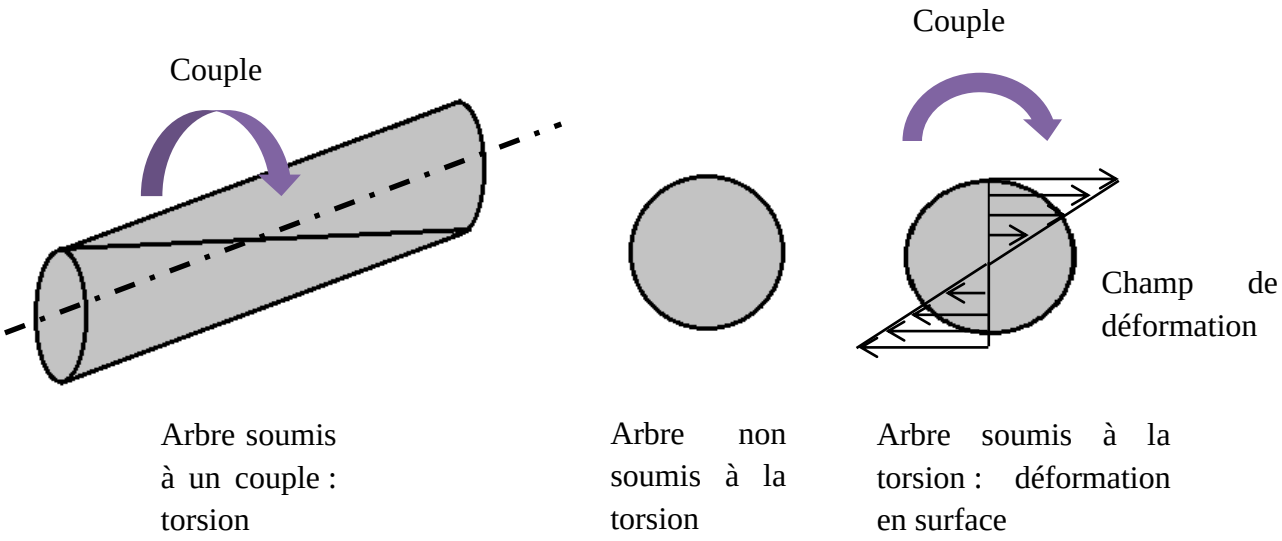


Figure 38 : Principe de torsion d'un arbre

La torsion est une déformation de l'arbre sous le couple dont la direction est celle de l'axe de l'arbre. Cette déformation est proportionnelle au couple qui est transmis par la source d'énergie. La mesure de la déformation de l'arbre permet donc d'évaluer le couple qui est transmis par la source d'énergie à la déchiqueteuse.

Deux jauges de déformation sont collées sur l'arbre d'un cardan du marché de chez Bondioli et Pavesi (figure 39). Un système de télémesure digital de marque KMT Telemetry est utilisé pour enregistrer le signal des jauges de déformation et pour calculer le couple qui est transmis par la source d'énergie. Un conditionneur fixé sur l'arbre permet d'amplifier le signal analogique émis par les jauges et d'effectuer la conversion analogique numérique du signal. La tête inductive positionnée au-dessus de la bobine permet d'alimenter le conditionneur et les jauges collées sur l'arbre tournant et de transférer le signal numérique émis par le conditionneur au décodeur.

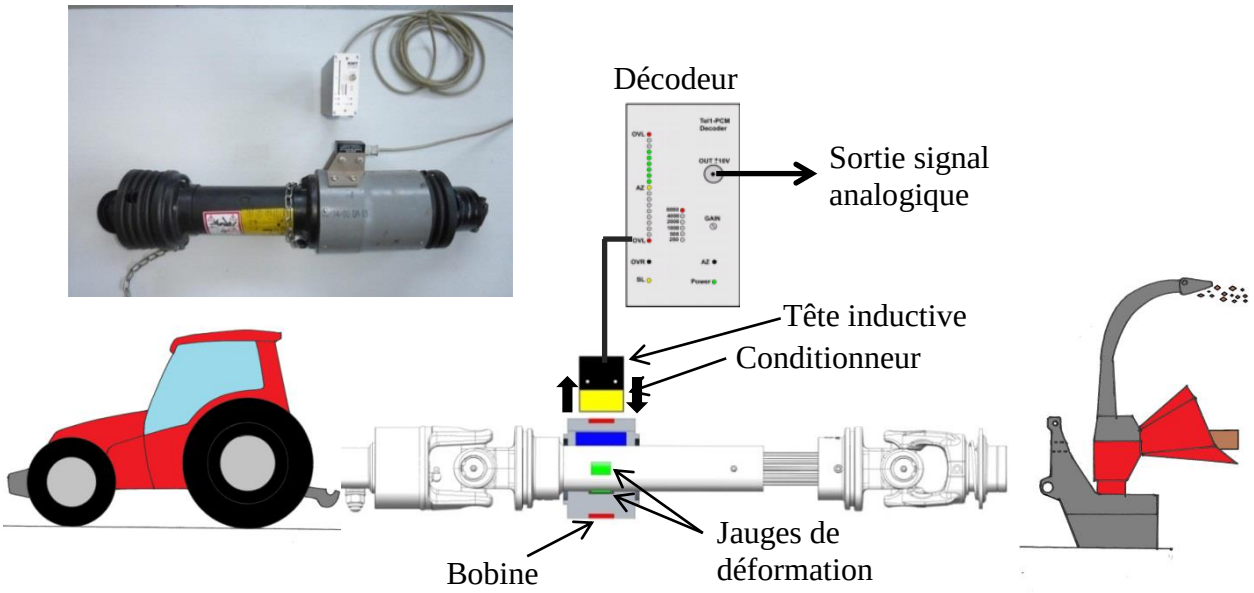


Figure 39 : Fonctionnement du système de mesure du couple à partir de la déformation en torsion du cardan.

En utilisant la tête inductive, aucun contact entre la partie mobile et la partie fixe n'existe, ne générant pas de frottement et donc de couple supplémentaire transmis par l'arbre. Le décodeur convertit le signal numérique en un signal analogique proportionnel au couple mesuré dans l'arbre via la déformation de l'arbre. Le cardan instrumenté permet un désalignement entre la déchiqueteuse et la prise de force du tracteur qui doit être compensé pour les couplemètres présents sur le marché par des accouplements. Le montage de ce capteur est très facile et ne modifie pas la dynamique du phénomène observé car il se comporte comme un cardan traditionnel (figure 39). Le tableau 13 donne les caractéristiques du couplemètre que nous avons développé dont la méthodologie d'étalonnage du cardan est détaillée en annexe n°1.

Sensibilité	113,26 Nm/V
Résolution	1 Nm
Plage de mesure	-1000 à 1000 Nm
Précision statique	< 5 % (< 2% > 500 Nm)
Erreur statique de couple pour un angle de cardan donnée	1 Nm/degré < 15° 15 Nm > 15°
Précision de mesure en dynamique	< 5,5 %
Fréquence d'acquisition	1 kHz
Sortie	Analogique +/-10V, BNC

Tableau 13 : Caractéristiques du cardan instrumenté

En utilisant ce système, le couple est déterminé précisément et s'adapte facilement à n'importe quelle source d'énergie. Il ne reste plus qu'à déterminer la vitesse de rotation du disque pour déterminer la puissance.

II.4.2. *La mesure de la vitesse de rotation et de la position du disque en sortie du cardan :*

La vitesse de rotation et la position du disque sont mesurées directement à la sortie du cardan instrumenté à l'aide d'un codeur adapté à nos besoins. Ce dernier est composé d'un capteur capacitif et d'une roue dentée fixée à l'arbre en rotation (figure 40). Le capteur capacitif mesure la distance entre la tête du capteur et la roue dentée. Une butée micrométrique permet de régler la position du capteur capacitif par rapport à la roue dentée avant le début des essais.

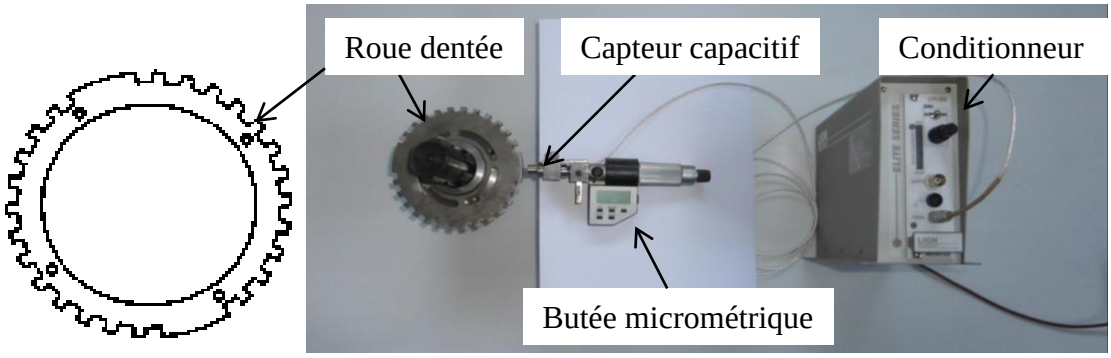


Figure 40 : Dispositif de mesure de la vitesse de rotation du disque

La roue est équipée de 24 dents et 26 creux respectivement de 5 et 7 mm de large. Deux dents de taille plus importante de 25 mm de large viennent compléter la roue et permettent de repérer deux positions angulaires particulières de l'arbre en sortie du cardan. Chacune de ces grandes dents est positionnée en face d'un des deux couteaux de notre déchiqueteuse à disque. Suite à un post-traitement du signal rectangle mesuré au niveau du capteur inductif, la vitesse de rotation de l'arbre ainsi que la position angulaire du disque sont déterminées. La position angulaire du disque est utilisée pour déterminer la performance énergétique au niveau de la coupe. La vitesse de rotation du disque permet quant à elle de contrôler la vitesse de coupe et d'évaluer la performance énergétique globale de la déchiqueteuse.

II.5. Les sources d'énergie

Un moteur thermique, électrique et hydraulique sont trois sources d'énergie utilisées pour notre recherche (tableau 14).

Paramètre	Moteur thermique	Moteur hydraulique	Moteur électrique
Puissance kW	66 kW	48 kW	45 kW
Vitesse de rotation du moteur tr/min	0-2200 tr/min	0- 2800 tr/min	0-1450 tr/min
Sécurité de surpuissance	Non communiqué	Pression maxi de 350 bars. Clapet de surpression.	Limiteur de couple et intensité du moteur
Vitesse de rotation sortie prise de force	540 ou 1000 tr/min	0- 1000 tr/min	0 – 1000 tr/min
Montage du système	Moteur thermique sur tracteur	Moteur hydraulique sur tracteur	Moteur électrique sur banc d'essai
Commentaire	Sortie arbre à 6 cannelures telle que l'on trouve sur les tracteurs		

Tableau 14 : Caractéristiques des différentes sources d'énergie utilisées

Ces moteurs ont une puissance permettant de broyer les rondins retenus pour l'étude. La majorité des essais sont effectués à l'aide du moteur électrique car il provoque moins de nuisances lors d'essais réalisés dans un hangar fermé.

Le fonctionnement et l'utilisation des différents matériels de mesure sont maintenant définis. Quatre dispositifs de mesure sont utilisés pour évaluer la performance énergétique au niveau de la coupe et au niveau de la déchiqueteuse. Je décris maintenant l'utilisation et le traitement des différents signaux pour évaluer ces performances énergétiques.

III. Le traitement des signaux mesurés lors du déchiquetage

Un traitement et une exploitation des signaux sont réalisés pour chacun des capteurs présentés dans la partie II. Le traitement des signaux exige plusieurs étapes qui sont représentées sur la figure 41.

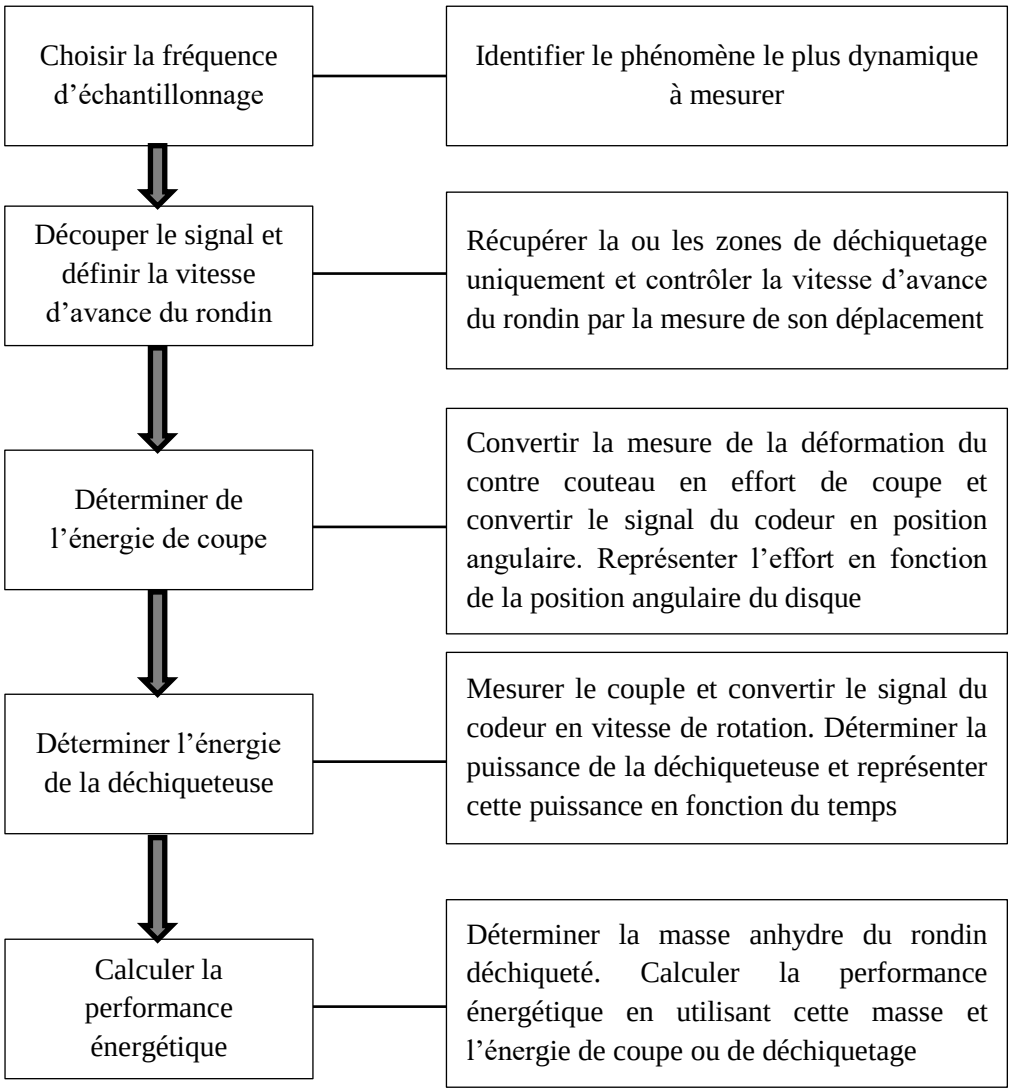


Figure 41 : Etapes du traitement des signaux pour la détermination de la performance énergétique

Ces différentes étapes sont nécessaires pour la détermination de la performance énergétique, de l'énergie de coupe et de la puissance à fournir à la déchiqueteuse. Elles permettent également de contrôler les paramètres de coupe avance par dent et vitesse de coupe.

III.1. Les pré-requis de mesure

Tout d'abord, il convient de choisir la bonne fréquence d'échantillonnage. En premier lieu, le phénomène le plus dynamique que nous souhaitons observer lors de nos mesures est la déformation du contre-couteau provoquée lors de la coupe du rondin. Pour la plus grande vitesse de coupe possible (35 m/s) et pour le plus petit diamètre de rondin broyé dans le cadre de notre étude (50 mm), le temps de coupe de la section du rondin est de 1,4 ms. En second lieu, l'évolution du couple transmis au cardan est décrite comme un phénomène dont la période est égale à la durée pour faire pivoter le disque d'un demi-tour, soit 20 ms à la vitesse de rotation maximale du disque (1500 tr/min). En dernier lieu, la vitesse de rotation du disque est mesurée à l'aide d'un capteur capacitif qui fait face à une roue dentée. La taille d'une grande dent est de 28,3 mm pour une circonférence de la roue de 350 mm, soit 3,23 ms pour décrire une grande dent pour une vitesse de rotation de 1500 tr/min.

Ainsi, choisir une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz dans le cadre de notre recherche permet de disposer de 14, 400 et 28 points pour respectivement décrire le phénomène de coupe, l'évolution du couple transmis au cardan et la position angulaire du disque pour chaque tour de disque.

Pour pouvoir superposer l'ensemble des signaux, les signaux analogiques de valeurs comprises entre + et -10V sont synchronisés. Un châssis multivoie et deux boitiers N9215 de la marque National Instrument permettent d'enregistrer ces signaux analogiques. Nous utilisons Labview® pour acquérir, convertir et enregistrer chaque signal avec sa propre sensibilité. Le temps de mesure est fixé à 26 secondes pour mesurer l'ensemble du déchiquetage du rondin avec les arrêts d'avance du rondin s'ils ont lieu.

Lors de l'acquisition à l'aide du logiciel Labview®, un déclenchement automatique de la mesure est mis en place lorsque le couteau vient toucher le bois et générer un effort de coupe sur le rondin. Cette action déclenche l'enregistrement de tous les capteurs de banc lors de chaque essai. 8000 points qui précèdent le déclenchement de la mesure sont également enregistrés dans le but de calculer la vitesse de rotation du disque et la puissance à vide pour une dizaine de tours. La fin de la mesure correspond à une inversion du déplacement du rondin qui signifie que le fils de pêche attaché au rondin pour mesurer son avance est coupé. Nous arrivons ainsi de manière précise à mesurer chaque grandeur utilisée pour définir la performance énergétique.

III.2. La méthodologie de mesure de l'énergie

Les signaux mesurés lors du déchiquetage proviennent des quatre instruments de mesure : l'extensomètre au niveau de la coupe, le cardan et le codeur au niveau de la déchiqueteuse et le capteur magnétostrictif au niveau du rondin. Chacun de ces signaux permettent à la fois de calculer l'énergie mais aussi d'isoler la coupe du bois du reste. Lors de la mesure de ces

signaux, il est impossible directement de déterminer la performance énergétique de la déchiqueteuse étudiée. L'obtention de l'énergie à la coupe et de la déchiqueteuse nécessite différents traitements des signaux. Comme la mesure de l'énergie se fait à deux endroits distincts (à la coupe et au niveau et entre la source d'énergie et la déchiqueteuse), deux performances énergétiques sont définies la Performance Energétique de Coupe (PEC) et Performance Energétique de la Déchiqueteuse (PED). Comme l'opération de déchiquetage n'est pas toujours continue par l'arrêt de l'avance du rondin. La PED est décomposée en deux performances énergétiques :

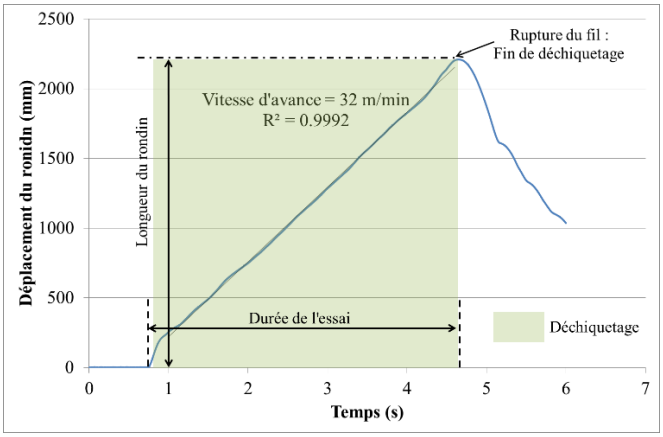
- La PED pour une avance du rondin continue (PEDc) : C'est la PED qui prend en compte que l'énergie et le bois déchiqueté lorsque l'avance du rondin est continue.

- La PED pour une avance du rondin discontinu (PEDd) : C'est la PED qui tient compte de l'énergie dépensée lors du déchiquetage du rondin mais également de l'énergie dépensée lorsque l'avance du rondin est à l'arrêt.

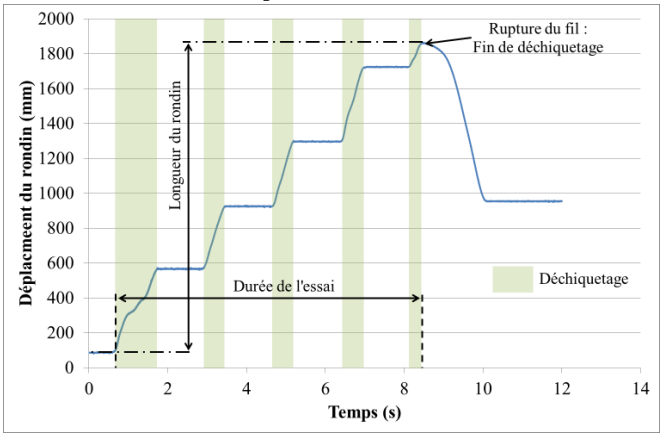
Ces notions de continue et de discontinue sont décrites dans les partie III.2.5..3 et III.2.5.4.

III.2.1. *La vitesse d'avance du rondin lors du déchiquetage.*

La vitesse d'avance et le déplacement du rondin lors du déchiquetage sont mesurés par le capteur magnétostrictif. L'allure du déplacement et de la vitesse du rondin sont illustrés sur les figures 42a. et 42 b.



a. Essai avec déplacement continu du rondin



b. Essai avec déplacement discontinu du rondin suite au déclenchement répété du système de sécurité antistress

Figure 42 : Allure générale du déplacement des rondins constatés aux cours des différents essais.

La mesure du déplacement permet de vérifier la continuité de l'avance du rondin. Dans l'exemple présenté sur la figure 42, nous constatons lors de deux essais de déchiquetage différents que les avances du rondin ne sont pas toujours continues. La courbe de la figure 42.a est le cas d'un essai de déchiquetage sans arrêt de l'avance du rondin par rapport à la courbe de la figure 42.b. Ces arrêts sont provoqués soit par le déclenchement de l'anti-stress qui arrête l'avance du rondin, soit par le blocage physique du rondin lors de l'amenage contre le contre couteau par exemple. Cette mesure de l'avance du rondin permet de déterminer précisément les zones de déchiquetage et d'arrêts d'avance du rondin pour le calcul de la performance énergétique de coupe.

La vitesse d'avance du rondin permet de définir l'avance par dent de l'opération de déchiquetage lorsqu'elle est combinée avec la vitesse de rotation. La vitesse d'avance du rondin est déterminée par la pente de la droite de l'avance du rondin et elle est exprimée en m/min. Lorsque l'essai n'est pas continu, la vitesse d'avance est déterminée pour chaque zone de déchiquetage.

III.2.2. *L'énergie de coupe mesurée à l'aide du contre couteau instrumenté.*

L'effort de coupe est déterminé à partir de la mesure de la déformation du contre couteau. Avant de présenter la méthodologie utilisée pour calculer l'effort de coupe à partir de la déformation du contre couteau, La notion d'effort de coupe est présentée en premier lieu. Cette présentation sert dans la suite pour montrer l'intérêt du calcul de l'effort de coupe par la mesure de la déformation du contre couteau et pour expliquer l'influence et l'impact de certain paramètres sur les efforts de coupe et performance énergétique.

III.2.2.1. L'effort de coupe

Le système étudié est proche de celui de Abdallah [Abdallah, 2010]. Les efforts de coupe se décomposent en plusieurs composantes comme le montre la figure 43.

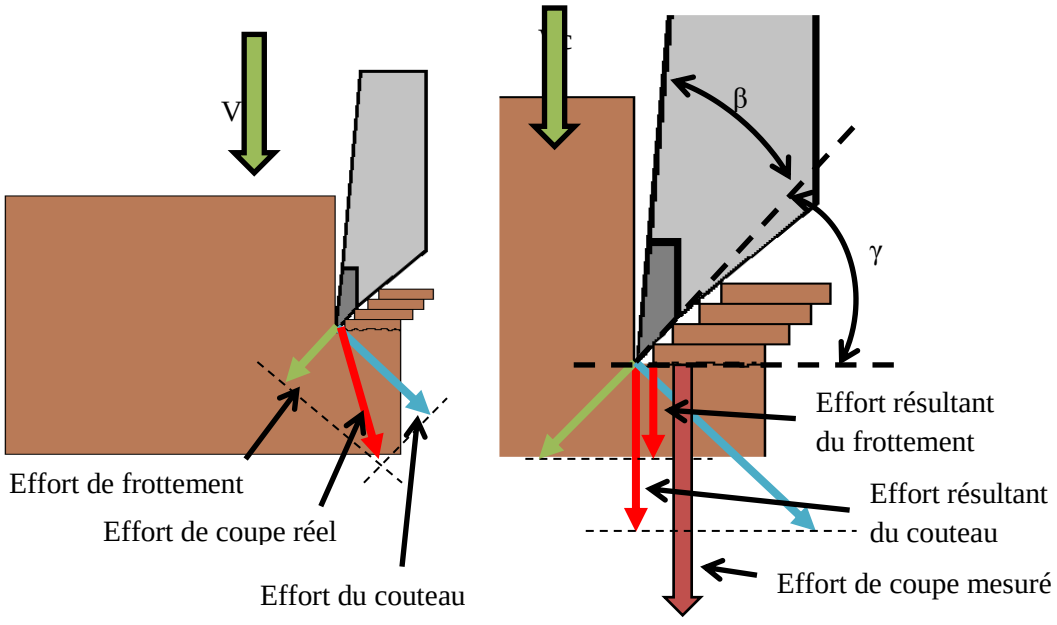


Figure 43 : Décomposition des efforts de coupe, vue de côté

Au niveau de la vue de côté, l'effort de coupe se décompose en deux efforts :

-L'effort de frottement de la plaquette produite qui a pour origine la formation de la plaquette comme expliqué au chapitre 2.II.1.1. Sa direction est normale à l'arête de coupe dans la face de coupe du couteau.

- L'effort du couteau fourni par le couteau au bois pour rompre les fibres du bois. Sa direction est normale à l'arête de coupe dans le plan normal à face de coupe du couteau. L'effort de coupe réel est la résultante de ces deux efforts. Sur notre déchiqueteuse, nous ne mesurons que l'effort qui est fourni perpendiculairement au contre couteau et dans la même direction que la vitesse de coupe. Ainsi, l'effort de coupe mesuré correspond à une partie des deux composantes qui constituent l'effort de coupe suivant la direction de la vitesse de coupe.

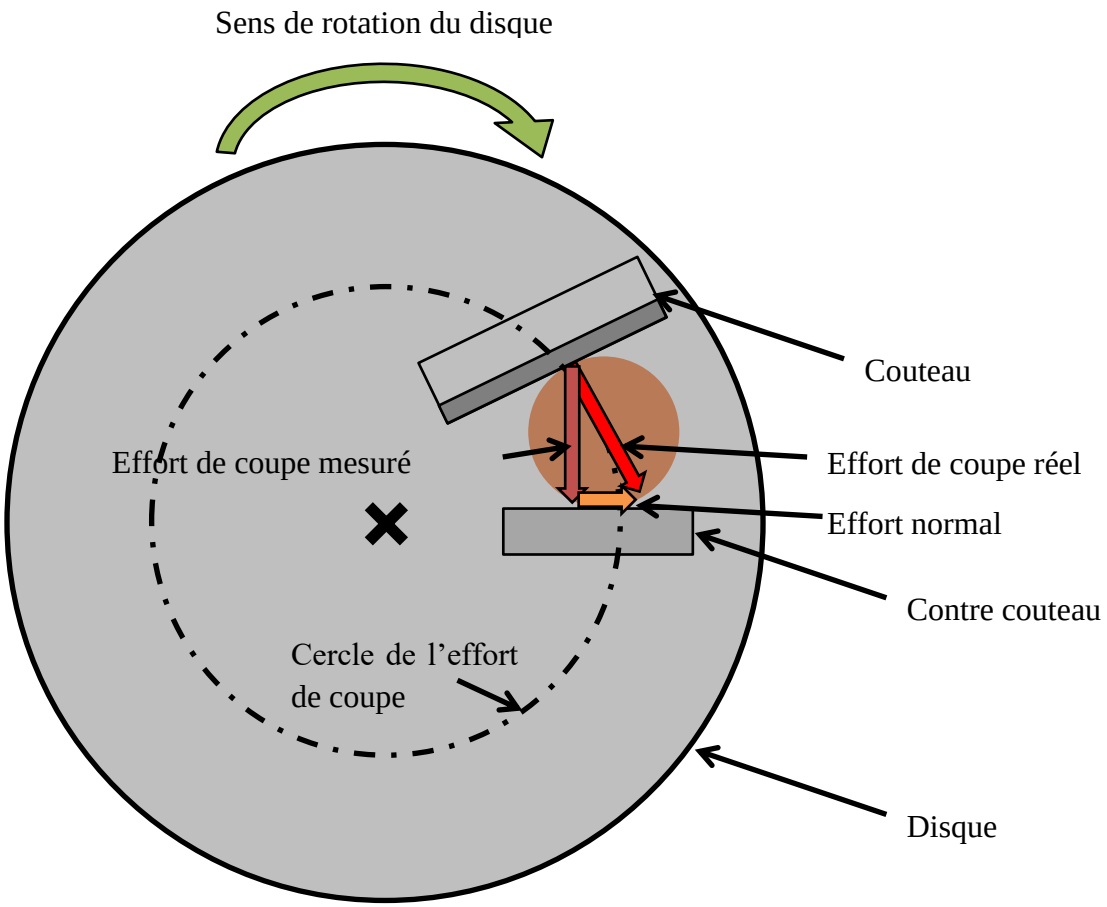
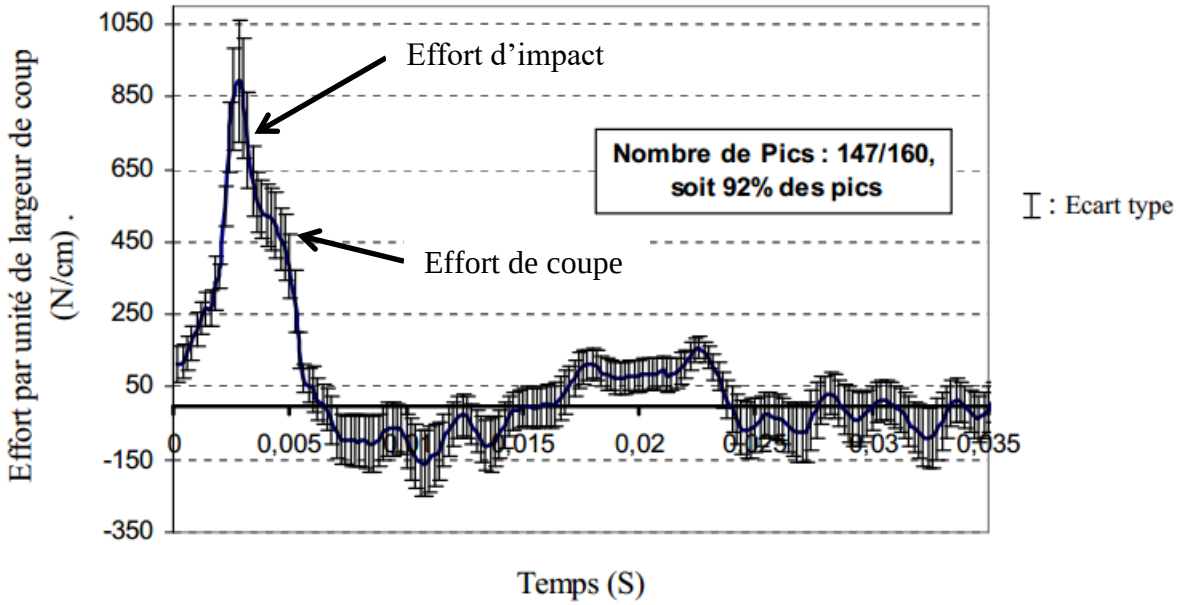


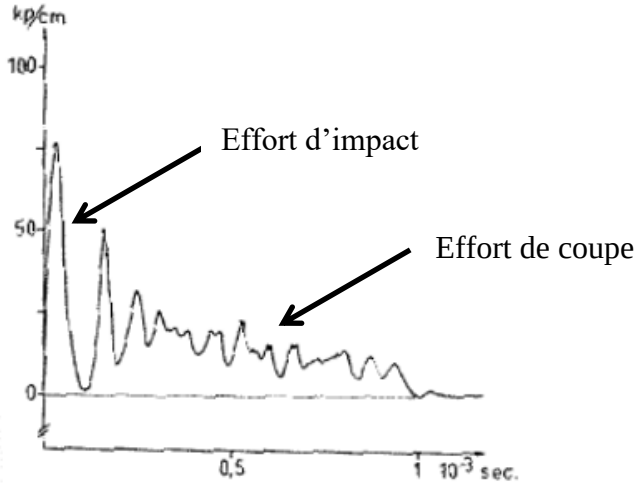
Figure 44 : Décomposition des efforts de coupe vue de face

Sur la vue de face de la figure 44, l'angle pris par le couteau entre le début et la fin de la coupe est de 20° pour un diamètre de bois de 100 mm. Ceci implique que l'effort au cours de la coupe n'est pas toujours dans la même direction que l'effort mesuré mais entraine une imprécision seulement de 6% que nous négligeons.

Actuellement, deux recherches menées par Adballah [Abdallah, 2011] et Hartler [Hartler, 1963] déterminent l'allure de l'effort de coupe pour des vitesses de coupe supérieures à 20 m/s. L'allure de l'effort de coupe dans ces conditions est représentée sur la figure 45.



a. Allure de l'effort de coupe par largeur de coupe, Vc = 26 m/s [Adballah, 2011]



b. Allure de l'effort de coupe, Vc = 20 m/s [Hartler, 1963]

Figure 45 : Allure de l'effort de coupe selon Adballah et Hartler

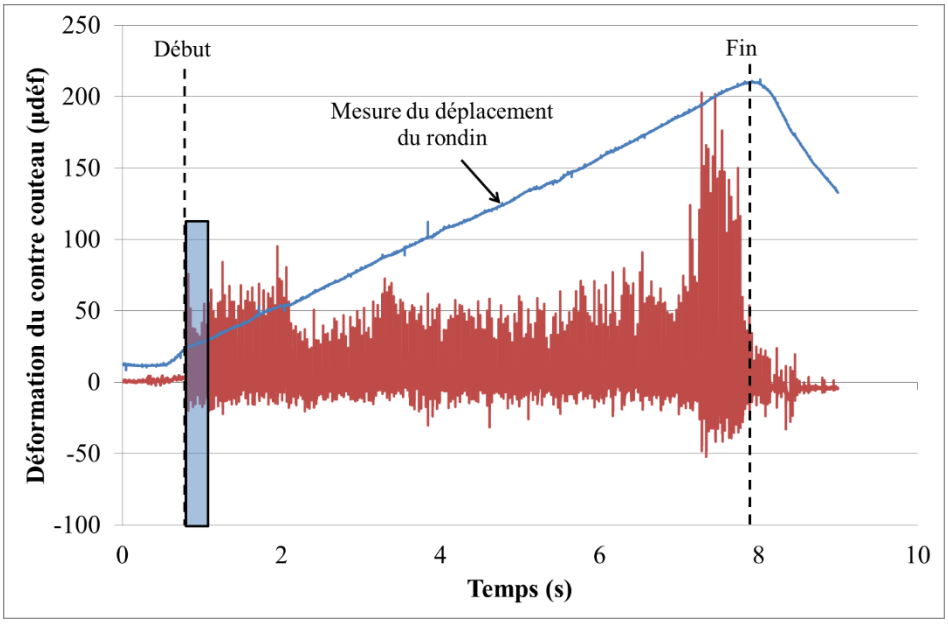
Abdallah et Hartler décomposent l'effort de coupe en deux parties. Tout d'abord, une première partie appelée force d'impact est une force élevée sur une très courte durée qui traduit que le couteau vient frapper la matière lors de la pénétration du couteau dans le bois. Ensuite une deuxième partie appelée force de coupe est une force plutôt constante où le bois coupe la matière. Pour finir l'effort de coupe s'annule lorsque le couteau finit de couper et de traverser la section du rondin.

Suivant ces travaux de recherche, nous exploitons cette méthode pour la détermination de l'énergie au niveau de la coupe. Mesurer l'effort de manière indirecte permet de ne pas perturber la mesure et nous choisissons d'utiliser la mesure de la déformation subie par le contre couteau pour calculer l'effort de coupe. Les parties III.2.2.2., III.2.2.3. et III.2.4

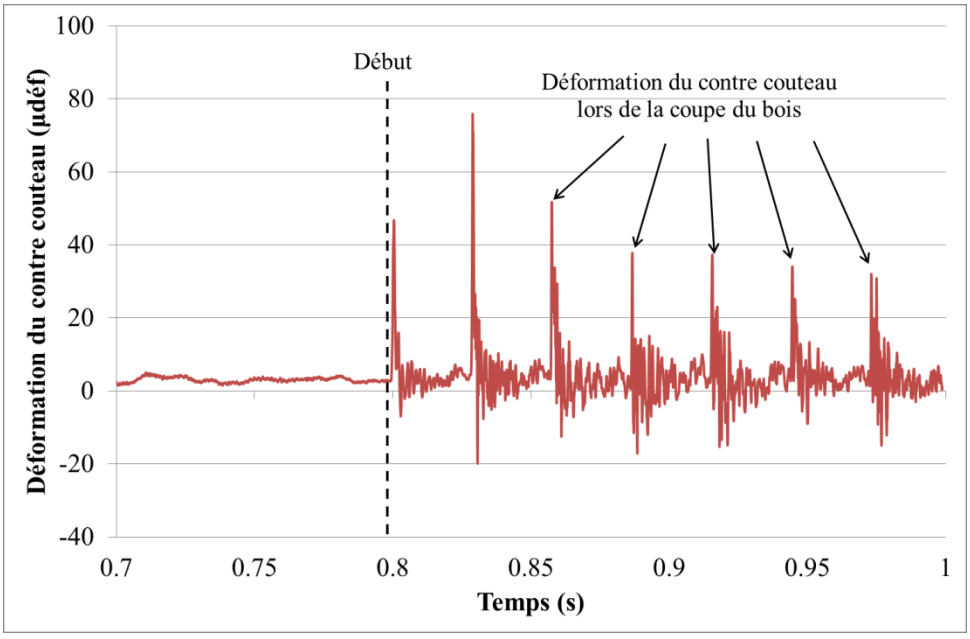
présentent respectivement la mesure de la déformation du contre couteau pour le calcul de l'effort et l'énergie de coupe.

III.2.2.2. La mesure de la déformation du contre couteau.

La mesure de la déformation est réalisée par l'extensomètre fixé en dessous du contre couteau. L'allure de la déformation lors de la coupe est illustrée sur les figures 46a. et 46b.



a. Allure de la mesure de la déformation au niveau du contre couteau lors d'un essai



b. Mesure détaillée de la déformation au niveau du contre couteau

Figure 46 : Mesure de la déformation du contre coutre couteau au cours d'un essai de déchiquetage

La mesure de la déformation lors de la coupe est très dynamique. Lorsque la déformation est observée sur un intervalle de temps très petit (b. de la figure 46), l'allure de la déformation au cours du déchiquetage est une multitude d'impacts dont l'espacement homogène est de 0.029 secondes sur cette figure 46. Ceci correspond au temps que met un couteau pour venir couper le bois pour une vitesse de rotation du disque de 1050 tr/min. Ces impacts se situent dans la zone de déchiquetage définie par l'avance du rondin. J'en déduis que la déformation mesurée a bien pour origine la coupe du rondin. L'effort de coupe est déterminé par posttraitement de ces mesures de déformation du contre couteau.

III.2.2.3. L'effort de coupe à partir de la mesure de la déformation du contre couteau.

L'effort de coupe est évalué par la mesure de la déformation du contre couteau (figure 47). Lorsque le couteau vient couper le bois, il exerce un effort opposé à son avance dans le rondin et dans le contre couteau. Cet effort déforme le contre couteau et la plaque en acier à laquelle il est vissé. Connaissant la sensibilité entre l'effort de coupe et la déformation du contre couteau, nous obtenons l'allure de l'effort de coupe qui est appliqué au contre couteau.

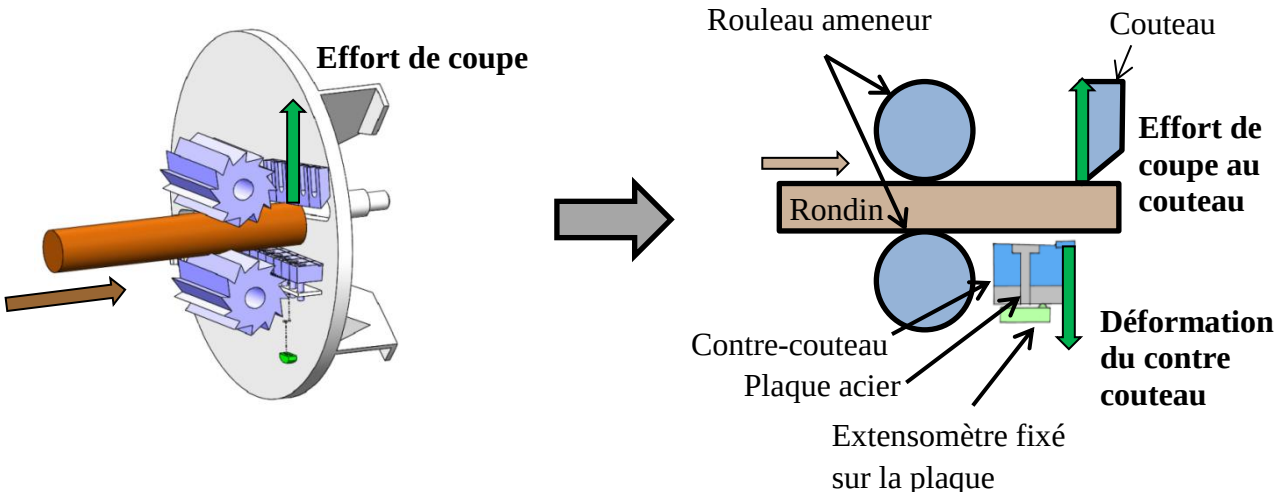


Figure 47 : Principe d'évaluation de l'effort de coupe à partir de la déformation du contre couteau

Afin de pouvoir mesurer cet effort, la sensibilité dynamique qui lie l'effort de coupe à la déformation du contre-couteau doit tout d'abord être déterminée lorsque la déchiqueteuse est à l'arrêt (Etape 1 figure 48). Après cette étape, l'effort de coupe est calculé en utilisant la mesure de la déformation du contre-couteau lors du déchiquetage et de la sensibilité dynamique obtenue (Etape 2 figure 48).

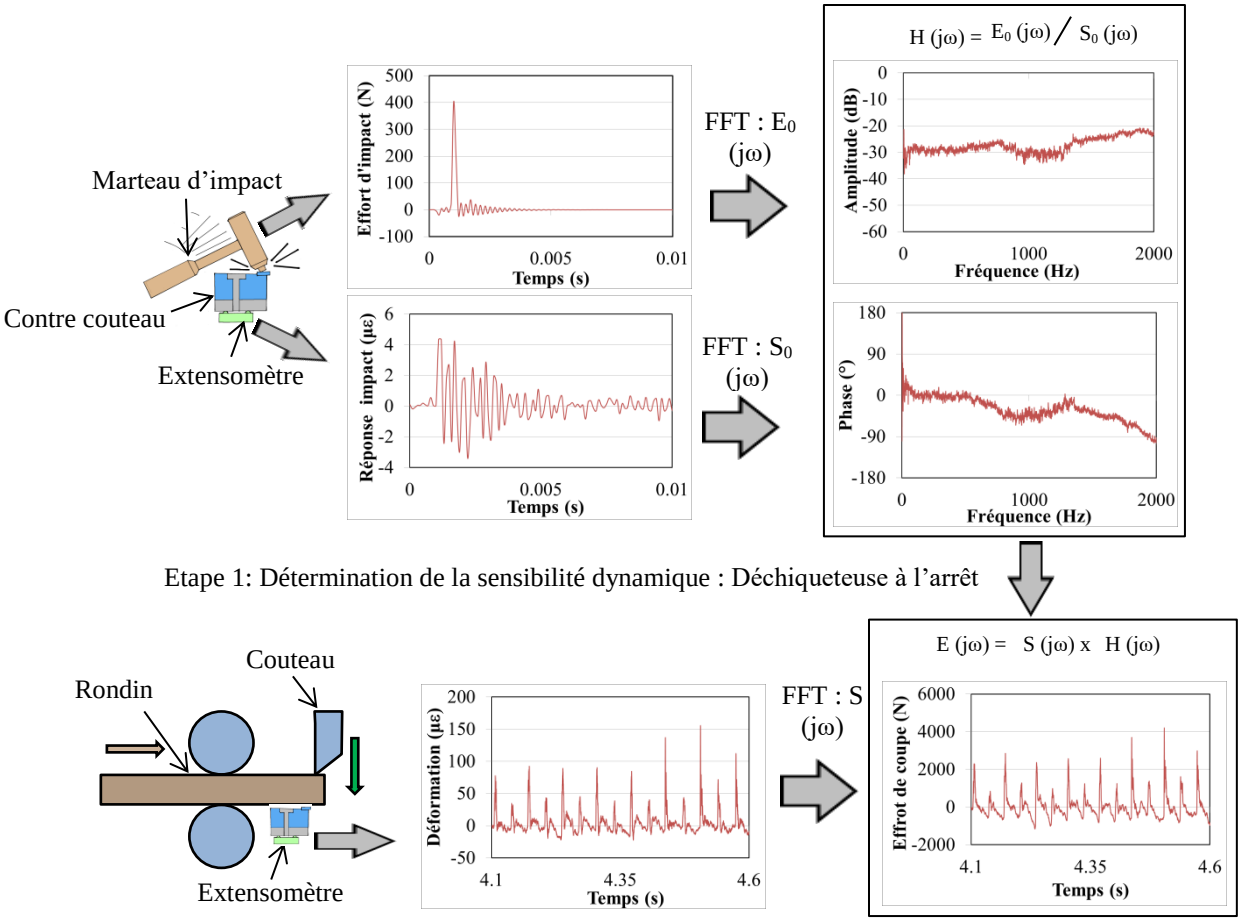


Figure 48 : Principe de l'étalonnage dynamique et traitement du signal déformation

La sensibilité est obtenue lorsque la déchiqueteuse est à l'arrêt. L'effort qui est exercé par un marteau d'impact sur le contre couteau est mesuré et est noté E(t). La déformation qui résulte de cet impact est mesurée simultanément et est notée S(t). Ces deux signaux E(t) et S(t) sont convertis dans le domaine fréquentiel en utilisant une Transformée de Fourier Rapide (TFR) ce qui nous donne E(jω) et S(jω). Nous calculons la sensibilité dynamique appelée Fonction de Réponse en Fréquence (FRF) notée H(jω) par :

$$H(j\omega) = \frac{S(j\omega)}{E(j\omega)}$$

Lorsque la FRF est définie, les essais de déchiquetage des rondins sont réalisés en ne mesurant que la déformation du contre-couteau. Ces différentes mesures sont converties dans le domaine fréquentiel par la TFR. L'effort de coupe dans le domaine fréquentiel est calculé en utilisant l'équation :

$$E(j\omega) = S(j\omega) \times \bar{H}(j\omega)$$

L'effort de coupe dans le domaine temporel est obtenu en utilisant la Transformée Inverse de Fourier (TFR^{-1}).

Par cette méthode, la mesure de la déformation du contre couteau est convertie en effort de coupe. L'allure de l'effort de coupe par rapport à la mesure de la déformation au cours du déchiquetage est représentée sur la figure 49

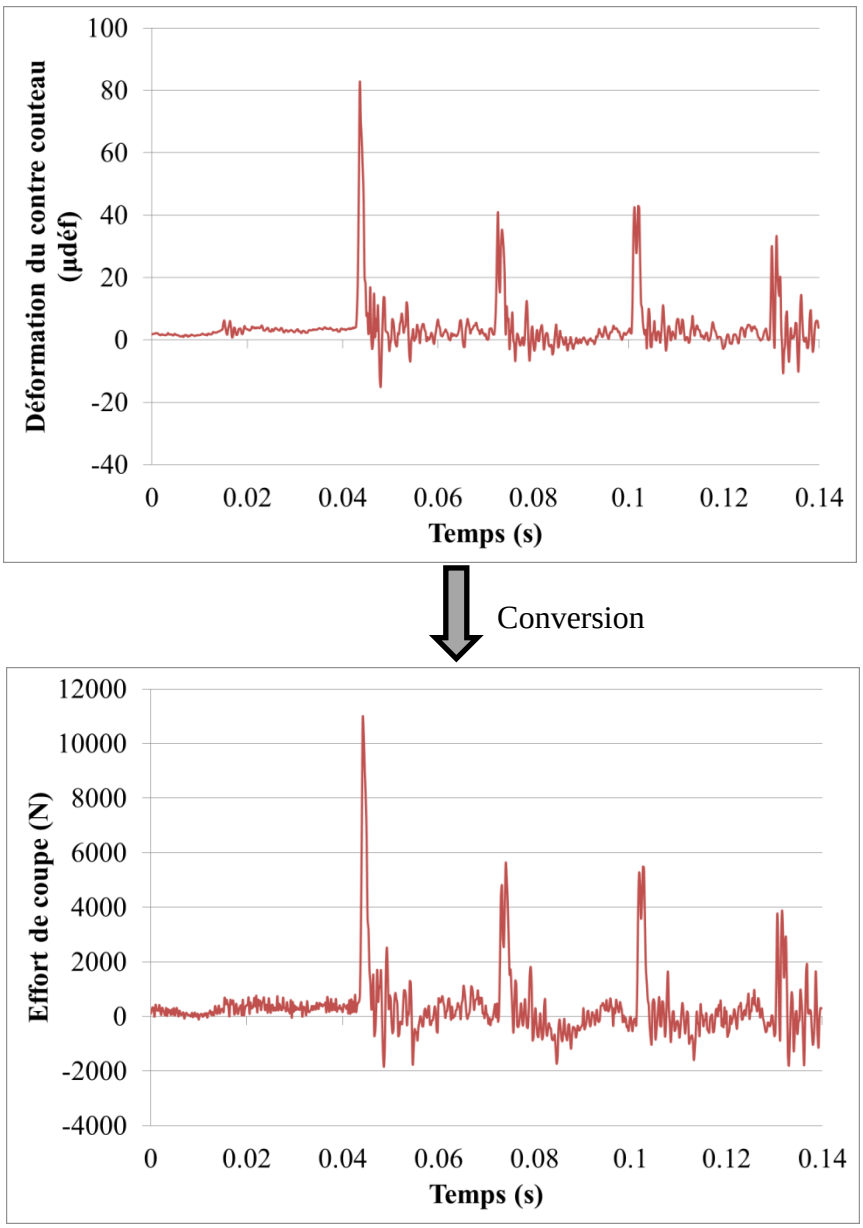


Figure 49 : Effort de coupe obtenu à partir de la déformation du contre couteau mesurée

Nous constatons que passer de la déformation du contre couteau en effort de coupe génère de légères modifications du signal qui sont propres à la FRF du système. Par contre, cela ne modifie pas les impacts qui sont localisés aux mêmes endroits et sur un même intervalle de temps.

Cette méthode nous permet de définir l'effort de coupe dans le couteau à tout instant. A partir de l'effort de coupe et du déplacement du disque, il est possible de définir l'énergie dépensée lors de la coupe afin de déterminer la PEC.

III.2.3. *La détermination de la position angulaire du disque.*

Définir la position angulaire du disque permet d'accéder au déplacement réel du couteau. Il est également nécessaire de post-traiter le signal transmis par le capteur inductif situé en face de la roue dentée (figure 50) afin d'obtenir la position angulaire du disque.

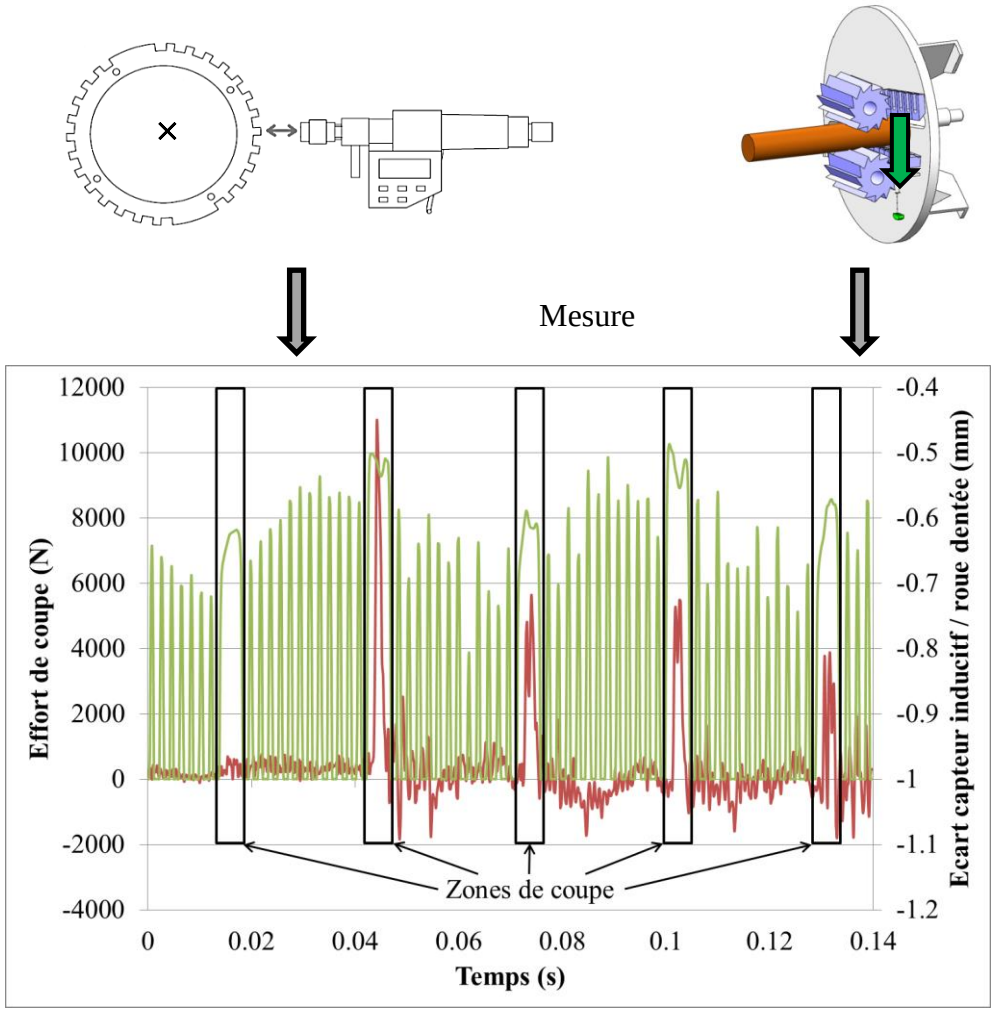


Figure 50 : Superposition du signal délivré par le capteur capacitif (vert) et de l'effort de coupe (rouge)

Le signal délivré par le capteur inductif est composé de deux signaux rectangles longs et de 24 rectangles courts. Les signaux longs correspondent aux deux dents de référence de longueur 25 mm. Nous constatons que la mesure de l'effort de coupe et la position du disque sont cohérentes. De plus, connaissant le nombre de points pour chaque dent et creux et l'angle réalisé par chaque dent, la position et le pas angulaire sont calculés à tout instant. Pour calculer l'énergie de coupe, seule la zone de coupe est nécessaire. Ainsi, le signal de la position angulaire du disque est utilisé pour découper le signal des efforts de coupe en impacts réalisés sur un tour afin de les moyenner.

III.2.4. *L'énergie de coupe par la mesure de l'effort de coupe.*

L'énergie de coupe est l'énergie réellement dépensée au niveau de la coupe et caractérise au mieux la PEC . Par la détermination de cette performance énergétique, nous pouvons évaluer

l'influence des paramètres de coupe de la déchiqueteuse sur la performance énergétique de coupe en s'affranchissant de l'éjection ou de l'amenage.

L'énergie de coupe est définie par l'équation :

$$Energie\ de\ coupe = Aire\ sous\ la\ courbe\ de\ l'effort \times déplacement\ du\ couteau$$

Ici le déplacement effectué par le couteau entre deux instants est défini par la distance qui sépare l'axe du disque de la position de mesure de l'effort de coupe multiplié par l'angle effectué entre deux ces deux instants (figure 51).

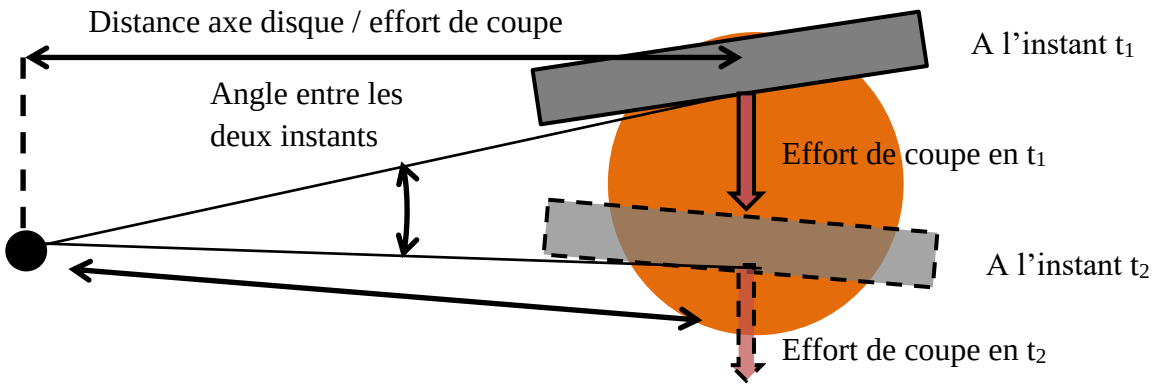


Figure 51 : Détermination du déplacement effectué entre deux points de mesure pour le calcul de l'énergie

Comme la mesure de l'effort de coupe est réalisée au niveau du contre couteau qui est fixe, l'effort de coupe est donc mesuré au même point du contre couteau en tout instant. Ainsi, la distance entre l'axe du disque et l'effort de coupe est une valeur constante. L'énergie de coupe est calculée comme l'aire sous la courbe de l'effort de coupe multipliée par la distance entre l'axe du disque et l'effort de coupe par rapport à la position angulaire du disque (figure 52).

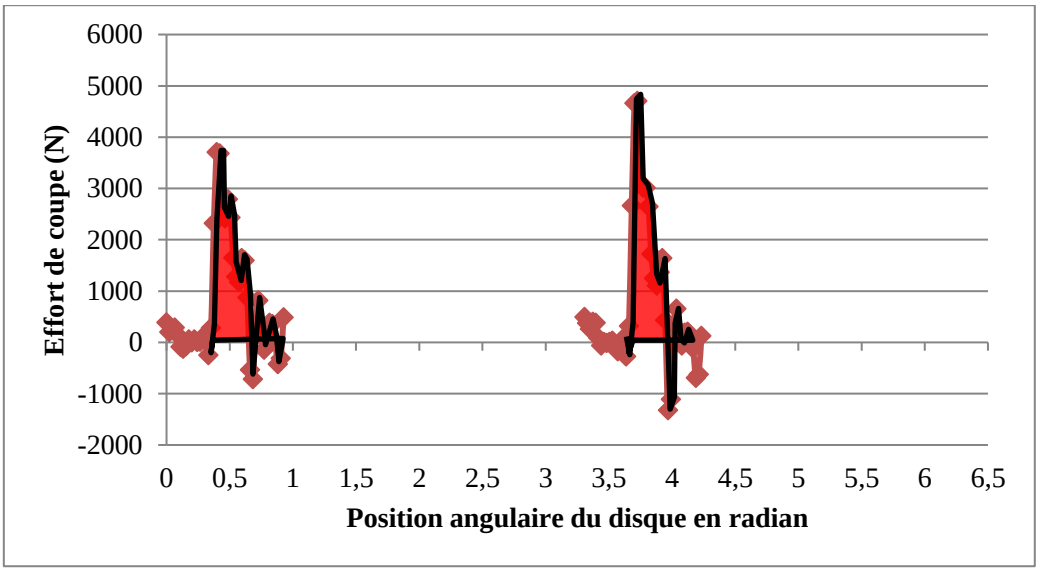


Figure 52 : Exemple de détermination de l'énergie de coupe sur un tour de disque.

Comme le bois est guidé lors de son déchiquetage, et comme la perte de vitesse de rotation du disque est continue (figure 56), le pas angulaire est constant. L'énergie de coupe pour la détermination de la PEC est déterminée par la somme des énergies de coupe pour l'ensemble des impacts mesurés au cours de l'essai de déchiquetage.

III.2.5. *L'énergie de la déchiqueteuse par le cardan instrumenté.*

La détermination de la puissance consommée par la déchiqueteuse permet de définir la performance énergétique de la déchiqueteuse. Cette puissance est donnée par la formule :

$$Puissance\ consommée = Couple\ au\ cardan\ instrumenté \times vitesse\ rotation\ disque$$

Le couple est directement mesuré par le cardan instrumenté alors que l'obtention la vitesse de rotation du disque nécessite un traitement des données. Lorsque le couple et la vitesse de rotation sont connus, il ne reste plus qu'à définir la puissance consommée par la déchiqueteuse.

III.2.5.1. Couple mesuré par le cardan

L'allure de la mesure du couple au cours d'un essai de déchiquetage est illustrée sur la figure 53.

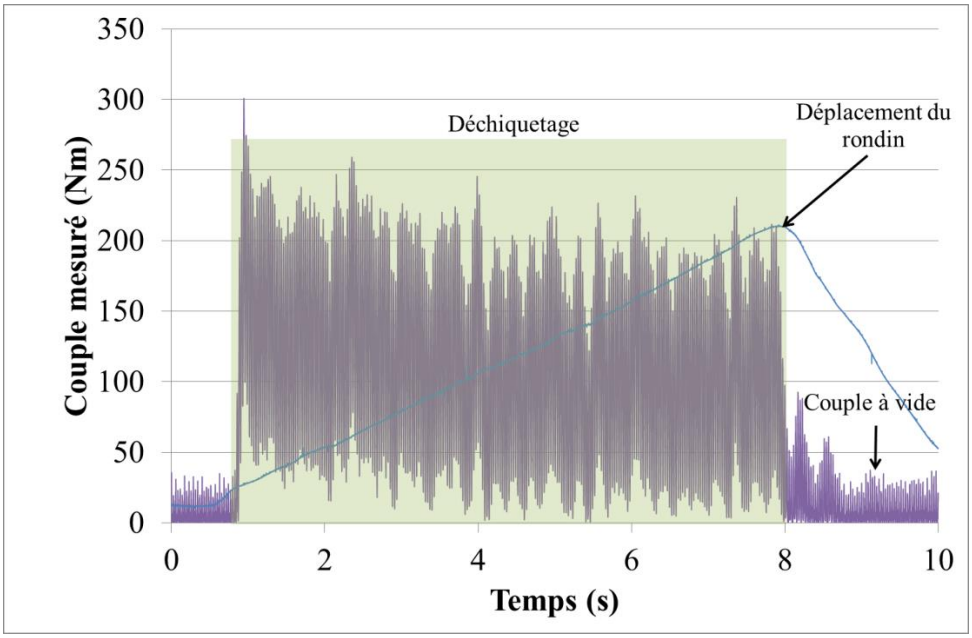


Figure 53 : Exemple de la mesure du couple au cours d'un essai de déchiquetage.

Lors du déchiquetage, nous constatons que le couple augmente fortement, se stabilise, puis il oscille autour d'une valeur et il diminue en fin de déchiquetage. Lorsque le disque est en rotation en dehors des périodes de déchiquetage, le couple n'est pas nul mais égal au couple à vide nécessaire pour maintenir le disque en rotation et pour créer le flux d'air généré par les pales d'éjection.

Sur la figure 54 est présentée une vue détaillée du signal du couple transmis par le cardan superposé au signal délivré par le capteur capacitif qui nous permet de connaitre l'emplacement des couteaux.

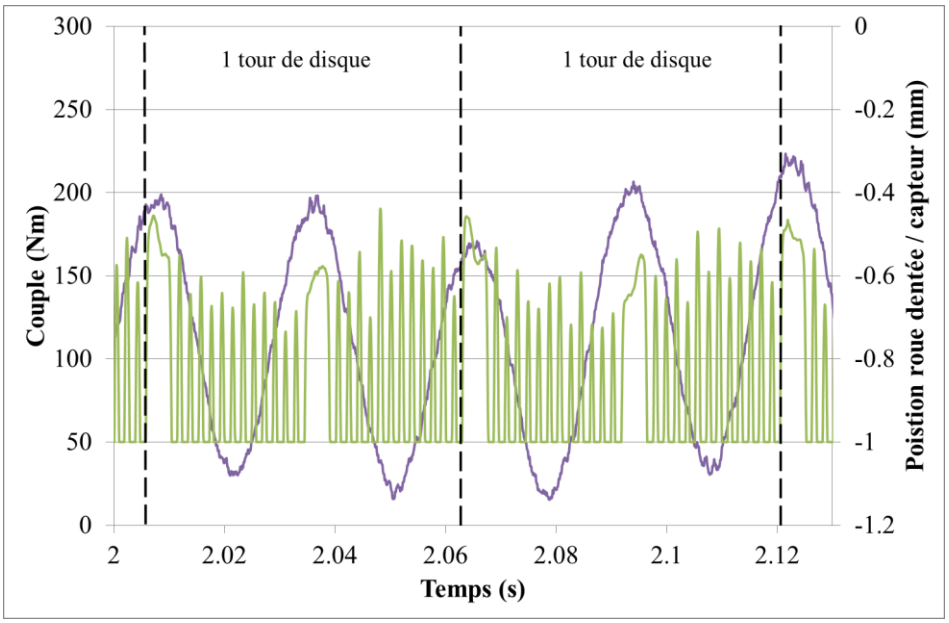


Figure 54 : Superposition de la mesure du couple et du codeur

Le couple oscille à raison d'une période par demi-tour de disque. La raison de cette oscillation est expliquée dans l'annexe 1. Les axes au niveau de l'entrée et de la sortie du cardan ne sont pas dans la même direction. Cela entraine des phases d'accélération et de décélération et donc des phases de couple important et moins importante au tour. La mesure du couple transmis par le cardan est une mesure moins dynamique que celle de l'effort de coupe.

III.2.5.2. La vitesse de rotation et position du disque par le codeur.

La vitesse de rotation du disque est définie par traitement du signal rectangle obtenu par le codeur. La vitesse de rotation du disque est calculée à partir de la position angulaire de la roue dentée (figure 55).

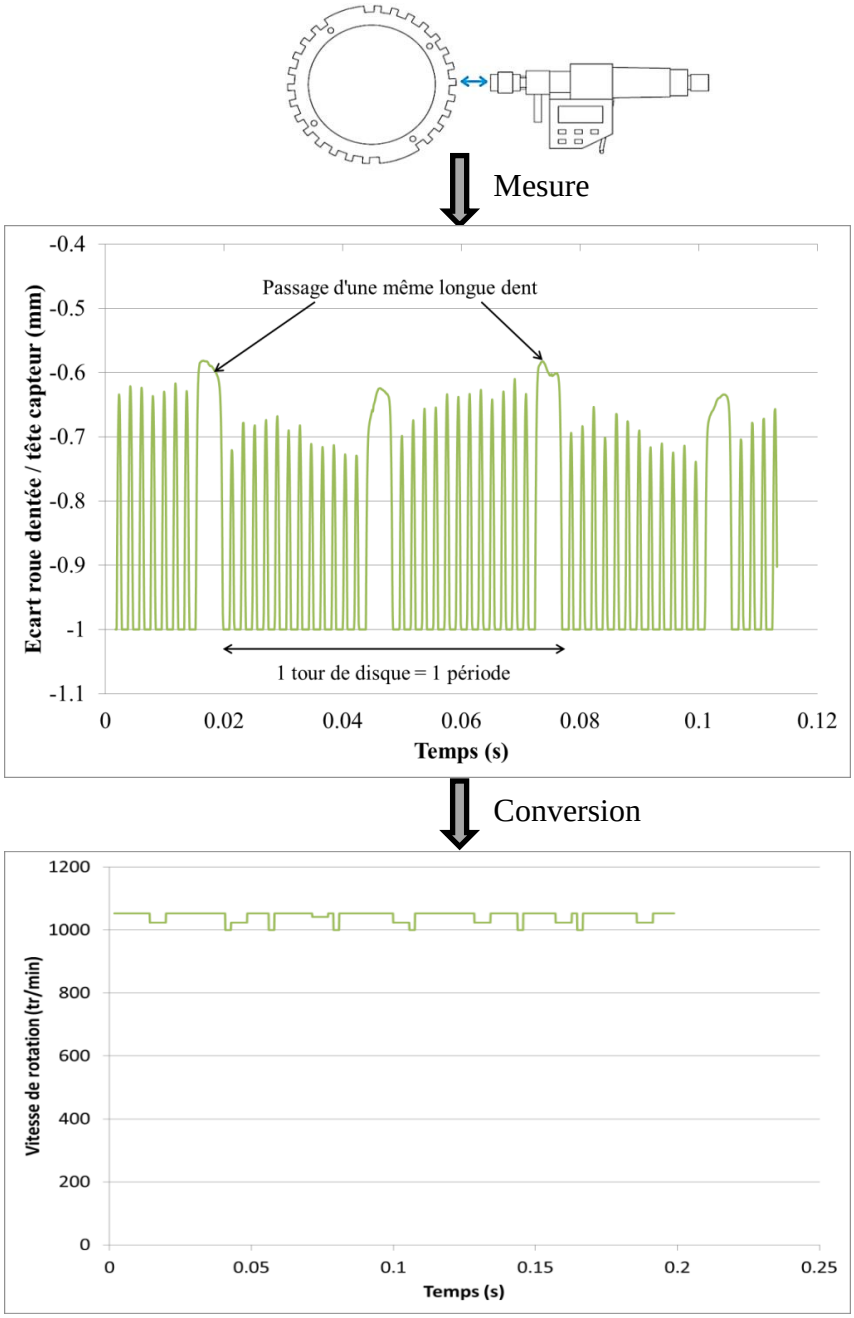


Figure 55 : Evaluation de la vitesse et de la position du disque par le signal du capteur capacitif sur 2 tours du disque

Plus le nombre de points mesurés pour chaque dent est important, plus la précision de la mesure augmente. La précision de mesure est de +/- 50 tr/min à 1000 tr/min et de +/- 120 tr/min à 1500 tr/min pour une fréquence d'acquisition de 10 kHz

Pour vérifier que la détermination de la vitesse est correcte, un essai de variation de la vitesse du disque est réalisé lors du déchiquetage d'un rondin de hêtre d'un diamètre de 160 mm. Le déchiquetage de ce rondin nécessite plus de puissance que ne peut fournir la source d'énergie. Cet essai déclenche donc le système de sécurité anti stress. Les seuils haut et bas de la vitesse de rotation sont réglés à 1450 et 1400 tr/min respectivement. L'allure de la vitesse de rotation du disque ainsi que l'avance du rondin sont présentées sur la figure 56.

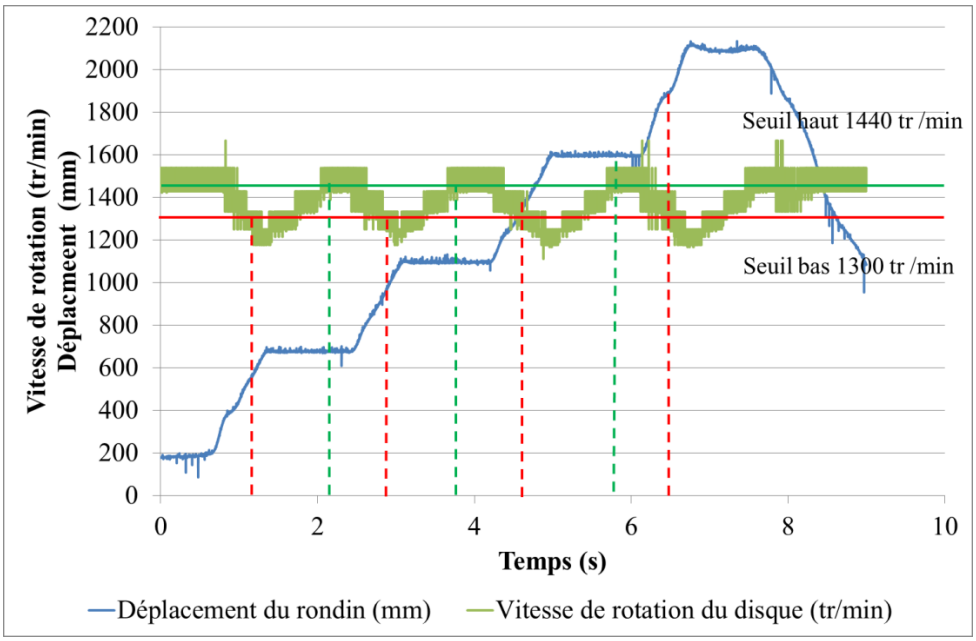


Figure 56 : Variation de la vitesse de rotation du disque pour une puissance nécessaire importante

Nous voyons lors de cet essai où l'anti stress s'est déclenché par la variation de la vitesse de rotation du disque et par la discontinuité de l'avance du rondin. Entre les seuils de déclenchements de l'anti-stress et l'arrêt ou la reprise de l'avance du rondin, il y a un décalage. En effet, il est possible d'estimer le temps de réponse de l'anti-stress pour déclencher l'arrêt ou l'avance du rondin autour de 0,3 s. La perte de la vitesse de rotation du disque est continue et se déroule sur plusieurs tours. On peut considérer que le pas angulaire lors du passage d'une dent à une autre et sur une dent est constant. Suite à ces constations, j'ai choisi de considérer que le pas angulaire et donc que le déplacement du couteau est constant pour le calcul de l'énergie de coupe. Cette courbe montre aussi l'intérêt de dimensionner le moteur correctement car le temps où l'anti-stress est déclenché sur cet essai est d'environ 4 secondes sur un essai d'une durée totale de 8 secondes soit une productivité réduite de moitié.

Connaissant maintenant la vitesse de rotation du disque, la puissance est déterminée par le produit de la vitesse de rotation par le couple subi par le cardan. Nous pouvons dès à présent déterminer la méthodologie d'évaluation de l'énergie globale consommée par la déchiqueteuse.

III.2.5.3. L'énergie consommée par la déchiqueteuse lors d'une avance du rondin continue

L'énergie consommée par la déchiqueteuse est l'énergie qui est dépensée uniquement au cours du déchiquetage lors d'une avance continue du rondin. Cette énergie ne prend pas en compte l'énergie à vide de la déchiqueteuse, afin de se concentrer sur les paramètres du déchiquetage. Par cette énergie consommée par la déchiqueteuse, nous définissons la performance énergétique de la déchiqueteuse continue PEDc (figure 57).

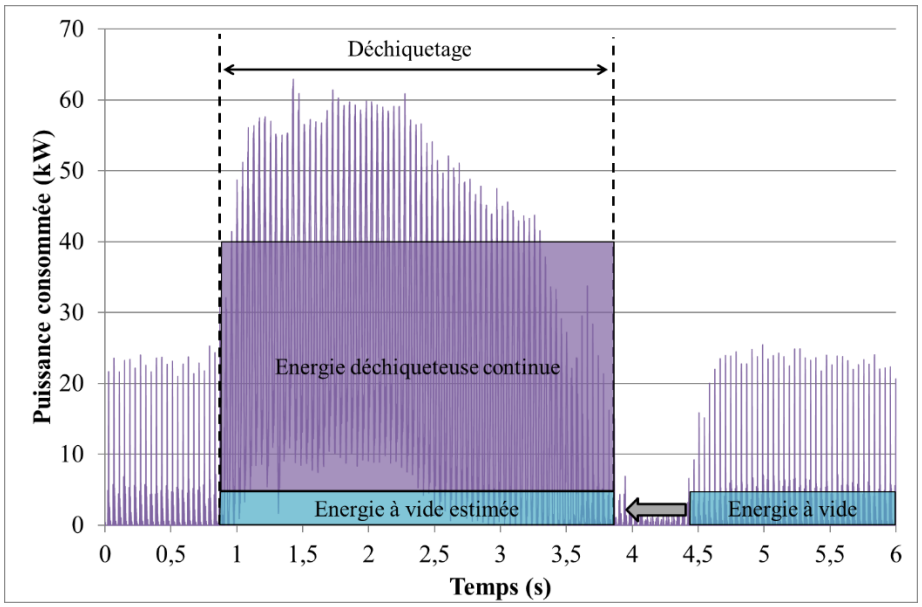


Figure 57 : Détermination de l'énergie consommée lors d'un essai normal

L'obtention de l'énergie consommée par la déchiqueteuse est définie par l'aire sous la courbe de puissance consommée par la déchiqueteuse. L'énergie à vide correspond à l'énergie pour maintenir le disque à la vitesse souhaitée et pour créer le flux d'air de l'éjection.

III.2.5.4. L'énergie consommée par la déchiqueteuse lors d'une avance du rondin discontinue

L'énergie consommée par la déchiqueteuse lors d'une avance du rondin discontinue est l'énergie qui est dépensée au cours du déchiquetage en prenant en compte les arrêts d'avance du rondin (figure 58). Cette énergie permet de définir la performance énergétique de la déchiqueteuse dans le cas d'une avance du rondin discontinue (PEDd).

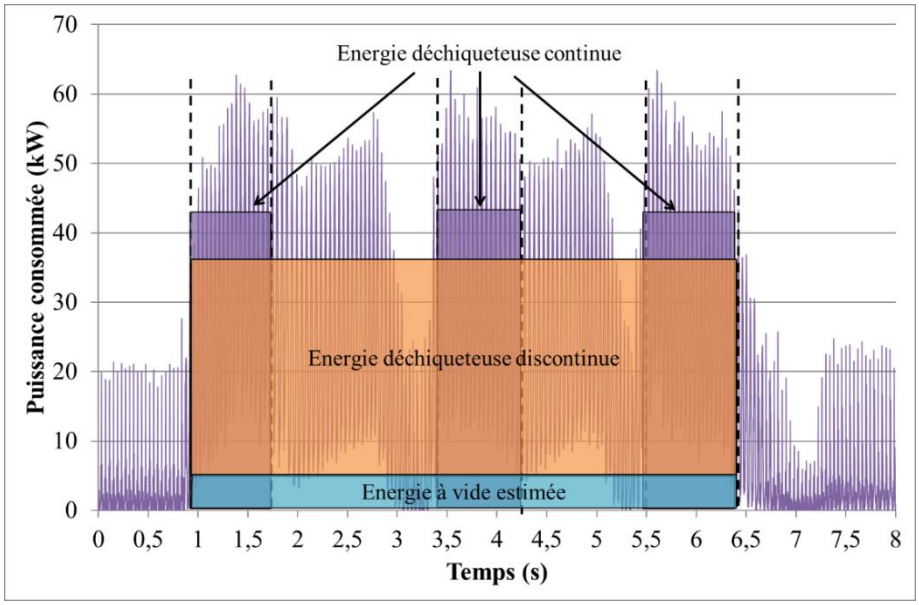


Figure 58 : Détermination des énergies consommées par la déchiqueteuse dans pour la détermination de la PEDc et la PEDd pour les essais avec déclenchement de l'anti stress

Le mode de calcul est le même que pour l'énergie déchiqueteuse continue et permet de définir la PEDd. Dans notre étude, les seuls arrêts pris en compte sont ceux de l'anti stress. Cette PEDd est donc toujours égale ou supérieure à la PEDc.

La partie III. présente les différentes étapes de traitements des signaux utilisés pour la détermination de la performance énergétique à la coupe (PEC) et de la déchiqueteuse (PEDc et PEDd). Au niveau de la déchiqueteuse, la PEDc est celle qui sert de référence pour les études sur les différents paramètres étudiée. La PEDc ne tient compte que des zones de déchiquetage du rondin et peut être facilement comparer à la PEC. Maintenant, les différents paramètres étudiés dans la cadre de la thèse sont présentés afin d'évaluer leur influence sur la PEDc.

IV. Les paramètres de coupe étudiés lors de la recherche

Nous avons étudié plusieurs paramètres de coupe lors de ces travaux de recherche parmi les nombreux paramètres possibles répertoriés sur la figure 59.

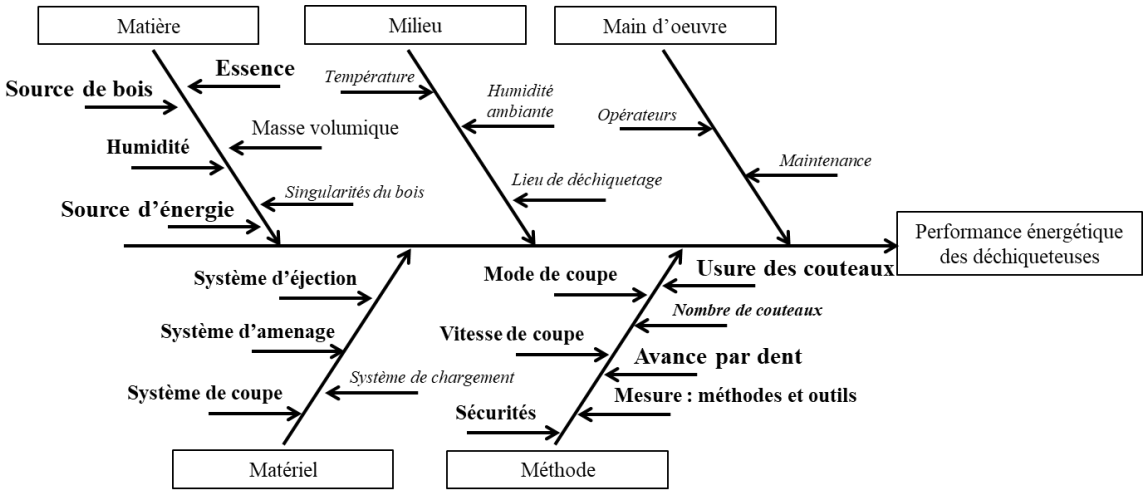


Figure 59 : Diagramme de causes et effets

Un plan d'expérience est réalisé avec 5 paramètres de coupe. Des essais complémentaires sur d'autres paramètres ne pouvant être pris en compte dans ce plan sont également réalisés et détaillés dans la partie IV.2.Pour tous ces essais, une répétition de cinq rondins déchiquetés est réalisée suivant les résultats obtenus et détaillés dans l'annexe 2.

IV.1. Les paramètres de coupe dans le cadre d'un plan d'expérience

La méthode du plan d'expérience est utilisée pour étudier notre système en réduisant les essais à réaliser. Le plan d'expérience est une méthode développée par Tagushi qui permet de définir la combinaison des paramètres pour optimiser le processus. La recherche menée sur différents paramètres étudiés s'est appuyée sur des tables existantes et permettant rapidement d'étudier ces paramètres.

Dans mon cas, les quatre paramètres machines et le paramètre bois sont décrits dans le tableau 15.

Localisation	Désignation	Paramètre de coupe	Valeurs
Machine	Avance par dent	f_z	7 et14mm
	Vitesse de coupe	V_C	25 et 35 m/s
	Angle de dépouille	α	0, 5 et 10°
	Angle d'amenage	σ	55 et 90°
Bois	Diamètre du rondin	$Ø_{bois}$	70 et 100mm

Tableau 15 : Paramètres étudiés pour le plan d'expérience

Ces paramètres sont choisis car ils font l'objet de très peu, voire d'aucune recherche. De plus, ces paramètres ont une influence directe sur l'énergie consommée par la déchiqueteuse ou augmente la quantité de bois déchiqueté pour une même consommation d'énergie. L'avance par dent déjà étudiée par Di Fulvio et al. [Di Fulvio, 2015] sert de référence et permet de déterminer l'importance des autres paramètres sur la performance énergétique.

Pour l'élaboration du plan d'expérience, 4 paramètres à 2 niveaux et 1 paramètre à 3 niveaux sont définis. La table 3^1 x 2^4 est choisie en fonction du nombre de niveau de chaque paramètre et du nombre de paramètres fixés. Le paramètre à 3 niveaux est l'angle de dépouille et les 4 autres sont la vitesse de coupe, l'angle d'amenage, l'avance par dent et le diamètre du rondin.

La déchiqueteuse utilisée est la déchiqueteuse B160 à disque de marque Noremat ayant subi une modification afin de faire varier l'angle d'amenage. Les différents paramètres étudiés sont décrits plus en détail dans la suite.

IV.1.1. *L'avance par dent.*

Les avances par dent de 7 et 14 mm/dent permettent d'évaluer la performance énergétique de la déchiqueteuse tout en respectant les vitesses d'avance du rondin inférieures à 60 m/min et en ne dépassant pas la saillie du couteau de 24 mm. Comme nous ne pouvons régler que la vitesse d'avance du rondin, le tableau 16 donne les valeurs de réglage de la vitesse d'avance du rondin en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent définie.

Vc m/s	fz mm	Vf m/min
23	7	14
23	14	28
35	7	21
35	14	42

Tableau 16 : Réglage de la vitesse d'avance du rondin en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent

Le réglage est effectué en modifiant la vitesse du rouleau ameneur et en mesurant cette vitesse à l'aide du capteur magnétostrictif. En modifiant cette vitesse d'avance, la déchiqueteuse est ainsi réglée pour obtenir les avances par dent de 7 et 14 mm/dent selon la vitesse de coupe de la déchiqueteuse.

IV.1.2. *La vitesse de coupe*

La vitesse de coupe n'a pas fait l'objet d'étude sur la performance énergétique. Elle est pourtant très variable d'un système à l'autre et nous ne savons pas si elle a une influence sur

la performance énergétique de la déchiqueteuse. Cette vitesse est généralement comprise entre 25 et 35 m/s selon le système de coupe à disque. Elle dépend également de la source d'énergie et de la vitesse de rotation du système de coupe. Pour cela, la vitesse de coupe est étudiée pour définir la vitesse de coupe la plus appropriée au déchiquetage du bois en modifiant la vitesse de rotation du disque.

Un multiplicateur est ajouté au banc d'essai afin de régler la vitesse de coupe à 24m/s ou à 35m/s. La vitesse de coupe de 35 m/s correspond également à la vitesse maximale que peut atteindre notre disque sans être détérioré.

Le choix de travailler sur la vitesse de coupe et l'avance par dent réduit le temps de déchiquetage et par conséquence l'énergie consommée pour une même masse de bois déchiquetée.

IV.1.3. *L'angle de dépouille du couteau*

Les couteaux actuellement utilisés sont des couteaux dont la coupe est assurée par une plaquette en carbure de tungstène. Nous avons constaté que l'angle de dépouille est inexistant sur ce couteau et que l'angle de coupe atteint 50°, ce qui est très élevé par rapport à d'autres outils coupants dédiés au bois qui se situent aux alentours de 30° lorsqu'ils sont en acier. Le choix d'augmenter l'angle de dépouille devrait réduire les efforts de frottement du couteau sur le rondin de bois lors de la formation des plaquettes. Nous avons de ce fait réalisé différents couteaux en modifiant l'angle de dépouille pour évaluer l'importance des différents angles sur les performances de la déchiqueteuse comme le montre la figure 60.

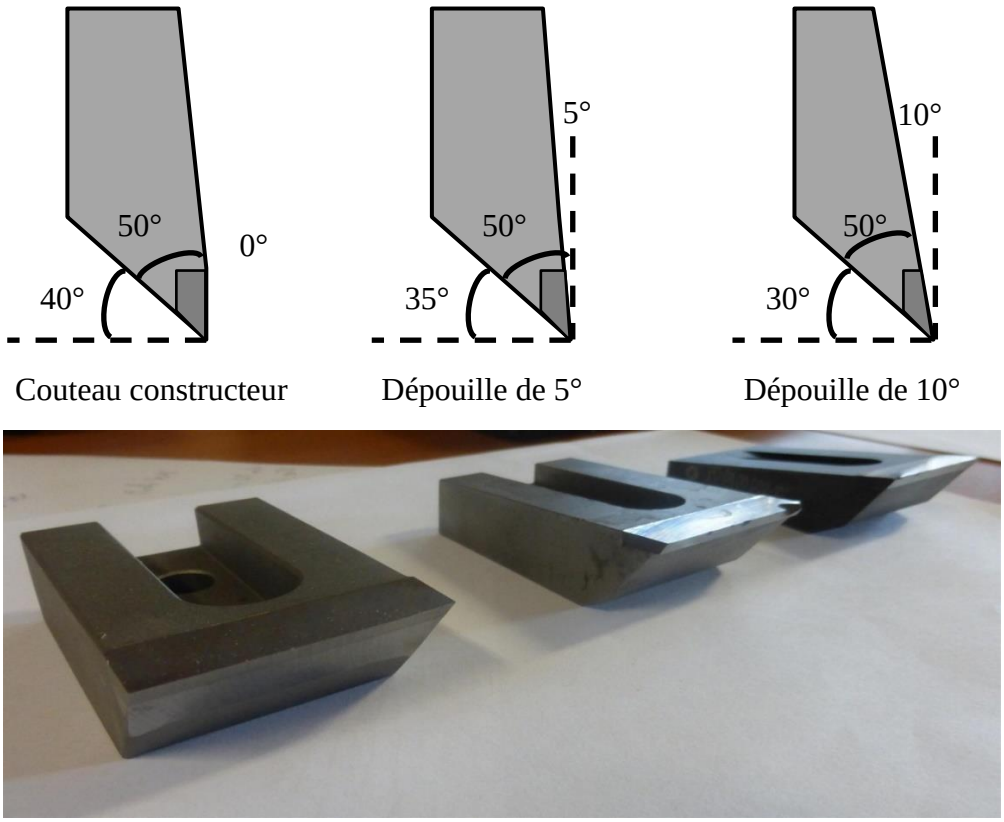


Figure 60 : Différents couteaux et angles étudiés

Le choix de ne pas modifier l'angle taillant du couteau permet de conserver la bonne tenue de l'arrête de coupe. Un angle de taillant de 50° permet de donner une bonne résistance au couteau en carbure nuance 11510 et permet également d'étudier l'influence de l'angle de coupe sur la performance énergétique. Les angles de dépouille sont de 0, 5 et 10° et correspondent à des valeurs de dépouille que l'on retrouve dans le mode de coupe 90-90. La modification de l'angle de dépouille sans modifier l'angle de taillant entraine systématique une modification de l'angle de coupe qui est respectivement de 40, 35 et 30°.

IV.1.4. *L'angle d'amenage du rondin*

L'angle d'amenage est étudié car aucunes données n'existent sur l'influence de cet angle. Orienter le bois pour que la coupe se fasse dans le même sens que les fibres du bois devrait augmenter la performance énergétique de la déchiqueteuse en réduisant l'énergie nécessaire lors de la coupe. L'angle d'amenage est de 55° ou 90° comme le montre la figure 36. Cette plage de mesure permet de déchiqueter les rondins de diamètre compris entre 70 et 100 mm en utilisant la totalité de la longueur des couteaux. De plus, la structure de la déchiqueteuse au niveau de l'introduction du rondin ne permet pas de déchiqueter des bois de diamètre supérieur à 100 mm sous l'angle de 55° par la géométrie prise par la section broyée.

IV.1.5. *Le diamètre du rondin*

Peu de données existent au niveau de l'influence du diamètre du rondin sur la performance énergétique contrairement au type de bois et à l'essence [Di Fulvio, 2015]. Les diamètres 70 mm et 100 mm sont choisis car l'écart de 30% est significatif et ces diamètres correspondent respectivement à la moitié et aux deux tiers du diamètre maximal admissible par la déchiqueteuse. Ces diamètres de rondin sont également disponibles en forêt lors des coupes d'éclaircie. Ce bois provient généralement de tronc de bois jeune et de faible diamètre.

IV.2. Les autres paramètres de coupe étudiés

En plus des paramètres de coupe précédents, l'influence que peut avoir d'autres paramètres de coupe sur la performance énergétique est évaluée. Ces paramètres sont les paramètres du bois que sont l'essence et l'humidité du rondin et un paramètre machine qui est la source d'énergie.

IV.2.1. *L'essence*

Le hêtre et le sapin sont deux essences disponibles et utilisées en déchiquetage. Ces deux essences ont des caractéristiques et des structures totalement différentes. En étudiant ces bois, les différences liées aux caractéristiques de sapin et du hêtre sont évaluées et ces nouveaux résultats complèteront la base de données sur cette recherche pour ces deux essences qui ont peu été étudiées.

IV.2.2. *L'humidité*

L'humidité n'est pas étudiée au cours des différentes études de la littérature. Ce paramètre a pourtant une influence importante sur les efforts de coupe comme le montre la figure 61.

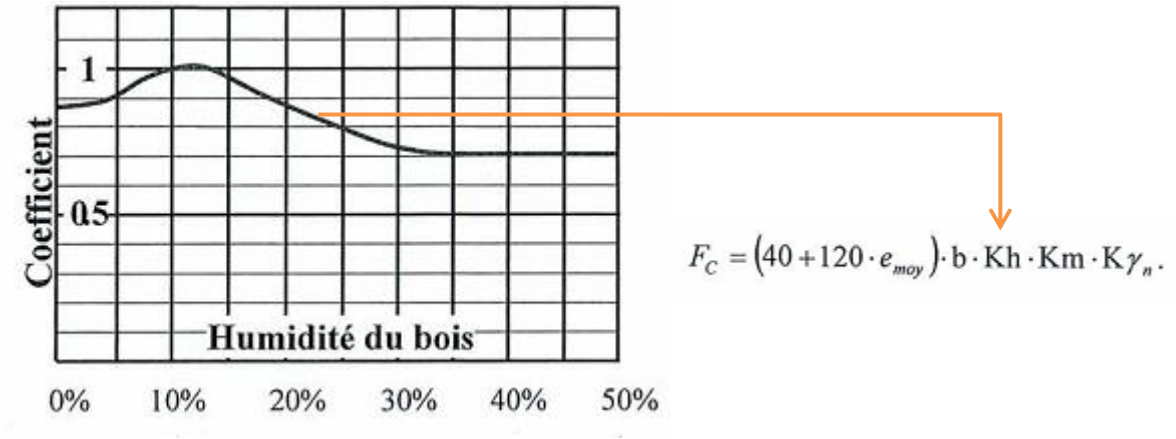


Figure 61 : Influence de l'humidité (sur masse anhydre) du bois sur l'effort de coupe [Kivimaa, 1950]

La loi présentée sur la figure 61 ne peut cependant pas être appliquée dans le cas de notre mode de coupe, mais l'importance de ce phénomène dans les autres modes de coupe du bois mérite de s'y intéresser.

L'hypothèse ainsi formulée est que déchiqueter du bois sec nécessite plus d'énergie que déchiqueter du bois humide. Je vais vérifier cette hypothèse en comparant des bois à 19 % d'humidité à des bois humides, respectivement à 43 % pour le hêtre et 56 % pour le sapin. L'humidité de 19 %, bois sec, correspond à des rondins qui ont séché naturellement en les stockant sous un hangar abrité. L'humidité de 43 % et 56 %, bois humide, pour le hêtre et sapin respectivement correspondent à l'humidité du bois lorsqu'il est fraichement abattu.

IV.2.3. *La source d'énergie*

La source d'énergie la plus utilisée est le moteur thermique. De nouvelles machines commencent à utiliser des moteurs électriques pour entrainer des rotors [Kaksonen, 2015]. Pour finir, certaines déchiqueteuses spécifiques utilisent des moteurs hydrauliques comme source d'énergie. Par contre, aucune étude n'a comparé ces différentes sources sur la performance énergétique. L'influence de la source d'énergie sur la performance énergétique de la déchiqueteuse est évaluée dans cette recherche. Ces sources décrites dans la partie II.5. sont utilisées pour évaluer la performance énergétique de la déchiqueteuse.

V. Conclusions

Nous avons vu dans ce chapitre tous les moyens, outils et matériels mis en œuvre dans le cadre de mon étude. La présentation a débuté par le choix du type de bois utilisé : des rondins de hêtre et de sapin de 2 m de long et d'un diamètre de 70 et 100 mm. Puis le produit réalisé et les outils permettant de caractériser ce produit sont décrits. Le fonctionnement, les déchiqueteuses à disque utilisées au cours de l'étude et leurs modifications sont présentés ensuite. Les différents outils de mesure de l'énergie de coupe et de l'énergie consommée par la déchiqueteuse ont fait l'objet d'une deuxième partie. Par ces mesures et par un traitement du signal adéquat, la méthodologie de détermination de la performance énergétique est détaillée. Pour finir, une partie présente les différents paramètres de coupe étudiés.

L’influence de certains paramètres de coupe sur la performance énergétique est étudiée dans le cadre d’un plan d’expérience et d’autres paramètres via des essais supplémentaires. Ces différentes méthodologies et axes de recherches servent à valider la pertinence et le choix judicieux de ce critère de performance énergétique. Ils serviront également à expliquer, étudier et comprendre les phénomènes qui interviennent au cours du déchiquetage afin de rendre les déchiqueteuses plus performantes énergétiquement.

Chapitre 4 :

Résultats

Ce chapitre présente la synthèse des résultats obtenus au travers des différents essais réalisés tout au long de cette thèse. Près de 300 rondins ont été déchiquetés afin de valider la méthodologie d'évaluation de la déchiqueteuse et pour définir les paramètres de coupe les plus importants à modifier. Ces résultats enrichissent nos connaissances dans le domaine du broyage. Une première partie présente les résultats obtenus au niveau de la coupe sur les efforts de la Performance Energétique de Coupe (PEC). Une deuxième partie présente les résultats de l'influence de différents paramètres de coupe sur la puissance à fournir à la déchiqueteuse. Ces informations sont importantes pour le dimensionnement énergétique de la déchiqueteuse. Une troisième partie présente les résultats obtenus de la Performance Energétique de la Déchiqueteuse pour une avance de rondin continue (PEDc). Ces résultats permettent d'optimiser la déchiqueteuse à disque et de définir les paramètres de coupe à prioriser pour l'amélioration de la performance énergétique des déchiqueteuses. Ces résultats montrent également les atouts du critère de performance énergétique choisi. Une comparaison entre la PEDc et la PEDd sur des essais dont l'avance du rondin est discontinue ainsi que la détermination d'un coefficient de conversion de l'énergie en kilowattheure en litre de carburant sont également détaillés dans cette partie. Pour finir, les résultats présentés au niveau du plan d'expérience ne donnent pas d'informations pour le hêtre car celui-ci a donné lieu à des bris de couteaux dont des explications sont détaillées en annexe 3.

I. Les efforts de coupe et la PEC

I.1. L'allure de l'effort de coupe

Cette partie présente l'ensemble des résultats obtenus concernant l'allure et la variation de l'effort de coupe et de la PEC en fonction de la configuration de la déchiqueteuse et du bois. Les limites de l'évaluation de la PEC sur notre déchiqueteuse sont détaillées dans cette partie après une recherche menée au niveau du contre couteau.

L'allure de l'effort de coupe est déterminée par la moyenne des impacts obtenus lors du déchiquetage d'un rondin pour chaque couteau. Comme les couteaux sont diamétralement opposés et non parfaitement identiques (figure 63), l'effort de coupe est étudié pour chaque couteau indépendamment l'un de l'autre. Pour vérifier que la durée de mesure est correcte, il est nécessaire de contrôler que l'effort de coupe se superpose parfaitement avec l'évolution de la largeur de coupe théorique du rondin pour tous les essais (figure n°62).

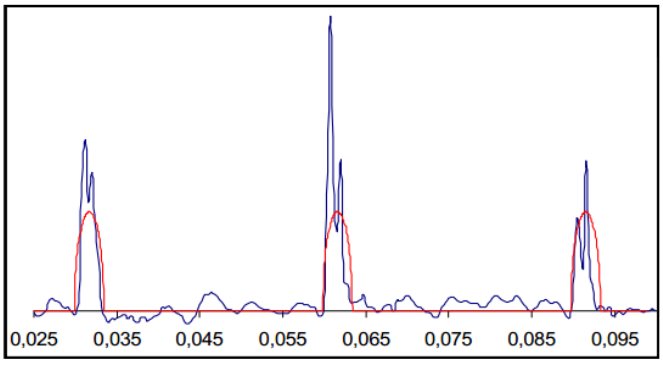


Figure 62 : Effort de coupe selon Abdallah [Abdallah, 2011]

L'allure de l'effort de coupe dans chaque couteau est illustrée sur la figure 63.

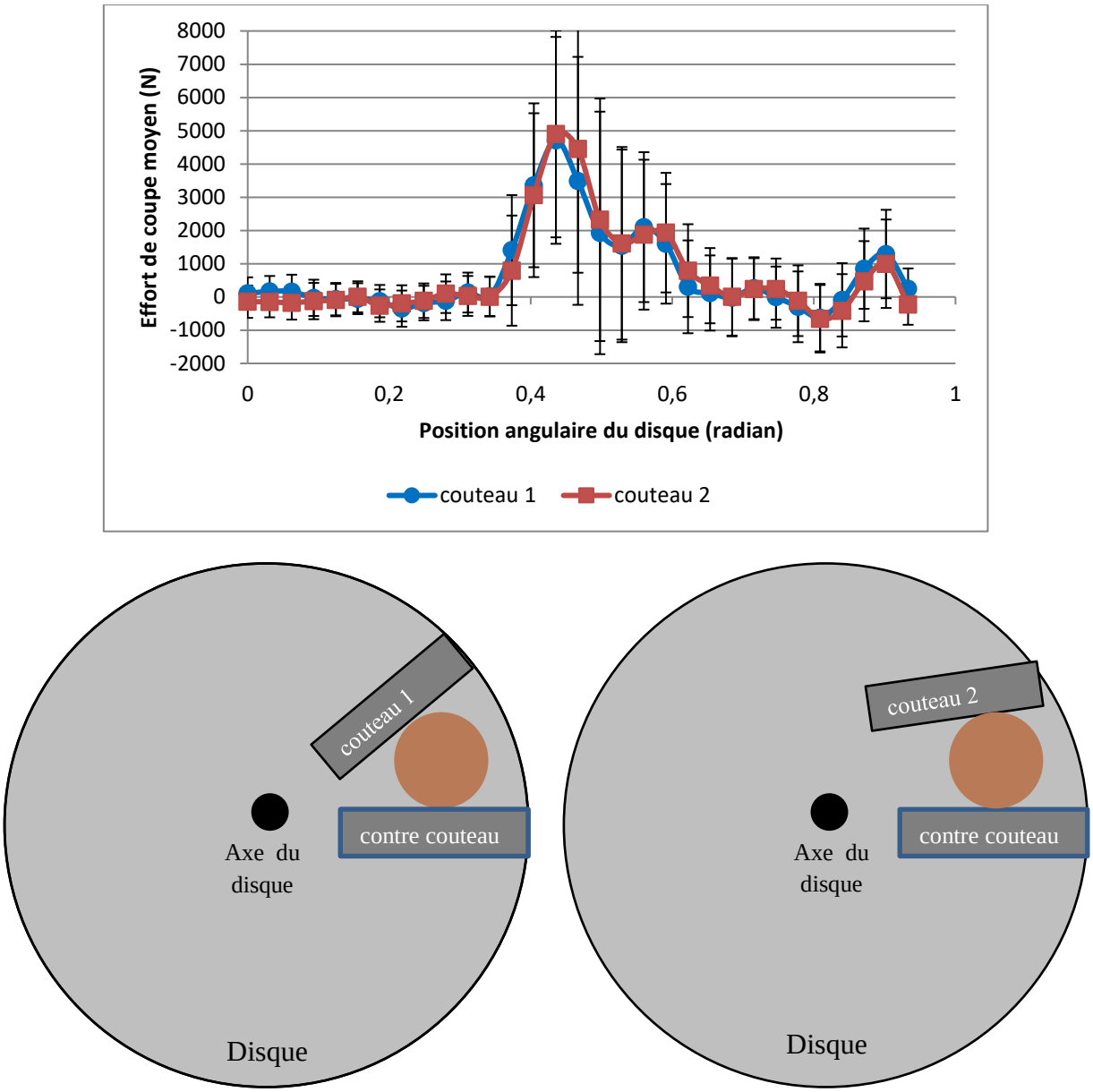


Figure 63 : Allure de l'effort moyen de coupe pour chaque couteau

Les efforts de coupe entre les deux couteaux sont quasiment identiques. L'écart type obtenu pour chaque couteau et en chaque point est faible hors de la zone de coupe et varie fortement dans la zone de coupe. Cette variation s'explique par le décalage temporel possible de l'impact. L'effort de coupe maximal obtenu sur la courbe est un point remarquable car il est utilisé par les concepteurs pour dimensionner la puissance de la source d'énergie utilisée pour mettre en rotation les arbres des déchiqueteuses et pour permettre la coupe du bois.

I.2. L'évolution de l'effort de coupe selon des paramètres significatifs de coupe

Après avoir présenté l'allure de l'effort de coupe et souligné l'intérêt de sa valeur maximale, je détermine l'influence de différents paramètres de coupe sur l'effort de coupe. Pour cela, le

plan d'expérience présenté dans le tableau 17 est appliqué sur la déchiqueteuse à disque B160 de marque Noremat. Les essais se sont portés sur les rondins de sapin de 2 m de long dont l'humidité moyenne est de 17% plus ou moins 2%. 5 rondins par configuration sont déchiquetés.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α	0°	0°	0°	0°	5°	5°	5°	5°	10°	10°	10°	10°
ρ	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°
V_c (m/s)	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35
f_z (mm/dent)	7	14	7	14	7	14	14	7	14	7	14	7
$Ø_{bois}$ (mm)	70	100	100	70	100	100	70	70	70	70	100	100

Tableau 17 : Table du plan d'expérience étudié

L'évolution de l'effort de coupe maximal en fonction des différentes configurations de coupe est illustrée sur la figure 64.

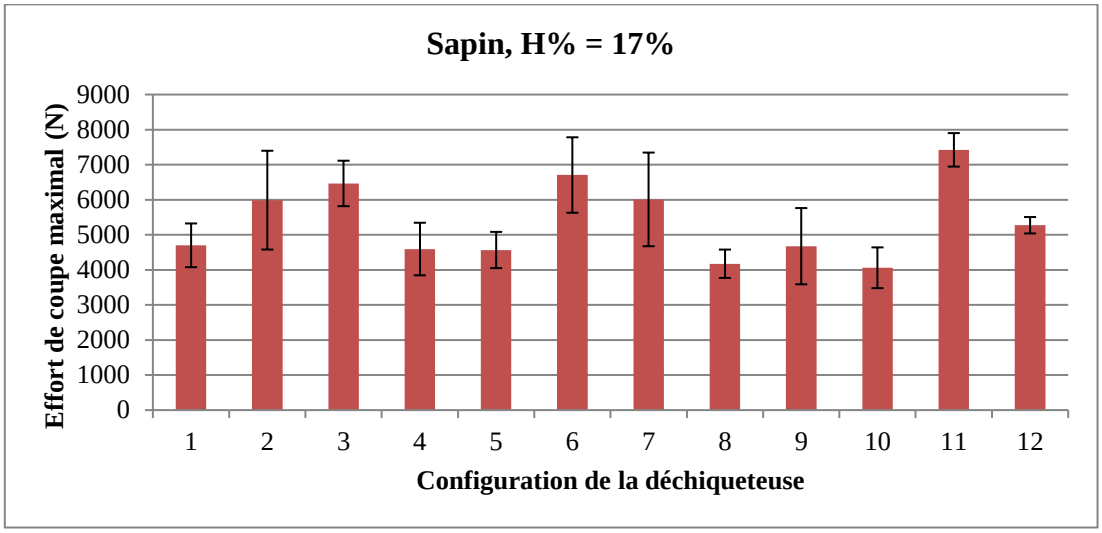


Figure 64 : Evolution de l'effort de coupe maximal selon la configuration de la déchiqueteuse

Nous constatons que l'écart type calculé à parti de l'effort de coupe pour 5 rondins déchiquetés est faible. Il est compris entre 230 et 1410 soit environ 1/7 de l'effort de coupe maximal pour chaque essai. Les essais possèdent une bonne reproductibilité.

Selon les configurations de la déchiqueteuse, l'effort de coupe maximal varie fortement entre 4080 et 7420 N, soit un écart de 55%. Ainsi, les paramètres étudiés ont bien une influence significative sur l'effort de coupe. L'influence de chaque paramètre sur l'effort de coupe est illustrée sur la figure 65.

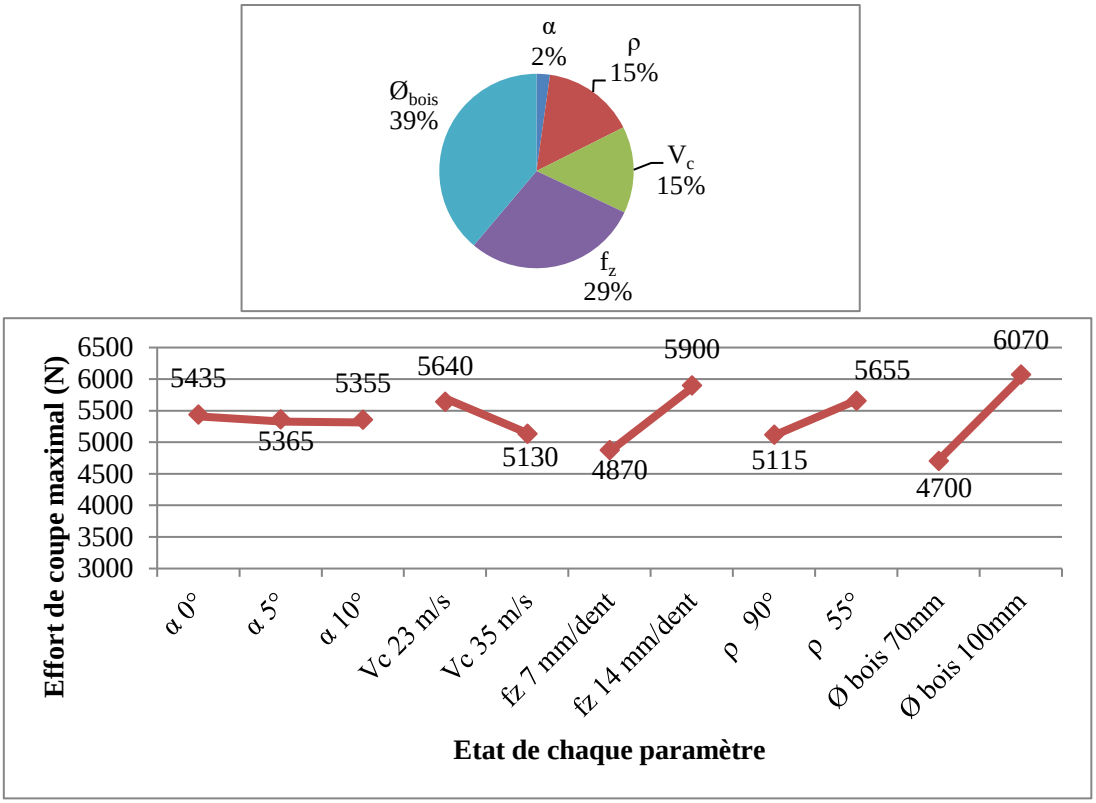


Figure 65 : Influence de chaque paramètre sur l'effort de coupe.

Modifier l'angle d'amenage en passant de 55° à 90° entraine la réduction des efforts maximaux de coupe de 5655 à 5115N. Ce phénomène s'explique par la largeur de coupe qui est plus importante pour un angle d'amenage de 55° que de 90° (figure 66). Cette augmentation de la largeur de coupe pour un angle d'amenage de 55° nécessite de fragmenter plus de bois, et par conséquent, requiert plus d'effort lors de la coupe. Ce phénomène explique également que l'augmentation du diamètre de 70 à 100 mm et donc de la largeur de coupe nécessite plus d'effort de coupe.

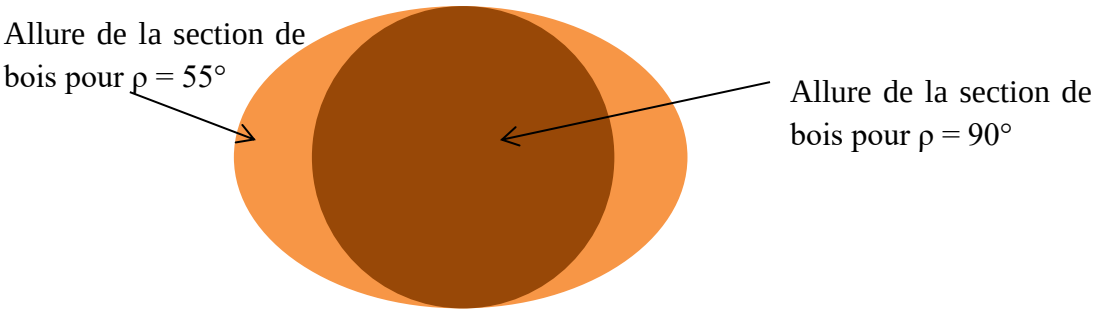
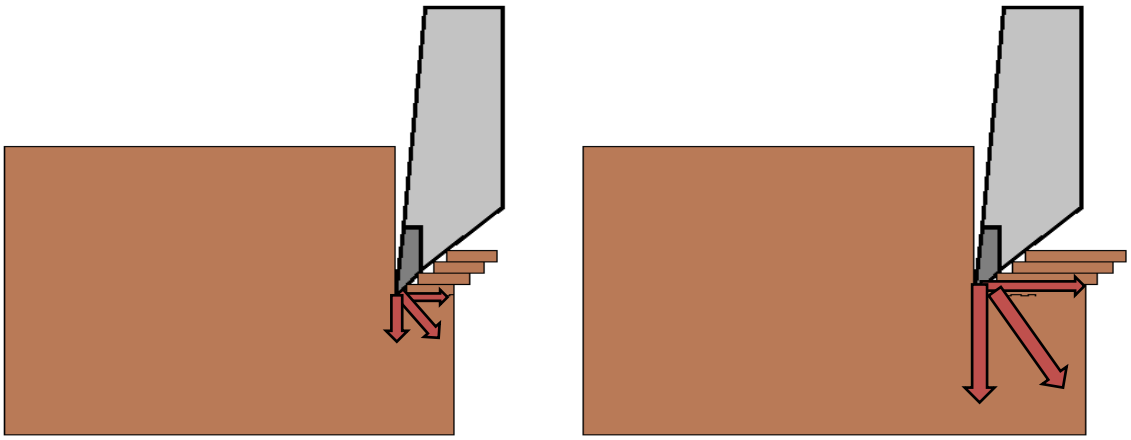


Figure 66 : Superposition de la section du rondin pour des angles d'amenage de 55° et 90° lors de la coupe

Augmenter l'avance par dent produit une plaquette plus longue (figure 67) ce qui consomme plus d'énergie pour propager les fissurations du couteau à la zone libre.



f_z de 7 mm/dent f_z de 14 mm/dent

Figure 67 : Mécanisme de coupe et efforts de coupe pour deux avances par dent

La distance de propagation est plus importante lorsque la plaquette est plus longue. Ainsi, la résistance au fendage est d'autant plus importante que la plaquette est longue et entraine donc à une augmentation des efforts de coupe.

Les résultats obtenus montrent que l'effort de coupe mesuré au niveau du contre couteau est bien cohérent avec les résultats attendus pour les différents paramètres de coupe testés. L'augmentation de la valeur des trois paramètres de coupe qui sont l'angle de dépouille, la vitesse de coupe et l'angle d'amenage réduisent les efforts de coupe tandis que l'avance par dent et le diamètre ont l'effet inverse. Les influences de la vitesse de coupe et de l'angle de dépouille sont plus détaillées lors de l'évaluation de la puissance de coupe. Ces essais sont exploités pour évaluer la PEC.

I.3. Influence de la hauteur du contre couteau sur la mesure de l'effort de coupe

Les recherches de Labbé et al. [Labbé, 2017] évaluent l'influence de la position verticale du contre couteau sur la mesure de l'effort de coupe maximal. Pour cela, trois positions verticales du contre couteau sont étudiées en réduisant à chaque fois l'écart horizontal entre le contre couteau et le rouleau ameneur inférieur (figure 68). Pour cela, une cale de 7 ou de 15 mm d'épaisseur est introduite sous le contre couteau afin de le surélever. L'effort maximal de coupe est obtenu par mesure de la déformation du contre couteau.

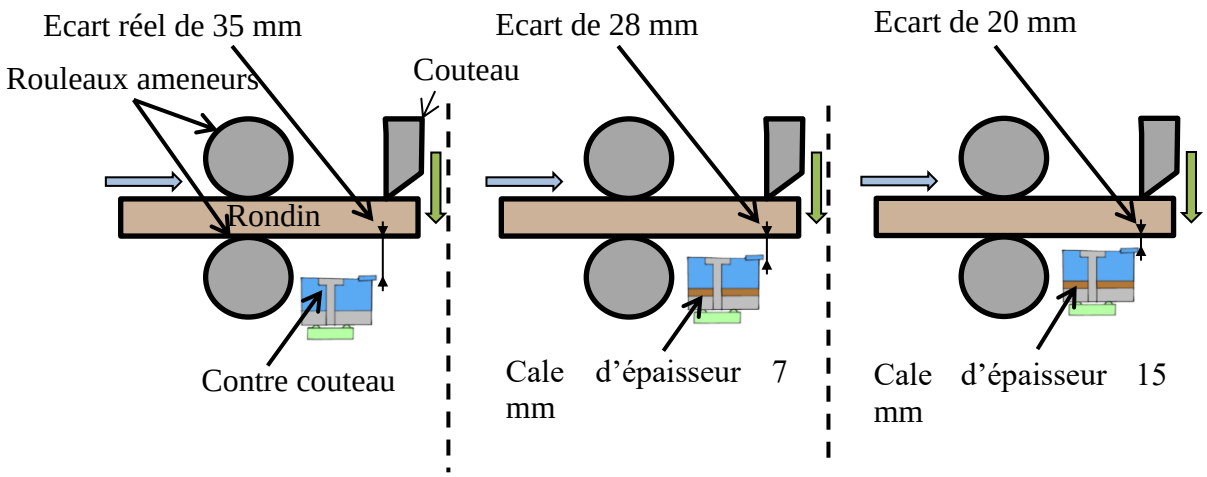


Figure 68 : Positionnement du contre couteau par rapport au rouleau ameneur pour chaque essai

En plus de la position verticale du contre couteau, l'influence de l'essence, du diamètre et de l'avance par dent sur l'effort maximal de coupe sont également étudiées. Le tableau n°18 donne les valeurs qui ont été choisies pour les diamètres des rondins et les avances par dent.

Essai	$Ø_{Bois}$	f_z
	mm	mm / dent
1	70	7
2	100	4
3	70	16
4	100	7

Tableau 18 : Valeur du $Ø_{Bois}$ et f_z pour chaque position verticale du contre couteau

Le choix de ces valeurs pour chaque essai découle d'une autre étude présentée en III.2.2. Deux rondins sont déchiquetés pour chaque essai. Ces quatre essais sont répétés pour chaque position verticale du contre couteau.

Les influences de l'essence, de l'avance par dent, du diamètre du rondin et de l'écart entre le contre couteau et le rondin sont représentées sur la figure 69.

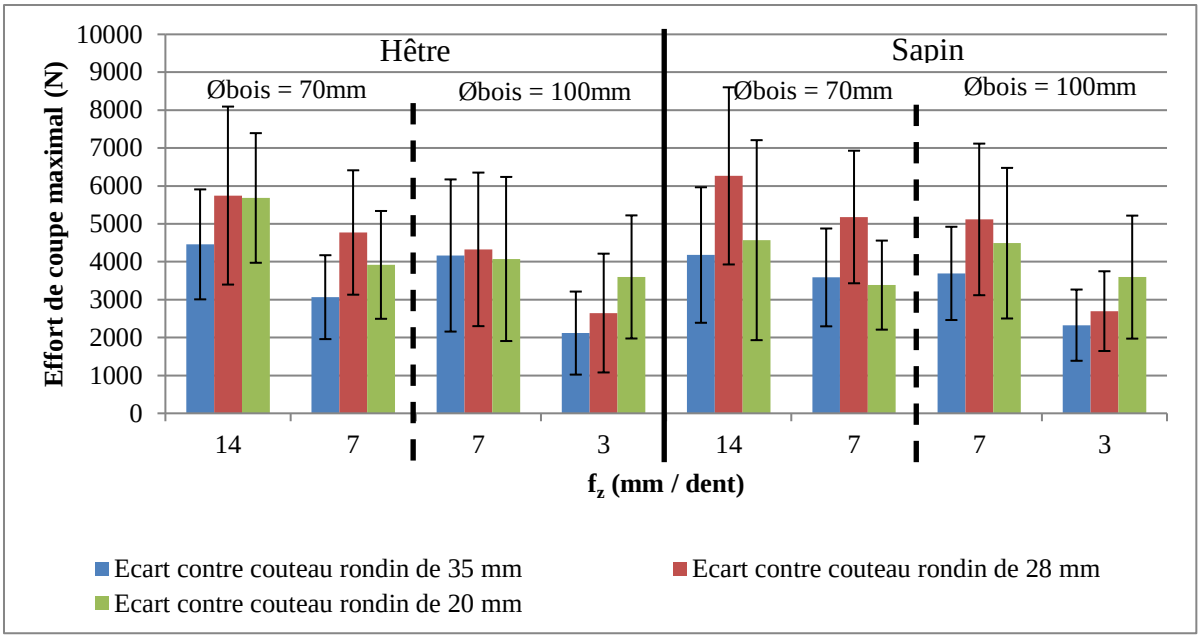


Figure 69 : Evolution de l'effort de coupe maximal en fonction de différents paramètres étudiés [Labbé, 2017]

Sur les quatre paramètres étudiés, l'avance par dent et la hauteur du contre couteau ont une influence significative sur l'effort de coupe maximal. L'augmentation de 50% de l'avance par dent ou la modification de la position verticale du contre couteau entraine une augmentation de l'effort de coupe maximal entre 10 et 50%. L'effort de coupe maximal varie lorsque l'écart entre le contre couteau et le rondin se réduit quels que soient l'essence, le diamètre du rondin et l'avance par dent. Si l'avance par dent augmente, l'effort de coupe maximal est plus important car la quantité de bois à déchiqueter pour chaque couteau est plus importante, ce qui nécessite un effort plus grand.

Cependant, l'effort de coupe maximal est quasiment identique quelle que soit l'essence de bois et le diamètre. Le hêtre dont la masse volumique est supérieure à celle du sapin devrait nécessiter plus d'effort de coupe. On peut émettre l'hypothèse que le hêtre est plus difficile à déformer que le sapin et qu'une trop grande distance entre le couteau et le contre couteau peut aboutir à une absence de contact entre le rondin et le contre couteau (cf. figure 70). Pour abonder dans le sens de cette hypothèse, le poids propre du rondin pour le hêtre s'oppose plus à la coupe en début qu'en fin de broyage, réduisant encore l'effort de coupe mesuré. Ainsi, comme l'écart entre le contre couteau et le bois n'est pas négligeable, le bois ne vient pas en contact avec le contre couteau et la mesure de l'impact n'a pas lieu ou est inférieure à la valeur réelle.

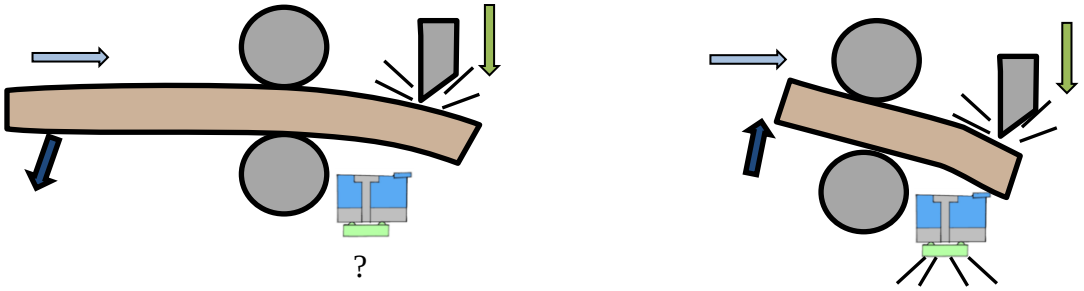


Figure 70 : Phénomène de non contact lors du déchiquetage, à gauche : début, à droite : fin de déchiquetage

C'est pourquoi la partie amenage a fait l'objet d'une modification en introduisant un rouleau ameneur supérieur et une poutre en « V » pour guider linéairement le bois (figure 37). Le contre couteau est également surélevé pour réduire l'écart entre le bois et le contre couteau à 20 mm (figure 71).

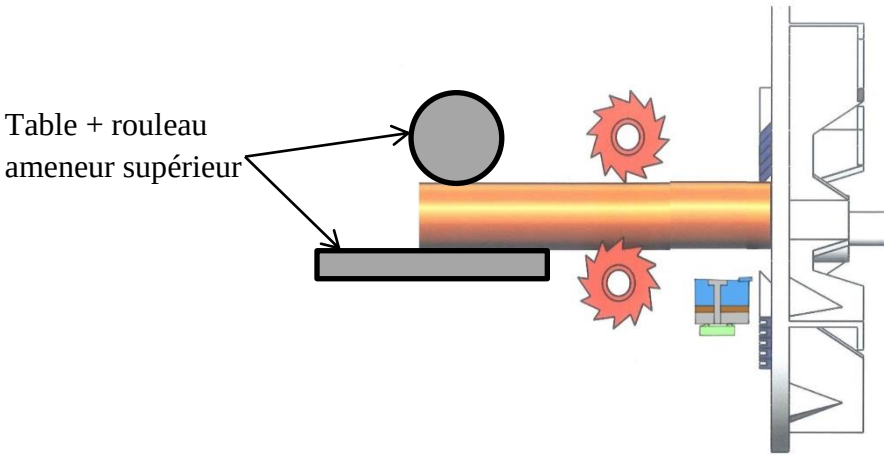


Figure 71 : Modification apportée sur la partie amenage de la déchiqueteuse

Avant de réaliser le plan d'expérience, l'importance de la position verticale du contre couteau est étudiée pour le déchiquetage du point de vue de l'effort mesuré par déformation du contre couteau. Nous avons constaté que le rondin ne venait pas toujours en contact avec le contre couteau pouvant ainsi modifier la valeur de l'effort de coupe. L'importance du contre couteau sur la granulométrie est étudiée dans la partie suivante.

I.4. L'influence du contre couteau sur la granulométrie.

Cette étude a pour but de vérifier que le contre couteau a bien son importance lors du cisaillement du bois pendant le déchiquetage. Cette recherche est décrite par Labbé et al. [Labbé, 2017]. Les résultats (figure 72) sur du sapin et du hêtre ont permis de mettre en évidence l'importance du contre couteau sur la granulométrie même si aucune déformation du contre couteau n'est mesurée.

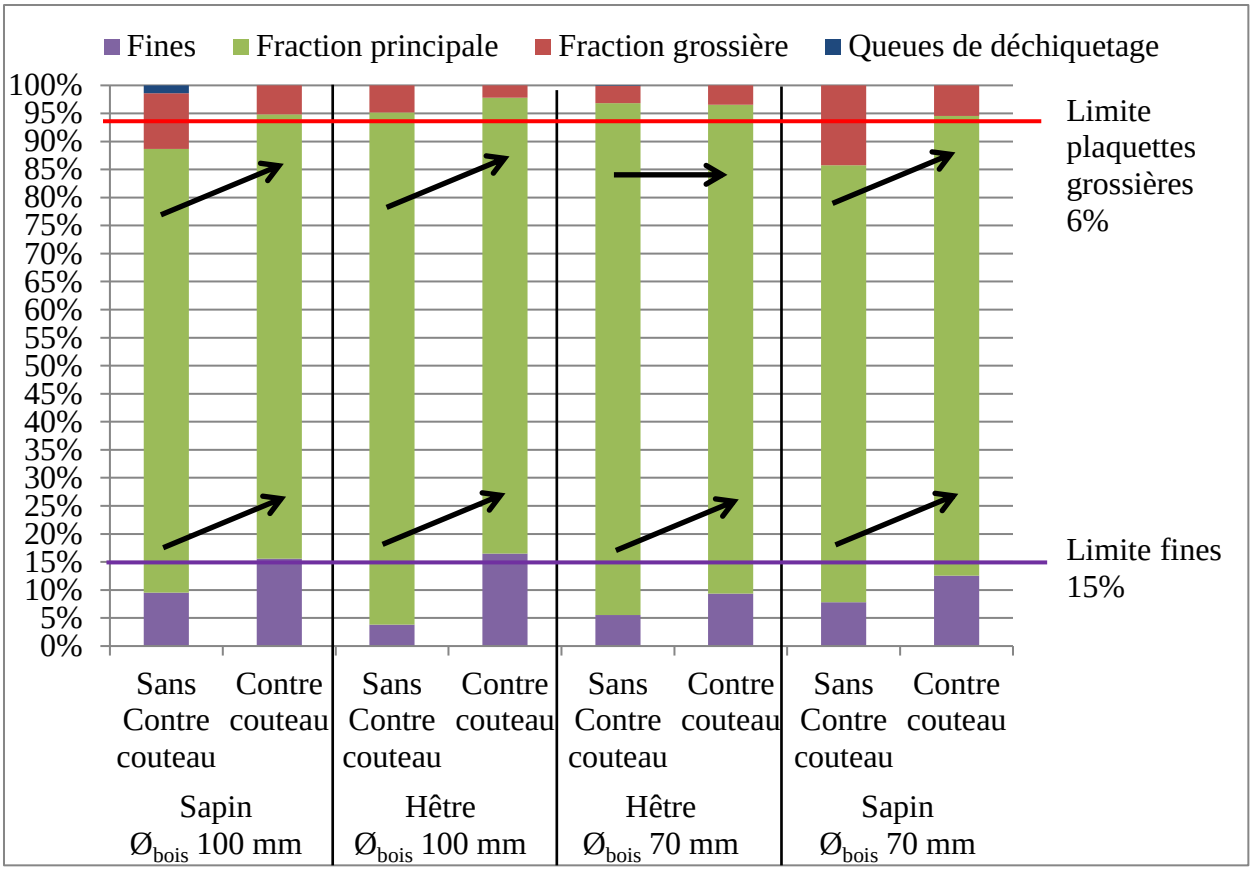


Figure 72 : Influence du contre couteau sur la granulométrie

Retirer le contre couteau entraine la production plus importante de fractions grossières et de queues de déchiquetage (Cf. figure 73). Ces particules de grandes dimensions ne sont pas souhaitables pour les chaudières à amenage automatique, et notamment incompatible avec la granulométrie P16.

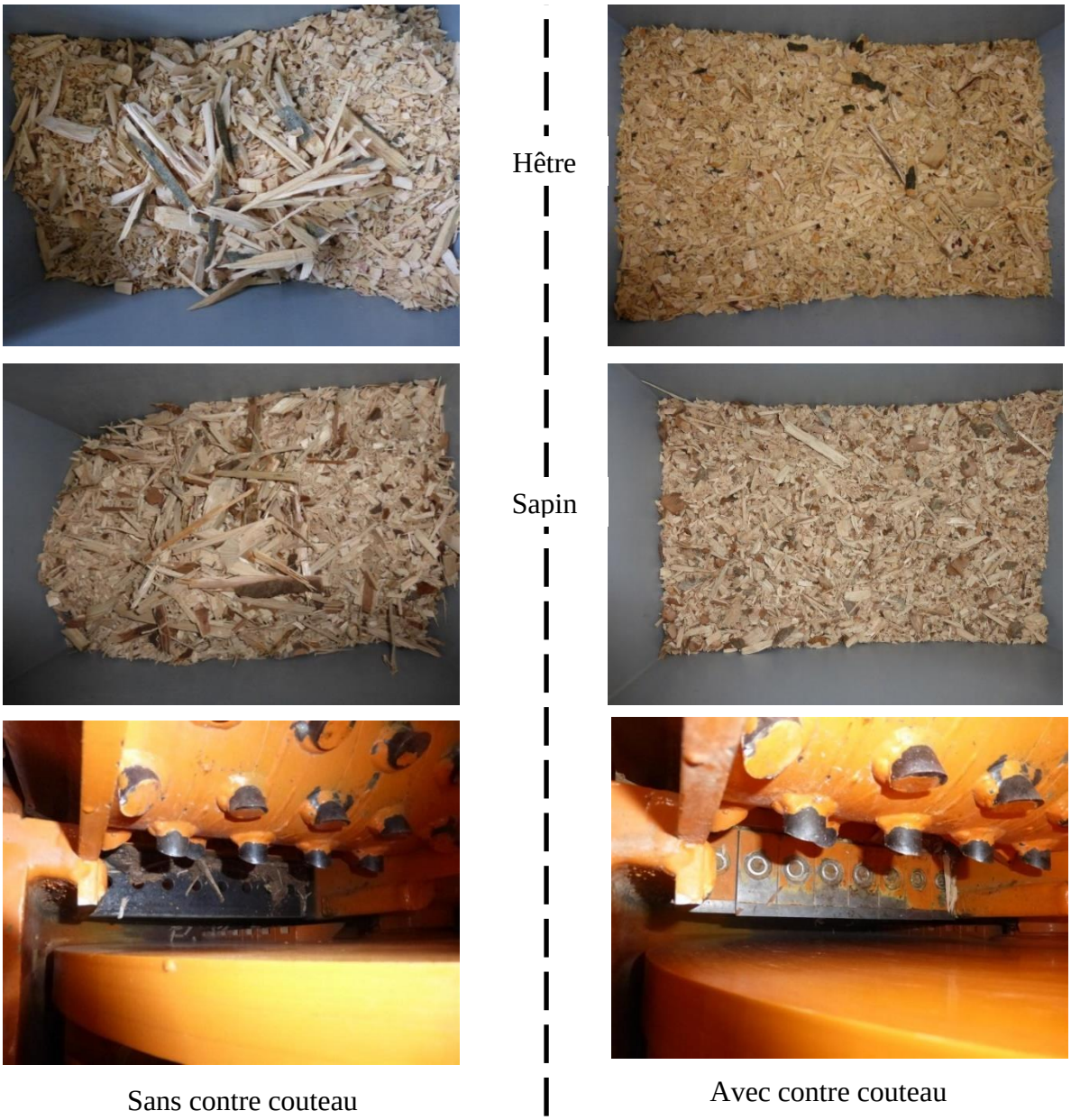


Figure 73 : Allure des plaquettes avec et sans contre couteau sur le hêtre et sapin

Nous avons vu ici que l'effort de coupe peut être mesuré au niveau du contre couteau et que les mesures obtenues sont cohérentes. Cependant, nous ne savons pas quelle est la qualité de l'information obtenue au niveau de la coupe par la mesure de l'effort de coupe maximal suite à l'influence de la position verticale du contre couteau. La PEC est comparée à la PEDc afin d'évaluer la précision de la mesure de l'effort de coupe.

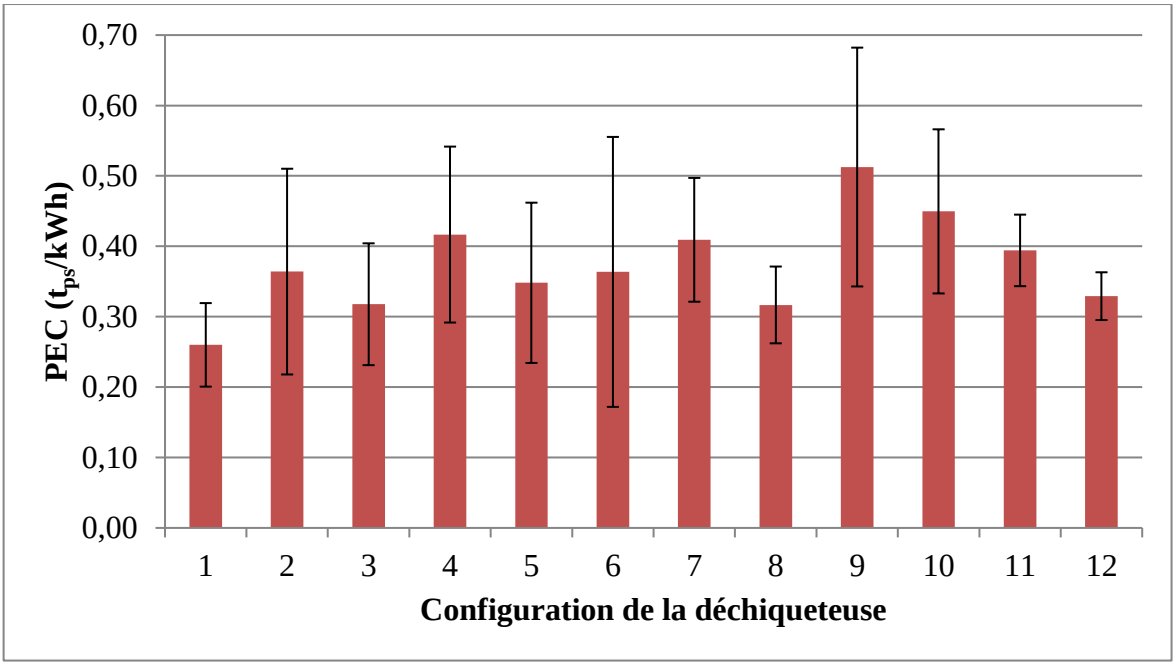
I.5. La PEC

Nous avons vu dans la partie de la mesure de l'effort de coupe que tous les impacts ne sont pas mesurés lors de la coupe. Ainsi, l'énergie de coupe calculée n'est qu'une partie de l'énergie de coupe totale.

Cependant, l'énergie de coupe mesurée et la masse de bois coupée correspondant à chaque impact sont facilement quantifiable. Le rapport de ces deux grandeurs donne la PEC pour chaque impact. En réalisant une moyenne de l'ensemble de ces valeurs sur un essai de déchiquetage, la PEC est calculée et est moins influencée par la position verticale du contre couteau.

La PEC est étudiée dans les mêmes conditions que dans la partie I.2. Le contre couteau est positionné pour obtenir un écart vertical entre le contre couteau et le rondin de 20 mm.

Les valeurs de la PEC obtenues pour chaque configuration de la déchiqueteuse sont rassemblées sur la figure 74.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α	0°	0°	0°	0°	5°	5°	5°	5°	10°	10°	10°	10°
ρ	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°
V_c (m/s)	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35
f_z (mm/dent)	7	14	7	14	7	14	14	7	14	7	14	7
$Ø_{bois}$ (mm)	70	100	100	70	100	100	70	70	70	70	100	100

Figure 74 : PEC selon la configuration de la déchiqueteuse

Les PEC sont comprises entre 0,26 t_{Ps}/kWh et 0,56 t_{Ps}/kWh. Ces valeurs sont bien supérieures aux valeurs de la littérature qui se trouvent au chapitre 2 et qui sont comprises entre 0,10 et 0,21 t_{Ps}/kWh. Ceci semble confirmer l'hypothèse précédemment énoncée indiquant que lors de la coupe, l'effort de coupe mesuré est sous-évalué. L'énergie de coupe en est minimisée et la PEC par conséquent plus élevée. Ces résultats montrent la difficulté d'évaluer la PEC sur notre système et nécessite donc d'utiliser la PEDc pour classer énergétiquement les déchiqueteuses. Les résultats entre la PEC et la PEDc sont comparés dans la partie III.3.

II. La puissance moyenne consommée lors du déchiquetage

En plus de l'étude sur l'effort de coupe, la puissance moyenne consommée par la déchiqueteuse fait l'objet d'une étude pour dimensionner la source d'énergie nécessaire pour déchiqueter le bois tout en réduisant les coûts de production des plaquettes qui en résultent. La puissance permet également de définir la performance énergétique de la déchiqueteuse. Nous étudions ici l'influence de divers paramètres sur la puissance consommée lors du déchiquetage.

II.1. L'influence de paramètres de coupe sur la puissance moyenne consommée

La puissance moyenne consommée est la puissance moyenne de toutes les puissances mesurées au cours d'un essai de déchiquetage d'un rondin dont la puissance moyenne à vide est retranchée (figure 75). En effet, la puissance à vide dépend de la vitesse de rotation du disque et l'influence de ce paramètre ne doit pas être prise en compte deux fois.

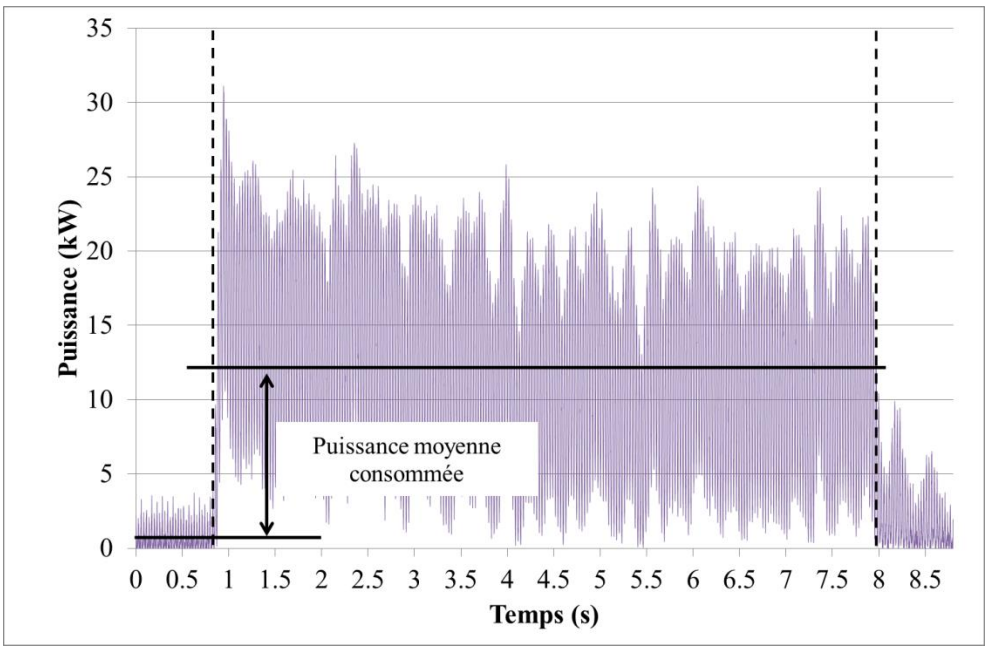
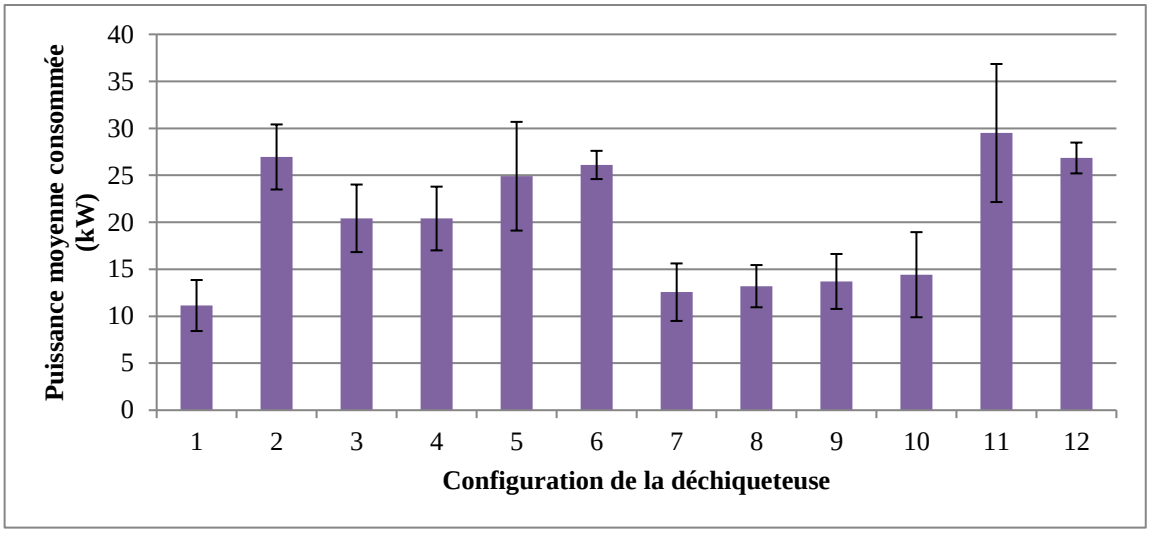


Figure 75 : Détermination de la puissance moyenne consommée lors d'un essai de déchiquetage d'un rondin

Les paramètres de coupe étudiés sont identiques à ceux de l'effort de coupe à savoir la vitesse de coupe, l'avance par dent, l'angle d'amenage et le diamètre du rondin. Le plan d'expérience est le même mais le résultat qui nous intéresse est la puissance consommée. L'évolution de la puissance moyenne consommée est illustrée sur la figure 76.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α	0°	0°	0°	0°	5°	5°	5°	5°	10°	10°	10°	10°
ρ	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°
V_c (m/s)	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35
f_z (mm/dent)	7	14	7	14	7	14	14	7	14	7	14	7
$Ø_{bois}$ (mm)	70	100	100	70	100	100	70	70	70	70	100	100

Figure 76 : Evolution de la puissance consommée en fonction de la configuration de la déchiqueteuse

La puissance moyenne consommée est fortement impactée par les différents paramètres de coupe. Selon la configuration de la déchiqueteuse, la puissance moyenne consommée varie de 11,1 à 29,5kW. L'influence des paramètres sur la puissance est illustrée sur la figure 77.

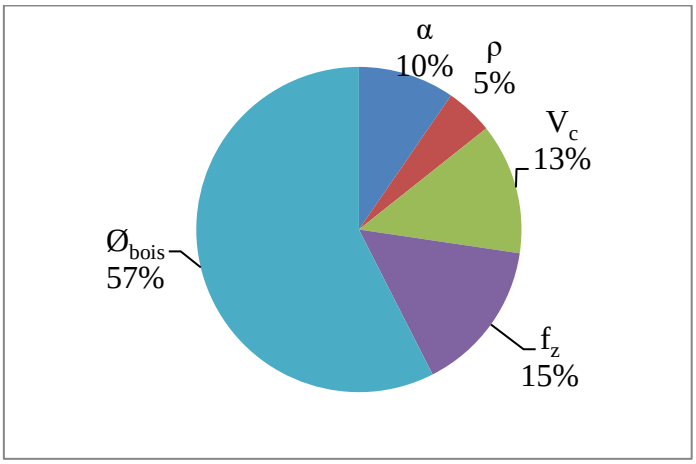


Figure 77 : Influence des paramètres de coupe sur la puissance moyenne consommée

Une augmentation des paramètres tels que la vitesse de coupe, l'avance par dent, l'angle de dépouille de 5 à 10° et le diamètre du rondin donnent une puissance moyenne consommée plus importante.

L'augmentation de l'angle de dépouille de 0° à 5° réduit l'effort de coupe maximal mesuré et semble identique lorsque l'on passe de 5° à 10°. Ce phénomène s'explique par deux

phénomènes. Le premier phénomène est, pour un angle de dépouille de 0°, que le couteau frotte le rondin créant un effort de frottement dans la même direction que l'effort de coupe que l'on mesure (figure 78). Lorsque l'angle de dépouille augmente, cet effort de frottement est réduit et l'effort de coupe mesuré est donc plus faible.

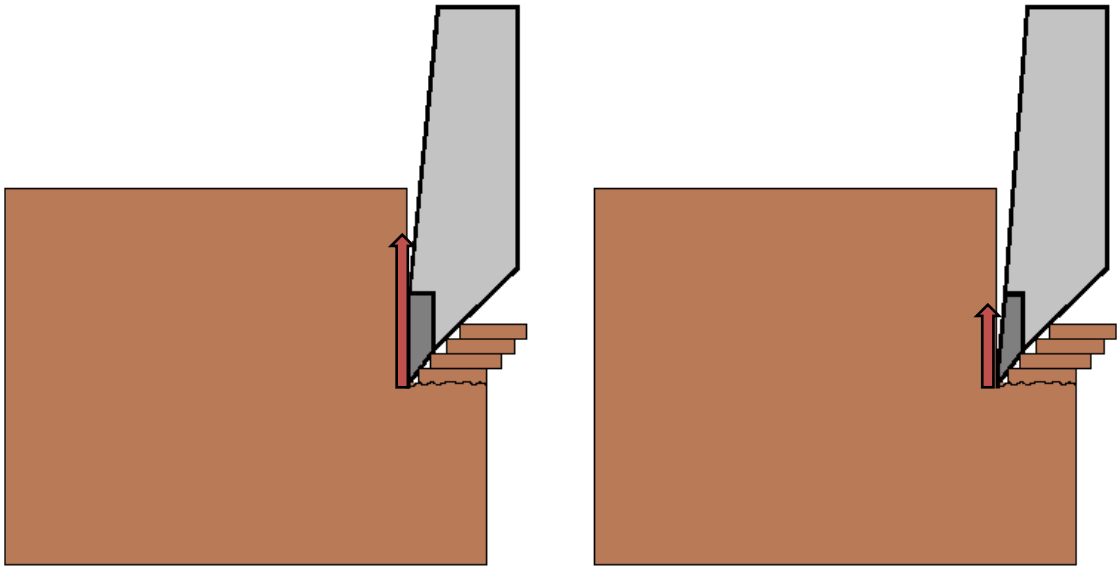


Figure 78 : Exemple des efforts de frottement en fonction de l'angle de dépouille

Cette affirmation est validée par la perte de peinture sur les couteaux (figure 79) après chaque déchiquetage. Après chaque essai, une peinture jaune est appliquée sur le disque, et une peinture orange sur les couteaux. Cette peinture a pour but de déterminer les frottements qui peut y avoir entre les couteaux et le bois et entre le disque et le bois lors du déchiquetage. Le choix d'utiliser différentes couleurs permet de visualiser facilement où le bois est venu toucher la partie coupe de la déchiqueteuse par la couleur des plaquettes. Le frottement est considéré important lorsque la peinture sur les couteaux a disparue en partie ou totalement. De plus, plus la peinture a disparu sur la longueur du couteau, plus le bois a frotté le couteau.

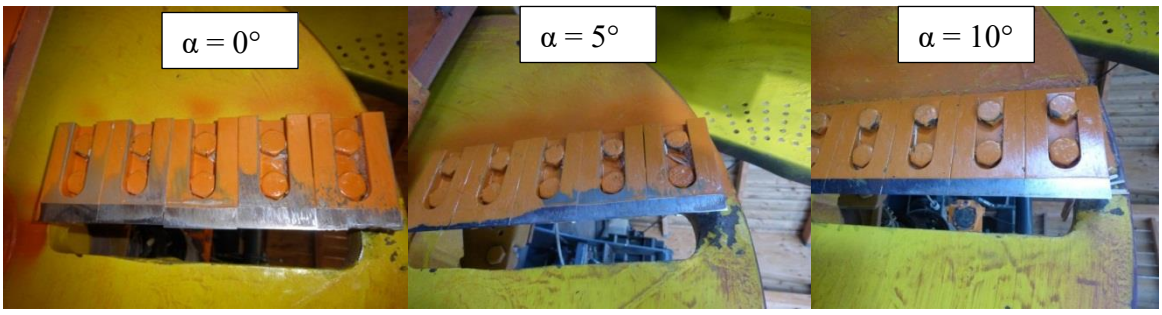


Figure 79 : Influence de l'angle de dépouille sur les frottements lors du déchiquetage

Sur la figure 79, le frottement est plus important pour l'angle de dépouille de 0° que dans le cas de l'angle de dépouille de 10°. Ceci montre bien que le bois frotte le couteau lors du déchiquetage entrainant ainsi des efforts de frottement plus importants.

Le deuxième phénomène est la modification de l'angle coupe suite au changement de l'angle de dépouille. Modifier l'angle de dépouille de 0 à 10° entraine la modification de l'angle de coupe de 40 à 30°, à angle de taillant constant. Cet angle de coupe modifie l'effort de coupe. Plus l'angle est faible, plus la composante normale au contre couteau de l'effort de coupe est importante pour un effort de coupe total identique. Pour rappel, nous ne mesurons que l'effort de coupe normal au contre couteau et non l'effort de coupe total. De plus, la réduction de l'angle de coupe amène le couteau à venir frapper la matière au lieu de la trancher (figure 80).

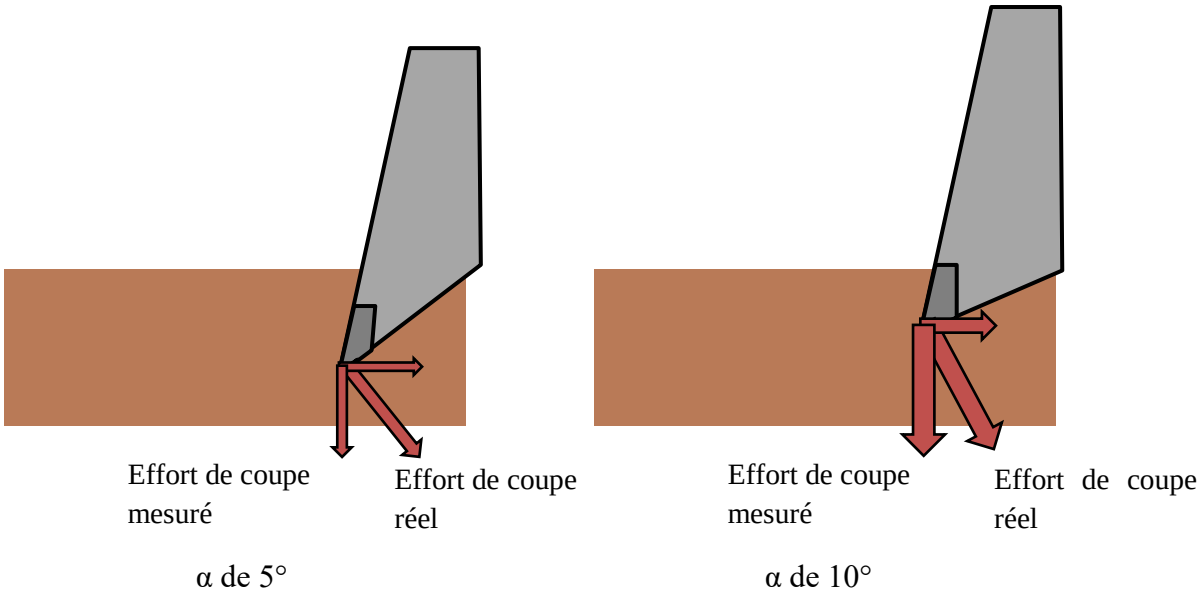


Figure 80 : Effet de la modification de l'angle de coupe sur la composante mesurée pour un effort de coupe réel

Le diamètre du bois est le paramètre qui influence à plus de 50 % la puissance moyenne consommée. Ce résultat est cohérent avec l'analyse qui est menée sur l'effort de coupe en partie I.3. Le diamètre a une influence importante sur l'effort de coupe, et par conséquent sur la puissance de coupe. Comme la puissance mesurée au niveau du cardan est composée en partie de la puissance de coupe, elle est donc fortement impactée par le diamètre du rondin.

Pour ce qui est de la vitesse de coupe, la puissance nécessaire à la coupe augmente de 10 % environs lorsque la vitesse de coupe augmente de 50%. Ceci traduit donc qu'une forte augmentation de la vitesse de coupe doit s'accompagner d'une diminution de l'effort de coupe comme il est constaté dans la partie I.3. (Figure 65).

Ces essais mettent en évidence l'influence de différents paramètres de coupe sur la puissance. Ils permettent d'apporter des connaissances supplémentaires sur la puissance à fournir pour broyer le bois.

II.2. L'influence de la source d'énergie sur la puissance consommée

Nous cherchons ici à évaluer l'influence de la source d'énergie sur la puissance consommée, ce qui n'est actuellement pas étudié dans la littérature. Les sources d'énergie utilisées sont le

moteur thermique, le moteur électrique et le moteur hydraulique car les deux premières sont les plus présentes sur les déchiqueteuses et la dernière est une possibilité.

La déchiqueteuse B160 est équipée des couteaux d'origine ($\alpha = 0°$, $\beta = 50°$ et $\gamma = 40°$) et est réglée à la vitesse de coupe de 24 m/s et une avance par dent de 6 mm / dent.

La déchiqueteuse est montée sur les trois sources d'énergie : moteur électrique de 45 kW, moteur hydraulique de 48 kW et moteur thermique de 66 kW (tableau 14). 5 rondins de sapin à l'humidité de 19% et de diamètre 70 mm et 100 mm sont déchiquetés sur chaque source d'énergie.

Les résultats de l'influence de la source de puissance sont illustrés sur le tableau 19.

Source d'énergie	$Ø_{Bois}$ mm	H% %	$m_{v\ bois}$ kg/m^3	f_z mm	Puissance moyenne consommée kW
Moteur électrique de 45 kW	65 [5]	23 [8]	515 [15]	6,1 [0,6]	**8,7 [1,4]**
	92 [4]	24 [8]	525 [40]	5,5 [0,2]	**17,6 [2,4]**
Moteur thermique de 66 kW	70 [6]	18 [1]	520 [45]	6,0 [0,7]	**10,0 [1,9]**
	93 [4]	19 [2]	520 [25]	5,5 [1,1]	**14,9 [3,0]**
Moteur hydraulique de 48 kW	74 [5]	18 [1]	480 [50]	5,4 [0,5]	**9,2 [1,1]**
	98 [4]	23 [5]	490 [30]	5,2 [0,5]	**14,8 [0,7]**
[ ] écart type					

Tableau 19 : Evolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la source d'énergie

La source d'énergie n'a donc pas d'influence sur la puissance moyenne consommée quelle que soit les rondins déchiquetés. L'écart maximum constaté au niveau de la puissance moyenne consommée est de 10%. Ces essais montrent que la source d'énergie de 45 kW est largement suffisante pour déchiqueter les bois d'un diamètre compris entre 70 et 100 mm.

Maintenant que la source d'énergie peut être dimensionnée à l'aide de la connaissance de la puissance moyenne consommée, il ne reste plus qu'à étudier la performance énergétique de la déchiqueteuse. L'évaluation de la PEDc s'inspire des travaux déjà réalisés au niveau de l'effort de coupe et de la puissance moyenne consommée.

III. L'évaluation de la PEDc en fonction des caractéristiques de la déchiqueteuse et du bois

Le dernier point abordé lors de notre étude est la détermination de la PEDc. Ce critère est utilisé pour évaluer les machines actuelles et futures. Comme beaucoup de paramètres ont une influence sur la performance énergétique, nous allons analyser par différentes études quelles sont les influences de chaque paramètre sur la PEDc. Les résultats obtenus constituent une

base pour l'amélioration des déchiqueteuses ou pour la normalisation des performances énergétiques des déchiqueteuses.

III.1. L'influence des paramètres de coupe

Nous avons étudié les mêmes paramètres de coupe que ceux évalués sur l'effort de coupe et la puissance consommée par la déchiqueteuse pour rappel les angles de dépouille et d'amenage, l'avance par dent, la vitesse de coupe et le diamètre du rondin.

Avant de discuter de la PEDc, la granulométrie est contrôlée pour les différents essais afin de s'assurer de la conformité d'une granulométrie de plaquette P16.

III.1.1. *Le critère de contrôle*

La granulométrie est réalisée sur deux échantillons représentatifs de plaquettes pour chaque essai. Les résultats de granulométrie obtenus sont rassemblés sur la figure 81.

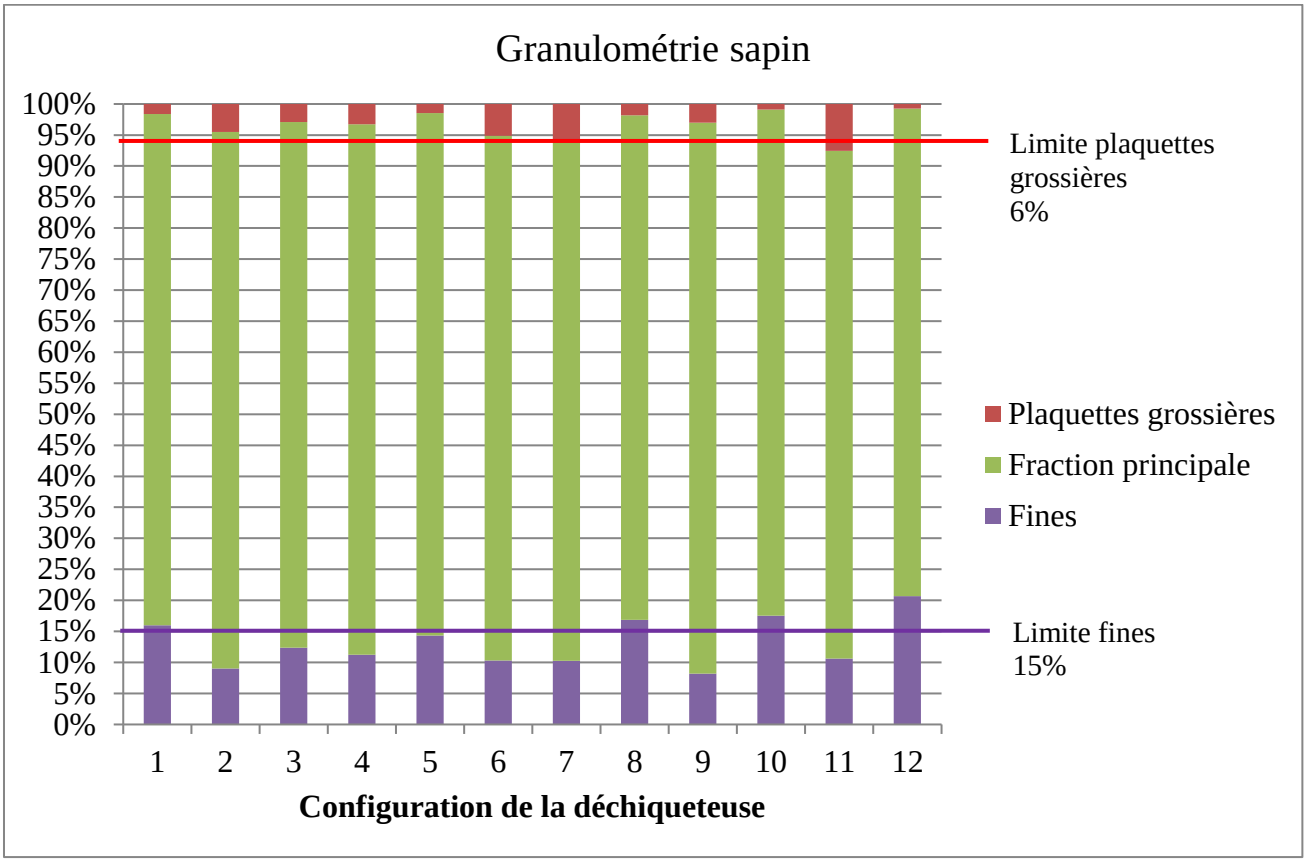
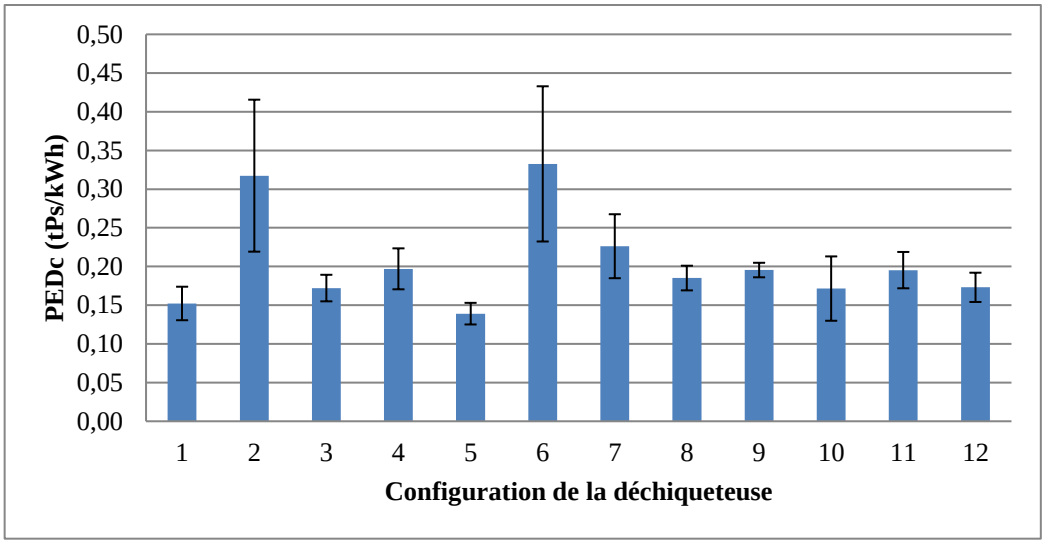


Figure 81 : Evolution de la granulométrie selon la configuration de la déchiqueteuse sur le sapin

Dans la majorité des configurations de la déchiqueteuse, la granulométrie des plaquettes est conforme à la qualification P16.

III.1.2. *Les résultats obtenus*

La performance énergétique selon la configuration de la déchiqueteuse est décrite sur la figure 82.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
α	0°	0°	0°	0°	5°	5°	5°	5°	10°	10°	10°	10°
ρ	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°	90°	90°	55°	55°
V_c (m/s)	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35	23	35
f_z (mm/dent)	7	14	7	14	7	14	14	7	14	7	14	7
$Ø_{bois}$ (mm)	70	100	100	70	100	100	70	70	70	70	100	100

Figure 82 : Evolution de la PEDc en fonction de la configuration de la déchiqueteuse sur le sapin

La PEDc selon la configuration de la déchiqueteuse varie du simple au double en fonction des paramètres machines choisis. Les paramètres de coupe étudiés et les niveaux choisis pour le plan d'expérience sont donc pertinents. L'influence de chaque paramètre sur la PEDc est décrite sur la figure 83.

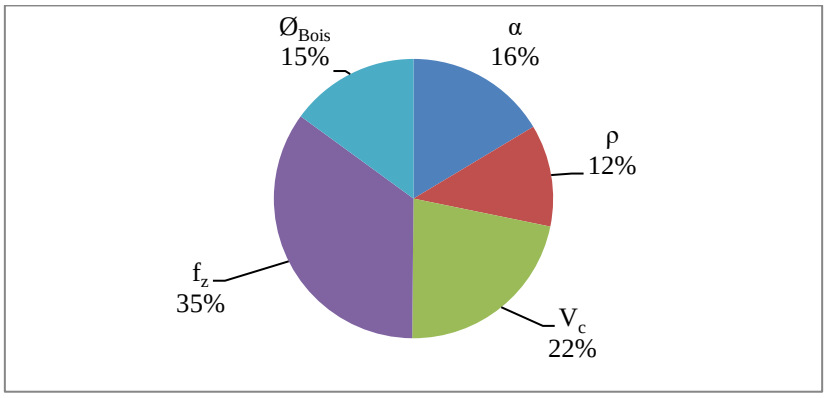


Figure 83 : Influence des paramètres de coupe sur la performance énergétique

Nous constatons que les paramètres les plus influents sont l'avance par dent, la vitesse de coupe et l'angle de dépouille avec respectivement 35%, 22% et 16 % d'influence. Suivant ces résultats, la déchiqueteuse est configurée de manière à optimiser la machine en PEDc. L'essai de confirmation du plan est présenté dans le tableau 20.

α	ρ	V_c m/s	fz mm/dent	$Ø_{bois}$ mm	PEDc t_{Ps}/kWh
5°	55°	35	14	100	0,31

Tableau 20 : Configuration optimisée de la déchiqueteuse en PEDc

L'essai de confirmation est quasiment identique à la configuration n°6 du plan d'expérience. Seul l'angle d'amenage est passé de 90° à 55°. La performance obtenue est identique à la PEDc de la configuration n°6, ce qui montre bien que l'angle d'amenage (ε) choisi a peu d'influence sur la performance énergétique.

Par contre, dans cette configuration optimisée pour la PEDc, la puissance moyenne consommée est de 24,4 kW soit une puissance moyenne consommée élevée. Ainsi, une PEDc élevée nécessite d'avoir une avance par dent et une puissance moyenne consommée élevées. Lorsque la vitesse de coupe ou l'avance par dent augmente, la PEDc est améliorée en dégradant la puissance. Par contre, lors de la modification de l'angle de dépouille du couteau, nous constatons une amélioration de la PEDc et de la puissance consommée indépendamment des autres paramètres testés.

III.2. Les essais complémentaires

En plus d'avoir évalué certains paramètres de coupe, ce critère de PEDc est évalué au travers d'essais complémentaires pour en déterminer sa pertinence. Nous avons vu dans le chapitre 2 qu'il est difficile de comparer les résultats obtenus pour chaque étude par manque d'informations sur le produit broyé. L'évolution de la PEDc selon l'essence, l'humidité et le diamètre du bois est étudiée ici. Nous évaluons également la corrélation entre le volume de bois déchiqueté, le diamètre du rondin et l'avance par dent pour la détermination de la PEDc.

III.2.1. *L'influence de l'essence, de l'humidité et du diamètre du rondin broyé*

Cette partie présente les essais réalisés pour définir l'influence de l'humidité, de l'essence et du diamètre du produit broyé sur la PEDc. Dans le cadre de cette étude, la déchiqueteuse B180 mise en rotation par le moteur électrique de 45kW, déchiquette des rondins en sapin et en hêtre de diamètre 70 et 100mm et de longueur 2 m. Ces rondins sont humides (fraichement abattus) et secs (stockés pendant 4 mois). L'humidité sur brut pour le sapin sec et le sapin humide sont respectivement de 19 et 56 %, alors qu'elles sont respectivement de 36 et 43% pour le hêtre sec et le hêtre humide. La vitesse de coupe est de 23 m/s pour une avance par dent de 7 mm / dent. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 84.

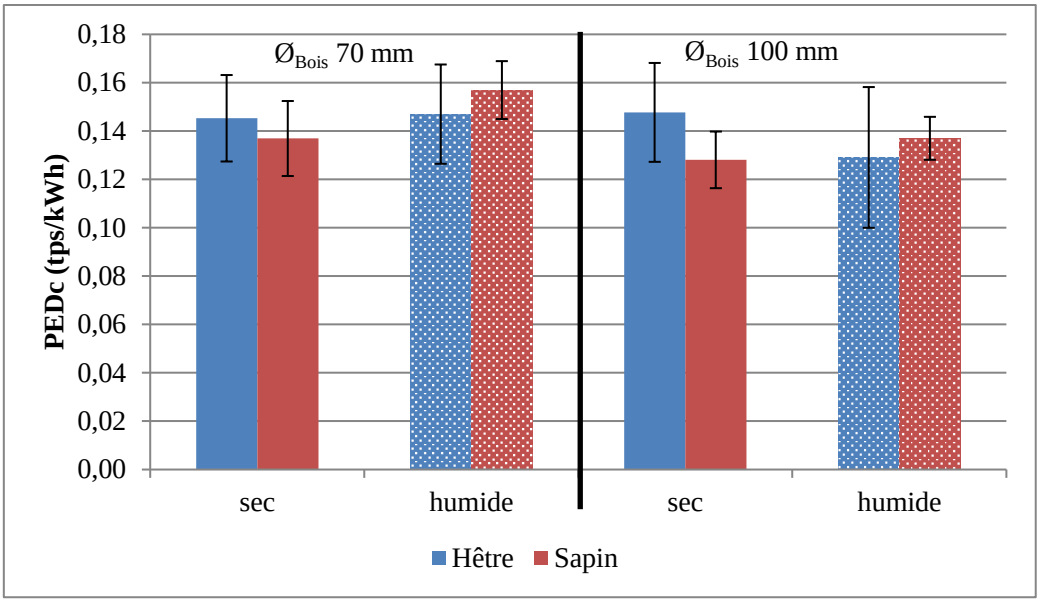


Figure 84 : Evolution de la PEDc en fonction du diamètre, humidité et essence du rondin

Nous constatons qu'aucun de ces paramètres du bois n'a une influence significative sur la PEDc. Tout d'abord, passer des rondins de hêtre au rondin de sapin réduit la PEDc de 10% environ alors que l'écart des masses volumique est de 17% pour le bois humide et 50% pour le bois sec. La masse volumique du sapin à 56% et 19% d'humidité est de 960 et 535 kg/m^3 respectivement et la masse volumique pour le hêtre à 43% et 36% est de 1150 et 1005 kg/m^3 respectivement. Ces résultats sont contradictoires aux résultats présents dans la littérature [Spinelli, 2012a], [Di Fulvio, 2015]. Cette contradiction provient du choix du critère de mesure de la performance énergétique et de la configuration de la déchiqueteuse. Exprimer la quantité de plaquettes produites en t_{Ps} permet de diminuer les écarts de performance liés à l'humidité et à la masse volumique de l'essence broyée. En effet, broyer un bois dont la masse volumique est plus élevée nécessite plus d'énergie mais la masse de plaquettes produites est plus élevée dans ces conditions. De plus, la performance énergétique dans notre étude est évaluée uniquement lors du déchiquetage de rondins et sans tenir compte des arrêts d'avance de celui-ci, ce qui n'est pas le cas des études de la littérature [Spinelli, 2012b, 2013], [Assirelli, 2013], [Pochi, 2015]. Enfin, la matière broyée est très homogène et on suppose que la déchiqueteuse est assez puissante pour broyer sans que la vitesse de rotation du disque diminue et que l'avance du rondin est continue. Pour le diamètre du rondin, les écarts de performance énergétique sont de 8% pour une variation du diamètre de 30% quelle que soit l'essence. Les résultats du paragraphe III.1.2. où le diamètre du rondin a une faible influence par rapport à l'avance par dent et la vitesse de coupe sont cohérents avec ces résultats.

Au niveau de l'humidité, nous avons deux résultats différents pour le sapin et le hêtre. Pour le sapin, le passage de 19 à 56 % d'humidité sur brute permet d'augmenter la PEDc de 10%. Pour le hêtre, passer de 36 à 43% n'a pas d'influence sur la PEDc et le résultat est proche de Pochi et al. [Pochi, 2015]. Ceci s'explique par le fait que l'humidité pour le hêtre est supérieure à 20%, valeur où le point de saturation des fibres n'est pas dépassé. On constate que déchiqueter du bois fraichement abattu permet de consommer moins d'énergie lors du déchiquetage.

Ces essais mettent en évidence que la méthodologie d'évaluation de la PEDc développée permet d'évaluer la performance énergétique quelle que soit les caractéristiques du rondin. Le critère proposé peut ainsi être utilisé lors d'une normalisation de la méthodologie d'évaluation des performances énergétiques des déchiqueteuses.

III.2.2. *L'influence de l'avance par dent et du diamètre du rondin pour une quantité de bois déchiqueté identique*

Nous souhaitons voir dans cette partie s'il est possible d'évaluer la performance énergétique en remplaçant les deux paramètres avance par dent et diamètre de rondin par le paramètre volume de bois déchiqueté. Dans la partie III.1.2., l'avance par dent et le diamètre ont une influence sur la PEDc. Cependant, aucune donnée ne permet de dire si la PEDc est identique pour un même volume de bois déchiqueté mais pour différentes avances par dent et diamètres du rondin.

Les essais se sont déroulés sur la déchiqueteuse B180 dont la source d'énergie est le moteur électrique de 45 kW. Les couteaux d'origine ($\alpha = 0°$, $\beta = 50°$, $\gamma = 40°$) sont fixés sur la déchiqueteuse et la vitesse de coupe est réglée à 25 m/s. Des rondins de sapin H = 30% et hêtre H = 54% de 2 m sont utilisés pour les essais. Les réglages de la quantité de bois déchiqueté en fonction de l'avance par dent et du diamètre du rondin sont décrits dans le tableau 21.

Quantité de bois déchiqueté	**$Ø_{Bois}$**	**f_z**
cm^3 / dent	mm	mm / dent
28	70	7
28	100	4
56	70	16
56	100	7

Tableau 21 : Détermination de la quantité de bois déchiqueté en fonction de f_z et $Ø_{Bois}$

Une répétition de déchiquetage de six rondins pour chaque configuration et essence est réalisée. Les résultats de la variation de la PEDc en fonction de la configuration de la déchiqueteuse sont présentés sur la figure 85.

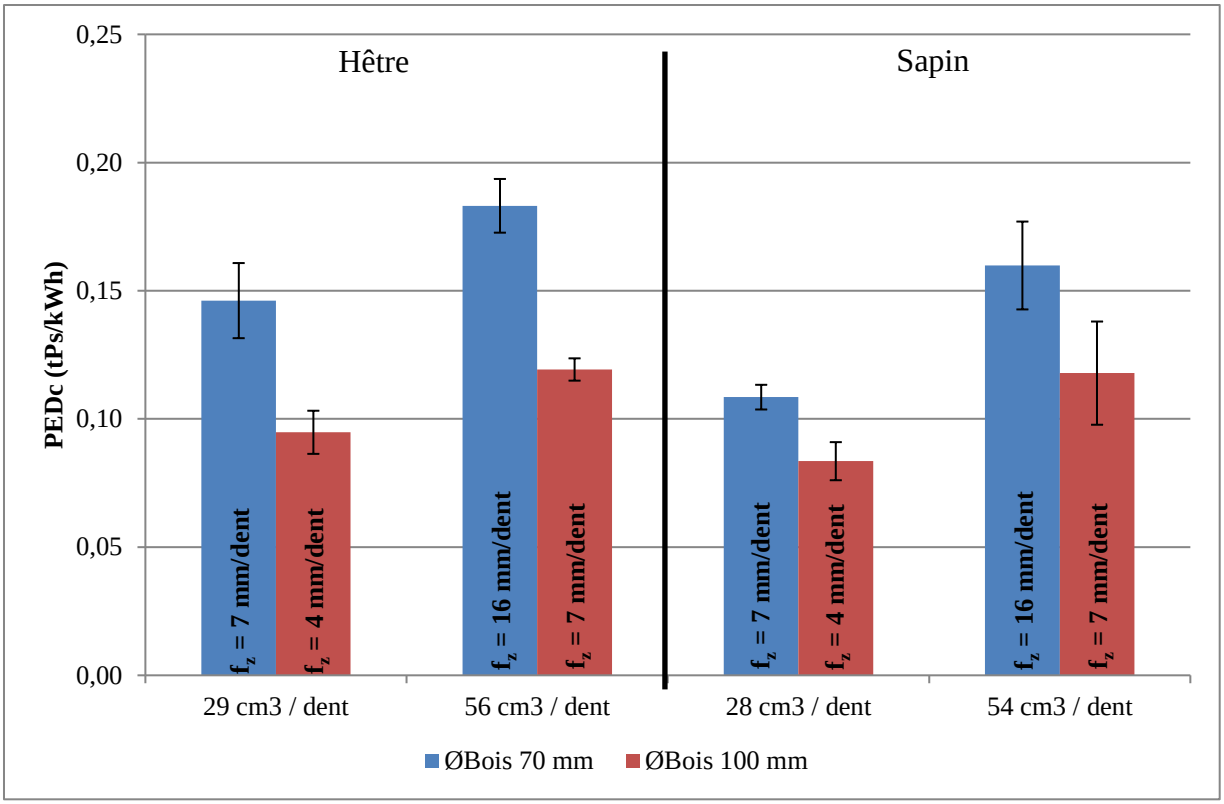


Figure 85 : Evolution de la PEDc selon le diamètre du bois et l'avance par dent

Ces essais mettent en évidence que la PEDc varie en fonction de l'avance par dent même si la quantité de bois déchiqueté est identique. Ceci s'explique par l'influence de l'avance par dent plus importante que celle du diamètre du rondin (figure 83). L'augmentation de l'avance par dent de 50% entraine une augmentation de la performance énergétique de 30% pour le sapin et 50% pour le hêtre. Cet essai montre aussi que la quantité de bois déchiqueté a également une influence sur la performance énergétique où l'augmentation de la quantité de bois déchiqueté de 50% entraine une augmentation de 40% de performance énergétique sur le sapin. Ce résultat s'explique par l'influence de l'avance par dent très significative sur la performance énergétique utilisée dans le calcul de la quantité de bois déchiqueté. Nous constatons que pour un même volume de bois qu'il n'est pas possible de faire le lien entre la PEDc et la quantité de bois déchiqueté.

III.2.3. *L'influence de la source d'énergie*

Comme pour la puissance, nous avons regardé l'influence de la source d'énergie sur la PEDc. Les conditions sont les mêmes qu'utilisées lors de la détermination de la puissance moyenne consommée. La déchiqueteuse B160 est équipée des couteaux d'origine ($\alpha = 0°$, $\beta = 50°$ et $\gamma = 40°$) et est réglée à la vitesse de coupe de 24 m/s et une avance par dent de 6 mm / dent. Des rondins de 2 m de sapin à 20% d'humidité et de diamètre 70 et 100 mm sont utilisés pour ces essais.

La déchiqueteuse est montée sur les trois sources d'énergie : moteur électrique de 45 kW, moteur hydraulique de 48 kW et moteur thermique de 66 kW. 5 rondins de diamètre 70 mm et 100 mm sont déchiquetés pour chaque source d'énergie.

Les résultats de l'influence de la source de puissance sont illustrés sur le tableau 22.

Source d'énergie	Ørondin Mm	H% %	$m_{v\ bois}$ kg/m^3	f_z mm	PEDc t_{Ps}/kWh
Moteur électrique de 45 kW	65 [5]	23 [8]	515 [15]	6,1 [0,6]	**0,14 [0,01]**
	92 [4]	24 [8]	525 [40]	5,5 [0,2]	**0,13 [0,01]**
Moteur thermique de 66 kW	70 [6]	18 [1]	520 [45]	6,0 [0,7]	**0,13 [0,02]**
	93 [4]	19 [2]	520 [25]	5,5 [1,1]	**0,14 [0,005]**
Moteur hydraulique de 48 kW	74 [5]	18 [1]	480 [50]	5,4 [0,5]	**0,13 [0,003]**
	98 [4]	23 [5]	490 [30]	5,2 [0,5]	**0,13 [0,004]**

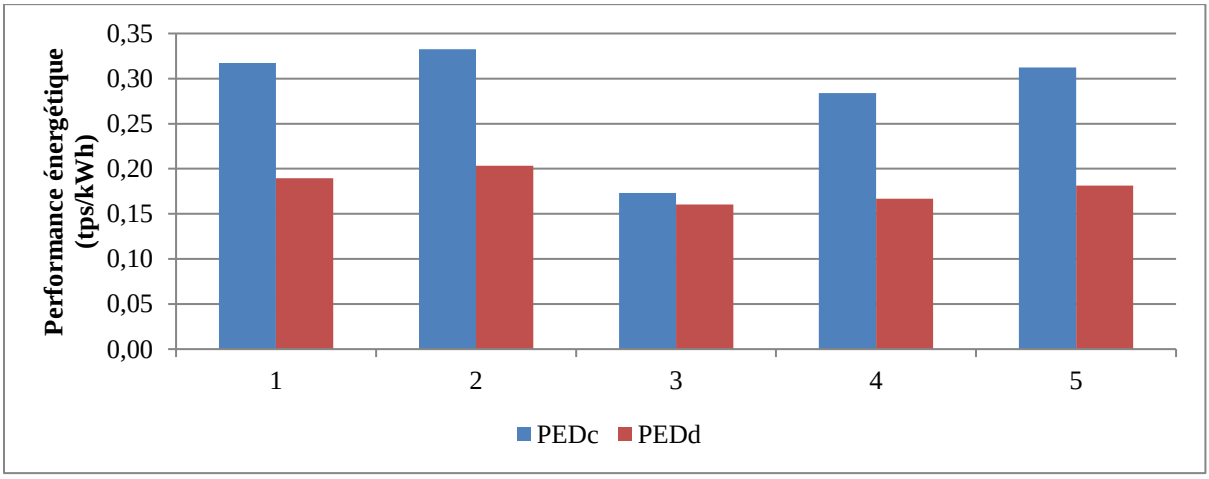
[ ] écart type

Tableau 22 : Influence de la source de puissance sur la PEDc

La source d'énergie n'a que peu d'influence sur la PEDc. Cela veut dire que si le système est bien dimensionné en puissance quelle que soit la source d'énergie, la PEDc est identique.

III.2.4. *Influence de l'anti stress*

Nous avons jusqu'à présent déterminé la PEDc. Au cours de certains essais, le système anti stress s'est déclenché. Pour rappel, ce système de sécurité permet d'éviter un blocage du disque sur le bois en stoppant l'avance du bois lorsque la vitesse de rotation du disque est trop faible. Pour ces essais, les PEDc et PEDd sont déterminées et comparées entre elles. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 86.



	1	2	3	4	5
α	0°	5°	10°	5°	5°
ρ	55°	90°	55°	90°	55°
V_c (m/s)	35	35	35	35	35
f_z (mm/dent)	14	14	7	14	14
$Ø_{bois}$ (mm)	70	100	100	100	100

Figure 86 : Ecart entre la PEDc et réelle pour différents essais sur le sapin et hêtre

Nous constatons sur ces essais que l'utilisation de l'anti stress peut détériorer la performance énergétique de 40%. Le déclenchement a lieu lorsque la puissance moyenne consommée est supérieure à la puissance que peut fournir la source d'énergie. Ce système explique le choix de définir la PEDc plutôt que la PEDd. Si la source d'énergie est suffisante, le déchiquetage se déroule de manière continue et la PEDd est égale à la PEDc.

III.3. La comparaison entre la PEC et la PEDc

J'effectue ici le rapport entre la PEC et la PEDc pour comparer et déterminer le décalage qui existe entre les deux méthodes. L'influence de certains paramètres sur l'écart entre la PEC et PEDc est également mis en évidence dans cette partie.

Pour la détermination des PEDc et PEC, le calcul se base sur la même masse de bois qui est déchiquetée au cours de l'essai. Pour cela, l'énergie de coupe et l'énergie de la déchiqueteuse sont mesurées directement et le rapport de ces deux énergies est calculé. Ces comparaisons sont réalisées pour différentes positions verticales du contre couteau, deux essences, plusieurs avances par dent et différents diamètres de rondin. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 87.

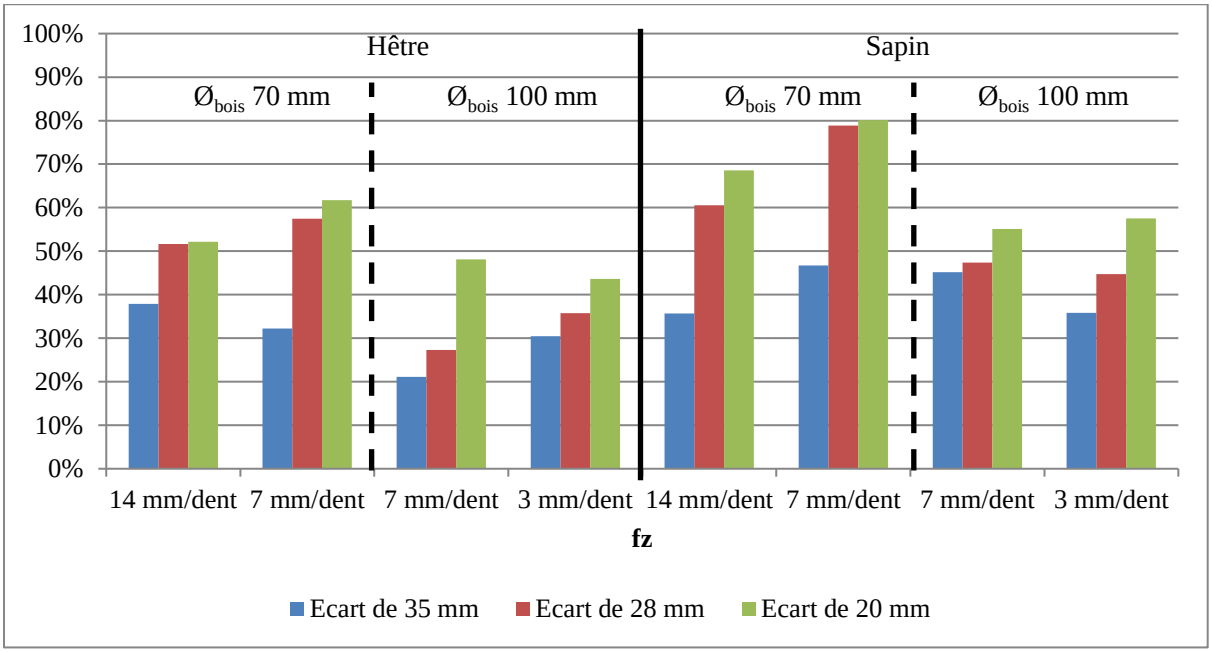


Figure 87 : Evolution du rapport énergie de coupe sur énergie nette en fonction de la hauteur du contre couteau

Cette figure montre que l'écart entre l'énergie de coupe et l'énergie nette augmente lorsque l'écart entre le contre couteau et le bois augmente. Ceci signifie que l'énergie de coupe mesurée au niveau du contre couteau est plus élevée lorsque le contre couteau est au plus proche du rondin. De plus, l'essence et le diamètre ont également une influence sur l'écart entre la PEC et la PEDc. L'absence de contact du bois sur le contre couteau lors de la mesure de l'effort de coupe qui a été évoquée dans la partie I.3. en est la cause.

Par ces mesures de l'énergie et de l'influence du contre couteau, nous constatons que la détermination de la PEC peut varier selon la position verticale du contre couteau, ainsi que selon le diamètre et l'essence du bois broyé. Ces résultats sont contradictoires avec les résultats obtenus en partie III. Ceci confirme bien que la mesure de l'effort de coupe à partir de la déformation du contre couteau est délicate et ne permet pas de mesurer en totalité l'énergie restituée au niveau de la coupe. Ainsi, il va être difficile d'évaluer les déchiqueteuses par la PEC. Le cas où nous avons obtenu une PEC proche de celle de la déchiqueteuse est dans le cas du sapin, $Ø_{bois}$ de 70 mm, f_z de 7 mm/dent et écart de 20 mm avec une valeur de 80%. Cela signifie que les deux énergies sont assez proches l'une de l'autre et donc que l'effort de coupe mesuré au niveau du contre couteau est assez proche de celui mesuré à partir du couple transmis par le cardan. Il faut donc que le contre couteau et le rouleau ameneur inférieur soient dans le même plan horizontal pour mesurer une PEC précise. Sur notre déchiqueteuse, il est difficile de réaliser cette modification car le rondin risque de venir buter contre le contre couteau, bloquant ainsi son avance (figure 70).

III.4. La comparaison performance énergétique par kilowattheure et litre de carburant

A partir des données de Spinelli et al. [Spinelli, 2012a, 2012b, 2013, 2015] , nous pouvons calculer un coefficient de conversion de performance énergétique en kilowattheure/Lcarburant. Ce coefficient qui a pour valeur moyenne de 2,57 kWh/L (cf chapitre 2.III.) permet de convertir les performances énergétiques exprimées en tonnes de plaquettes sèches par litre de carburant en tonnes de plaquettes sèches par kilowattheure. Dans ce paragraphe, les mesures sont présentées afin d'évaluer expérimentalement ce coefficient de conversion sur une autre source de puissance que Spinelli et al. [Spinelli, 2011]. Pour cela, la puissance fournie au niveau du cardan instrumenté est comparée à la consommation de carburant au niveau de la source d'énergie par le débit de carburant du tracteur. La source d'énergie étant un moteur thermique, la consommation de carburant au cours de l'essai de déchiquetage est obtenue en enregistrant le débit de carburant estimé par le calculateur du tracteur pour alimenter et fournir la puissance nécessaire au moteur thermique. Avant de réaliser cet essai, le tracteur est mis en fonctionnement pendant une demi-heure pour limiter les phénomènes de variation de la température du carburant. Une mesure de la consommation à vide est effectuée pendant ce temps lorsque la déchiqueteuse est à l'arrêt et en fonctionnement. Les allures du débit de carburant au niveau du tracteur et de la puissance consommée par la déchiqueteuse sont superposées sur la figure 88.

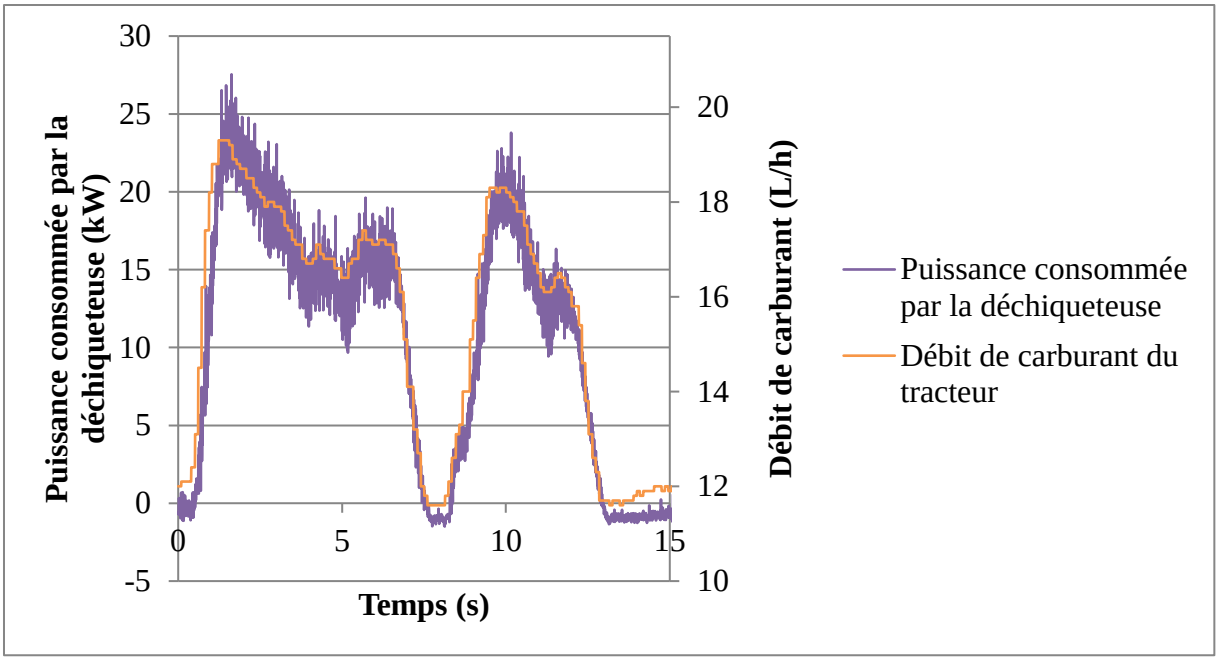


Figure 88 : Comparaison entre le débit de carburant du tracteur et la puissance consommée de la déchiqueteuse

Le débit de carburant mesuré par le tracteur est proportionnel à la puissance consommée par la déchiqueteuse à une constante près. Par ces essais, il est possible de déterminer l'énergie consommée par la déchiqueteuse en kilowattheure et en litre de carburant et de déterminer la performance énergétique du système complet. Les résultats obtenus lors des différents essais sont illustrés dans le tableau 23.

$Ø_{Bois}$ (mm)	$m_{v, bois}$ (kg/m^3)	Humidité (%)	Coefficient (kWh/L)
71	430	19	**2,98**
71	465	18	**3,08**
70	565	18	**2,96**
78	450	17	**2,79**
80	500	19	**2,92**
101	520	28	**3,24**
102	505	25	**3,49**
96	445	18	**2,89**
94	480	20	**2,30**
93	500	20	**4,46**
		Moyenne	**3,11**
		Ecart type	**0,56**

Tableau 23 : Coefficient de performance énergétique sur notre tracteur à l'étude

La vitesse de coupe est fixée à 24 m/s, l'avance par dent à 7 mm/dent et l'angle d'amenage à 90°. Une valeur moyenne de 3,11 kWh/L avec un écart type de 0,56 est obtenue pour 10 essais. Cette valeur est proche de Spinelli et al. [Spinelli, 2012a, 2012b, 2013, 2015] qui est de 2,57 soit 20% supérieure. Cet écart peut s'expliquer par la méthode d'obtention du débit de carburant plus précis avec la méthode de Spinelli et al. qui mesurent directement la

consommation de carburant par débitmètre tandis que la consommation de carburant est donnée par le calculateur du moteur dans mon étude et que cette valeur de consigne n'est peut-être pas parfaitement atteinte. Elle peut également s'expliquer par la différence de cinématique des systèmes étudiés où le rendement de l'hydrostatique du VSV doit avoir une part importante.

IV. Conclusions

Nous avons vu dans cette partie qu'il est possible d'évaluer la performance énergétique des déchiqueteuses en deux endroits distincts de la chaine cinématique de l'opération de broyage. La première méthode consiste à déterminer la PEC par mesure de la déformation du contre couteau. Cet effort maximal de coupe varie selon les configurations des paramètres de coupe de la déchiqueteuse mais également selon la position verticale du contre couteau. Nous avons donc choisi de déterminer la PEDc entre la source d'énergie et le disque pour caractériser énergétiquement la déchiqueteuse. Pour cela, la puissance transmise à l'arbre de la déchiqueteuse est mesurée à l'aide du cardan instrumenté. Au cours de différents essais, nous avons mis en évidence que le critère de performance énergétique était peu influencé par les paramètres du bois à savoir le diamètre du bois, l'essence et l'humidité. Ceci valide notre choix de la méthodologie d'évaluation des déchiqueteuses. Les paramètres machines ont une forte influence sur la PEDc. Au niveau de la déchiqueteuse, la modification de certains paramètres améliore la performance énergétique de la déchiqueteuse, en particulier l'avance par dent dont l'influence est égale à celle de tous les autres paramètres réunis. Les modifications de la vitesse de coupe, de l'avance par dent et de l'angle de dépouille du couteau ont permis de doubler la performance énergétique de la déchiqueteuse pour le sapin. Les essais ont mis en évidence que l'avance par dent et le paramètre qui influence le plus la PEDc. Il faut donc en tenir compte et le préciser pour pouvoir comparer la performance énergétique des déchiqueteuses ce qui n'a pas encore été fait jusqu'à présent. L'anti stress a également une influence sur la performance énergétique de la machine Son déclenchement réduit la PEDc de 40%. Ce résultat met en évidence les limites de ce système de sécurité qui réduit la performance d'une machine sous dimensionnée. En plus de la performance énergétique, nous avons étudié la puissance moyenne consommée lors du déchiquetage du rondin. Cette analyse nous a permis de mettre en évidence que la vitesse de coupe et l'avance par dent permettent d'être plus performant énergétiquement mais nécessite plus de puissance tandis que la modification de l'angle de dépouille du couteau et de l'angle d'amenage rend la machine plus performante énergétiquement tout en nécessitant moins de puissance.

Conclusions et perspectives de la thèse :

L'objectif de cette thèse était de définir un moyen d'évaluer la performance énergétique de la déchiqueteuse / broyeur. Cette recherche a permis de définir un nouveau critère plus pertinent, efficace et simplifié pour sa réalisation et sa compréhension. En plus de cet objectif, nous avons au cours de cette thèse développé des nouveaux outils pour mesurer la performance énergétique des déchiqueteuses. Ces nouveautés n'ont pu être réalisées qu'à partir d'un état de l'art scientifique et technique et d'une compréhension complète du système. Actuellement, deux types de déchiqueteuses existent : les déchiqueteuses à disques et les déchiqueteuses à rotor. La typologie dépend du système de coupe qui est utilisé pour fragmenter le bois et ainsi créer les plaquettes. Ces machines sont composées d'une partie amenage qui entraine le bois à la coupe, d'une partie coupe qui réalise les plaquettes, et d'une partie éjection qui évacue les plaquettes de la partie coupe vers le stockage extérieur. Selon les technologies utilisées pour chaque partie de la déchiqueteuse, les coûts horaires ou les coûts de fabrication des plaquettes des déchiqueteuses ne seront pas les mêmes et seront plus importants pour les déchiqueteuses de petites tailles. Ces coûts sont principalement imputés par la main d'œuvre pour alimenter la déchiqueteuse en bois et par le coût de carburant pour faire fonctionner ces machines dont la source d'énergie est un moteur à combustion. Pour réduire le coût de carburant et pour reconcevoir ce type de machine, cette thèse vise à définir un critère de performance énergétique qui permet d'évaluer toutes les déchiqueteuses du marché et à définir les axes de recherche pour développer la nouvelle machine. Plusieurs chercheurs ont mis au point des outils de mesures pour déterminer l'énergie consommée par les déchiqueteuses et déterminer la quantité de plaquettes produites. Leurs recherches ont également montré l'influence de certains paramètres de coupe sur la performance énergétique. Pour notre part, nous avons mis en place un critère de performance énergétique qui permet d'évaluer toutes les déchiqueteuses quelle que soit la source d'énergie utilisée mais aussi des outils de mesures et une méthodologie plus précise. Tout d'abord, la performance énergétique est définie par le rapport de la quantité de plaquettes sèches produites sur l'énergie consommée par la déchiqueteuse pour produire cette quantité de plaquettes. Afin d'évaluer cette performance énergétique, deux méthodologies sont mises en place pour la détermination de l'énergie et une méthodologie pour déterminer la quantité de bois déchiqueté en tout instant. La première consiste à déterminer l'énergie lors de la coupe par la mesure de la déformation du contre couteau. Cette méthodologie permet d'évaluer la déchiqueteuse au plus proche de la coupe et de comprendre le phénomène de déchiquetage. La deuxième méthodologie détermine l'énergie de la déchiqueteuse au niveau de la transmission entre la source d'énergie et la déchiqueteuse par un cardan instrumenté. La méthodologie utilisée pour définir la quantité de bois déchiqueté est basée sur la mesure de l'avance du rondin et la caractérisation du rondin avant déchiquetage. Au travers de différents essais, nous avons mis en évidence l'intérêt de ce critère de performance énergétique qui permet d'évaluer toutes les déchiqueteuses pour différentes caractéristiques que peut avoir le bois : essence, humidité et diamètre. L'avance par dent de la déchiqueteuse est un paramètre très important pour rendre la machine plus

performante énergétiquement. Une augmentation de 50 % de l'avance par dent permet de gagner entre 30 et 50% de performance pour la déchiqueteuse. La vitesse de coupe est également un paramètre qui permet de rendre les déchiqueteuses plus performantes. Ces deux paramètres nécessitent également de fournir une puissance et un effort de coupe plus important pouvant augmenter de 50% la performance énergétique. Ce n'est pas le cas pour certains paramètres comme l'angle d'amenage ou l'angle de dépouille du couteau. En effet, la modification de l'angle entraine à la fois une amélioration de la performance énergétique de 10 à 20% tout en réduisant la puissance nécessaire de 10 à 15%. Quant à la mesure de la performance énergétique au niveau de la coupe, l'influence de la position verticale du contre couteau modifie fortement les résultats obtenus sur la performance énergétique de coupe. Ces résultats posent des questions sur la position adéquate du contre couteau par rapport au couteau afin de rendre la machine performante énergétiquement tout en produisant des plaquettes de bonne granulométrie.

Une perspective de recherche serait de reconcevoir le système anti stress en ne travaillant pas sur la conséquence mais sur la source du problème. Si l'on regarde les nouvelles solutions qui ont été développées, les constructeurs limitent le déclenchement de l'anti stress soit par ajout de puissance lorsque cela est nécessaire, soit par la réduction de l'avance par dent après déclenchement. La nouvelle solution innovante pourrait évaluer la puissance nécessaire à l'entrée du système en configurant la déchiqueteuse afin de produire une plaquette de bonne qualité avec une puissance acceptable pour la déchiqueteuse.

En plus de reconcevoir le système anti stress, d'autres axes de recherche sur les déchiqueteuses sont à mener au niveau de la coupe ainsi qu'au niveau de l'amenage. Introduire un système de maintien du bois lors de la coupe permet d'obtenir des plaquettes plus homogènes. Ce maintien du bois peut se faire soit en modifiant la forme de certains éléments, soit en ajoutant des éléments supplémentaires. Cela permet également de rendre la coupe plus homogène pour en réduire les efforts de coupe et donc améliorer la performance énergétique de la déchiqueteuse. La reconception de la partie coupe en travaillant sur les angles des couteaux, sur le nombre des couteaux et leur disposition sur le disque permettront également de réduire la puissance nécessaire à la coupe en rendant la coupe continue et en modifiant le mécanisme de coupe.

Pour finir, nous avons travaillé sur une déchiqueteuse à disque et non sur une déchiqueteuse à rotor. Des essais sur cette machine en utilisant les mêmes paramètres de coupe que ceux développés au cours de la thèse permettraient d'évaluer les deux technologies en termes d'efficacité énergétique ce qui n'a pas encore été réalisé. En plus de ces essais, une étude sur l'influence de paramètres de coupe en s'inspirant de ces travaux de recherche serait à faire sur ce type de machine encore méconnu pour l'instant. Par ces données, nous pourrions orienter les recherches sur la conception d'une nouvelle déchiqueteuse plus performante énergétiquement.

Bibliographie :

[Abdallah, 2010]
R. Abdallah. *Détermination des facteurs influençant la coupe et la qualité des plaquettes issues du déchiquetage du bois par des machines forestières.* Thèse. Henry Poincarré - Nancy 1, 2010. 217 p.

[Abdallah, 2014]
R. Abdallah, S. Auchet, P. J. Méausoone. A dynamic measurement of a disc chipper cutting forces. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 64, p. 269–275

[ADEME, 2017]
Ademe. *Le bois biomasse* **[en ligne]**. (mise à jour 16/09/2016) Disponible sur http://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-chaleur/dossier/bois-biomasse/biomasse-energie. Consulté le 09/03/2017

[AGRESTE, 2017]
Agreste. *Récolte de bois et production de sciages* **[en ligne]**. (2009) Disponible sur http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/forets-bois-et-derives/recolte-de-bois-et-production-de/. Consulté le 09/03/2017

[AJENA, 2017]
AJENA. *L'argus de l'énergie* **[en ligne]** (mise à jour 01/ 2017). http://www.ajena.org/ressources/argus-energie.htm. Consulté le 09/03/2017

[Al Bassit, 2012]
Lama Al Bassit, Nicolas Tricot. *Amélioration de la sécurité de la déchiqueteuse forestière*. CEN/TC 144/WG8. IRSTEA – Centre d'Antony : unite de recherché STAN, Antony, 2012. 52 p.

[Asikainen, 1998]
A. Asikainen et P. Pulkkinen. Comminution of Logging Residues with Evolution 910R chipper, MOHA chipper truck, and Morbark 1200 tub grinder. *Journal of Forest Engineering*, 1998, vol. 9, no. 1, p. 47–53

[Assirelli, 2013]
A. Assirelli, V. Civitarese, R. Fanigliulo, L. Pari, D. Pochi, E. Santangelo, R. Spinelli. Effect of piece size and tree part on chipper performance. *Biomass and Bioenergy*. 2013, 54 p. 77–82

[Auchet, 2004]
S. Auchet, P. Chevrier, M. Lacour, P. Lipinski. A new method of cutting force measurement based on command voltages of active electro-magnetic bearings. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004, 44 , p. 1441–1449

[Bois energie, 2008]
Groupe bois énergie. *Tout savoir sur le bois déchiqueté*. Chambre d'Agriculture du Loiret, 2008. 11 p.

[Bugnot, 2011]
Bugnot Michel. *Broyeur de végétaux à faible consommation.* Brevet FR2980124 (B1). 21 septembre 2011.

[CEEB, 2017]
FNB. *Actus CEEB* **[en ligne]**. Disponible sur : http://www.fnbois.com/fr/actus_ceeb. Consulté le 09/03/2017.

[Di Fulvio, 2015]
F. Di Fulvio, G. Eriksson, D. Bergström. Effects of wood properties and chipping length on the operational efficiency of a 30 kW electric disc chipper. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2015, 36, p. 85–100

[Directive 2006/42/CE]
Parlement Européen et du conseil. *Directive n°2006/42/CE du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte)*. Journal officiel de l'Union européenne, L 157 du 09 juin 2006. p. 24-85

[Eliasson, 2015]
L. Eliasson, H. von Hofsten, T. Johannesson, R. Spinelli, T. Thierfelder. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers, *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2015, 36, p. 11–17

[Energie+, 2017]
Energie+. *Les chaudières bois-énergie* **[en ligne]**. Disponible sur : https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16644. Consulté le 09/03/2017

[Facello, 2012]
A. Facello, E. Cavallo, R. Spinelli. *Performance evaluation of a small chipper using an innovative cutting system in: Energy, Biomass and Biological Residues. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life*. Valencia : CIGR-EurAgEng, 2012 p. 1810–1814

[Facello, 2014]
A. Facello, E. Cavallo, R. Spinelli. *Some parameters affect the wood chipping machines efficiency*. International Conference of Agricultural Engineering, Zurich, 2014

[Hartler, 1963]
Hartler N. Shear mainly perpendicular to the fiber, Axis – A new chipping principle, 66 (16), 1963.

[Hellström, 2010]
L. Hellström. *On the wood chipping process - A study on basic mechanisms in order to optimize chip properties for pulping*. Thèse, Mid Sweden University, 2010.

[Hellström, 2011]
L.M. Hellström, P.A. Gradin, M. Gulliksson, T. Carlberg. A Laboratory Wood Chipper for Chipping Under Realistic Conditions. *Experimental Mechanics*. 2011, vol. 51, p. 1309–1316

[HSL, 2008]
Health and Safety Laboratory. *Noise emissions and exposure from mobile wood chippers*. Report. Buxton, England. 54 p.

[Kaksonen, 2015]
P. Kaksonen. Hybrid Chipper. *Flash presentation at the Mobilization of woody biomass for energy and industrial use - Smart logistics for forest residues, prunings and dedicated plantations*. Rome: FAO Headquarters, 2015.

[Kivimaa, 1950]
Kivimaa E. Cutting forces in wood-working, Jukaisu Publication No. 18, The State Institute for Technical Research, Helsinki, 1950, 103 p.

[Kováč, 2011]
J. Kováč, J. Krilek, M. Mikleš. Energy consumption of a chipper coupled to a universal wheel skidder in the process of chipping wood, *Journal of Forest Science*, vol. 57, p.34–40.

[Labbé, 2017]
S. Labbé, S. Auchet, and P.-J. Méausoone. Effect of anvil position on cutting force and energy measurements of a disc chipper. *Biomass and Bioenergy*, 2017, vol. 99, p. 49–56

[Liska, 2010]
S. Liska, D. Safarik, R. Klvac, V. Kupcak, R. Jirousek. General assesment of Jenz HEM 420D chipper operating in the Czech Republic conditions. *FORMEC 2010:Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment*, 2010, Padova : Italy

[Magagnotti, 2016]
N. Magagnotti, R. Spinelli, F. De Francesco, C. Lombardini. A Versatile Terrain and Roadside Chipper for Energy Wood Production in Plantation Forestry. *Baltic Forestry*, 2016, vol.22, p. 107–115.

[Manzone, 2013]
M. Manzone, R. Spinelli. Wood chipping performance of a modified forager. *Biomass and Bioenergy*, 2013, vol. 55, p. 101–106

[Manzone, 2015]
M. Manzone Energy consumption and CO2 analysis of different types of chippers used in wood biomass plantations. *Applied Energy*, 2015, vol. 156, p. 686–692.

[McLauchlan, 1979]
Mclauchan T.A., Lapointe J.A. Chapter 2. Production of chips by chipper « chip quality monograph" Hatton J.V., *TAPPI*, 1979, series No.5, p. 15-32

[Mihelic, 2015]
M. Mihelič, R. Spinelli, N. Magagnotti, A. Poje, Performance of a new industrial chipper for rural contractors, *Biomass and Bioenergy*, 2015, vol 83, p. 152–158

[Ministère de l'env., 2016]
Ministère de l'environnement, de l'Energie et de la Mer. *Loi de transition énergétique pour la croissance verte* **[En ligne]** (Publié le 13/12/2016). Disponible sur

http://www.developpement-durable.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte. Consulté le 10/03/2017

[Nati, 2010]
C. Nati, R. Spinelli. How blade wear of chippers can affect fuel consumption and wood chip size distribution. *Formec 2010: Forest Engineering: Meeting the needs of the Society and the environment*. Padova, Italie. 2010

[Nati, 2014]
C. Nati, L. Eliasson, R. Spinelli. Effect of chipper type, biomass type and blade wear on productivity, fuel consumption and product quality. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2014, vol. 35, p. 1–7.

NF EN 17225-4
AFNOR. Biocombustibles solides — Classes et spécifications des combustibles — Partie 4 : Classes de plaquettes de bois. NF EN ISO 17225-4. Paris : AFNOR 2014

NF EN ISO 17827-1
AFNOR. Biocombustibles solides — Détermination de la distribution granulométrique des combustibles non comprimés — Partie 1 : Méthode au tamis oscillant d'ouverture de maille égale ou supérieure à 3,15 mm. NF EN ISO 17827-1. Paris : AFNOR 2016

NF EN ISO 18134-1
AFNOR. Biocarburants solides - Dosage de la teneur en humidité - Méthode deséchage à l'étuve - Partie 1 : humidité totale - Méthode de référence. NF EN ISO 18134-1. Paris AFNOR 2016

NF EN ISO 18122
AFNOR. Biocombustibles solides - Méthode de détermination de la teneur en cendres. NF EN ISO 18122. Paris AFNOR 2015.

NF EN 14918
AFNOR. Biocombustibles solides - Détermination du pouvoir calorifique. NF EN 14918. Paris AFNOR 2010.

NF EN 13525+A2
AFNOR. Machines forestières - Déchiqueteuses – Sécurité. NF EN 13525+A2. Paris AFNOR 2009.

[Noremat]
Noremat. *Matériel pour la valorisation* **[En linge]**. http://www.noremat.fr/fr/sommaire-valormax. Consulté le 10/03/2017

[Pfeiffer, 2015]
R. Pfeiffer. *Analyse et modélisation du bois vert*. Thèse. Ecole Nationale Supérieur d'Art et Métiers, 2015

[Pochi, 2015]
D. Pochi, V. Civitarese, R. Fanigliulo, R. Spinelli, L. Pari. Effect of poplar fuel wood storage on chipping performance. *Fuel Processing Technology*. 2015, vol. 134, p. 116–121

[Spinelli, 2001]
R. Spinelli, B. Hartsough. A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy*. 2001, vol. 21, p. 433–444

[Spinelli, 2011]
R. Spinelli, N. Magagnotti, G. Paletto, C. Preti. Determining the impact of some wood characteristics on the performance of a mobile chipper. *Silva Fennica,* 2011, vol. 45, p. 85–95

[Spinelli, 2012a]
R. Spinelli, E. Cavallo, A. Facello. A new comminution device for high-quality chip production. *Fuel Processing Technology*, 2012, vol. 99, p. 69–74.

[Spinelli, 2012b]
R. Spinelli, E. Cavallo, A. Facello, N. Magagnotti, C. Nati, G. Paletto. Performance and energy efficiency of alternative comminution principles: Chipping versus grinding. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 27, p. 393–400.

[Spinelli, 2013]
R. Spinelli, E. Cavallo, L. Eliasson, A. Facello. Comparing the efficiency of drum and disc chippers. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47 11 p.

[Spinelli, 2014]
R. Spinelli, C. Lombardini, and N. Magagnotti. The effect of mechanization level and harvesting system on thinning cost and impact under Mediterranean forest conditions. *Silva Fennica*, vol. 48, no. 1, 2014

[Spinelli, 2015]
R. Spinelli, E. Cavallo, L. Eliasson, A. Facello, N. Magagnotti. The effect of drum design on chipper performance. *Renewable Energy*. 2015, vol. 81, p. 57–61

[Spinelli, 2016]
R. Spinelli, L. Eliasson, N. Magagnotti. Increasing wood fuel processing efficiency by fine-tuning chipper settings. *Fuel Processing Technology,* 2016, vol. 151, p. 126–130

[Stokes, 1987]
Stokes Bryce J., Watson William F., Sirois Donald L., Matthes R. Kenneth. Factors affecting power requirements for chipping whole trees. *American Society of Agricultural Engineers*, Baltimore Maryland, 1987.

[Webster, 2005]
P. Webster. *Chipper review.* Forest research, 2005.

[Webster, 2007]
Paul Webster. *A comparaison between a Hand-fed and a mechanically-fed chipper*. The Research Agency of the Forest Commision, 2007.

Annexe 1 : Mesure du couple par le cardan instrumenté

1. Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement du cardan instrumenté est rappelé sur la figure 89.

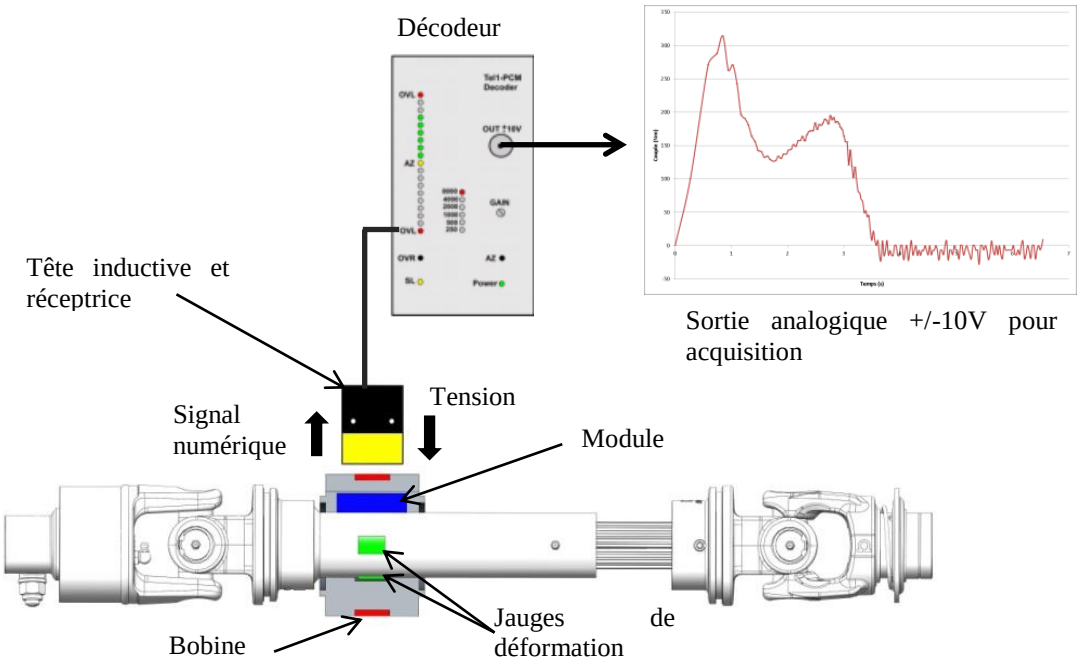


Figure 89 : Principe de fonctionnement du cardan instrumenté

Le cardan est équipé de 2 jauges de déformation mesurant la déformation de l'arbre extérieur du cardan. Un module permet de récupérer le signal analogique des jauges, de corriger le signal (pont de Wheatstone) et convertir le signal analogique en signal numérique. Une tête inductive et réceptrice permet d'alimenter le module et les jauges via une bobine et de récupérer le signal numérique émis par le module. Un décodeur permet de convertir le signal numérique en signal analogique +/- 10V (couple + ou -). Le gain permet de régler la plage de mesure de l'appareil (4000 permet de mesurer un couple maxi de 1000Nm, AZ permet de remettre l'appareil à 0 et l'OVR permet de réinitialiser les LED de dépassement des valeurs maxi (permet de savoir si l'on dépasse les valeurs limites de mesure). Une sortie +/-10V permet de récupérer la tension proportionnelle au couple.

L'intérêt de ce système et de pouvoir déterminer le couple qui est transmis par le moteur en mesurant la déformation de l'arbre en rotation et sans introduire de frottement. La détermination du couple demande de déterminée la sensibilité entre la sortie tension et le couple réellement exercé. Un étalonnage est nécessaire pour déterminer cette sensibilité.

2. Etalonnage du couplemètre :

Nous avons choisi d'étalonner le couplemètre en déterminant le couple mesuré électriquement suivant le couple créé par un effort sur un bras de levier au niveau du disque (figure 90).

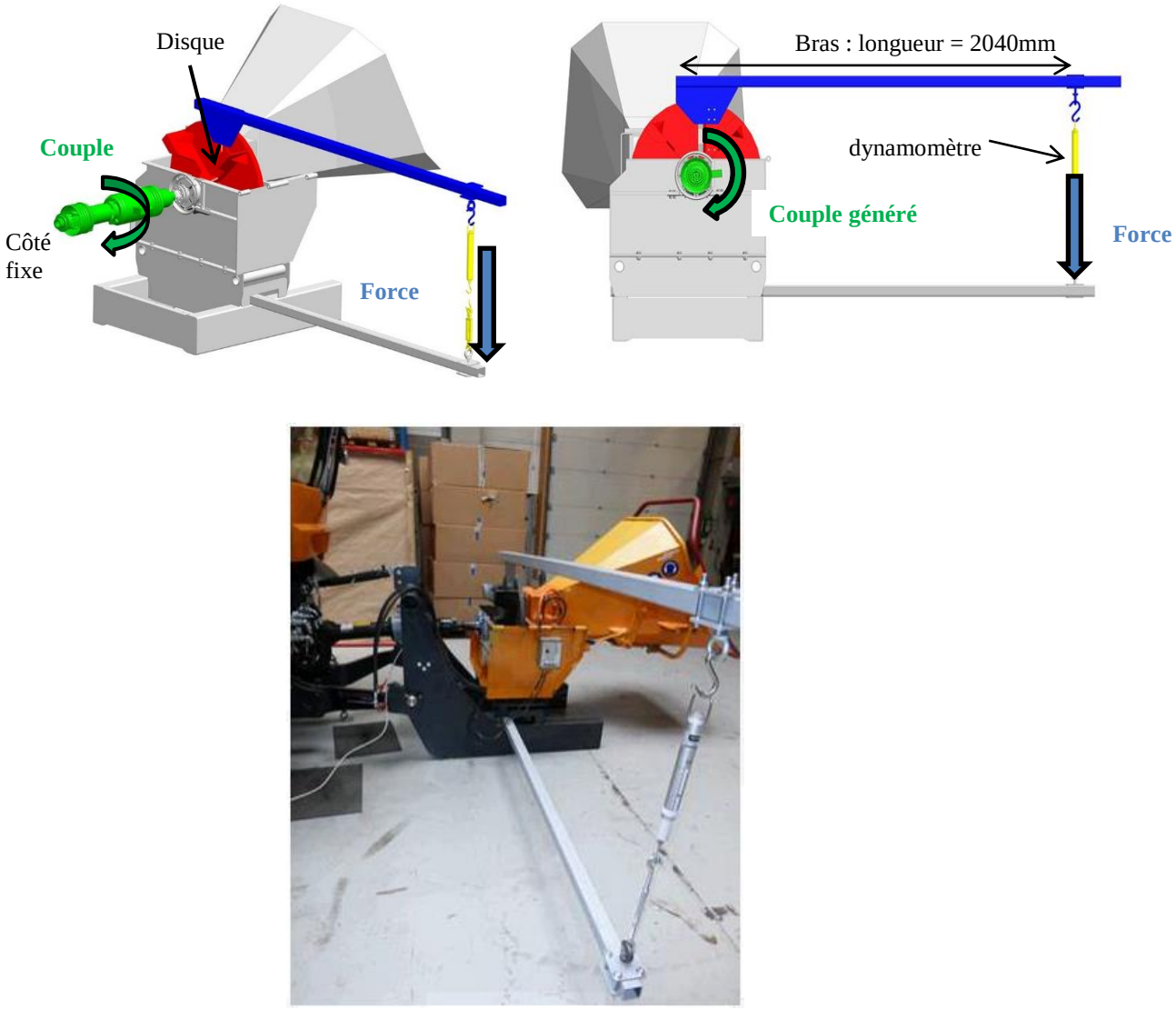


Figure 90 : Dispositif d'étalonnage du cardan instrumenté

Le cardan est monté sur la déchiqueteuse et le tracteur. La prise de force du tracteur est rendue fixe pour bloquer en rotation le disque. Une barre de 2,04 mètres de long est fixée sur le disque de la déchiqueteuse au niveau des couteaux. Une autre barre de même longueur est fixée sur le châssis de la déchiqueteuse. Un dynamomètre et un tendeur sont accrochés à l'extrémité des barres. Le dynamomètre permet de mesurer l'effort qui est exercé parle tendeur sur la barre. Le couple au niveau du cardan instrumenté est donné par :

$$Couple = Effort\ du\ tendeur \times longueur\ du\ bras\ de\ levier$$

Couple : couple exercé par le tendeur en Nm, effort du tendeur : effort émis par le tendeur sur la barre (N) et longueur du bras de levier : longueur de la barre (m).

L'effort est mesuré par un dynamomètre de 50 kg avec une précision de 0,5 kg. L'effort est donnée par :

$$Effort\ du\ tendeur = masse\ mesurée \times g$$

masse mesurée : masse mesurée par le dynamomètre (kg), g : gravité : 9,81 m/s²

La sensibilité obtenue est illustrée sur la figure 91

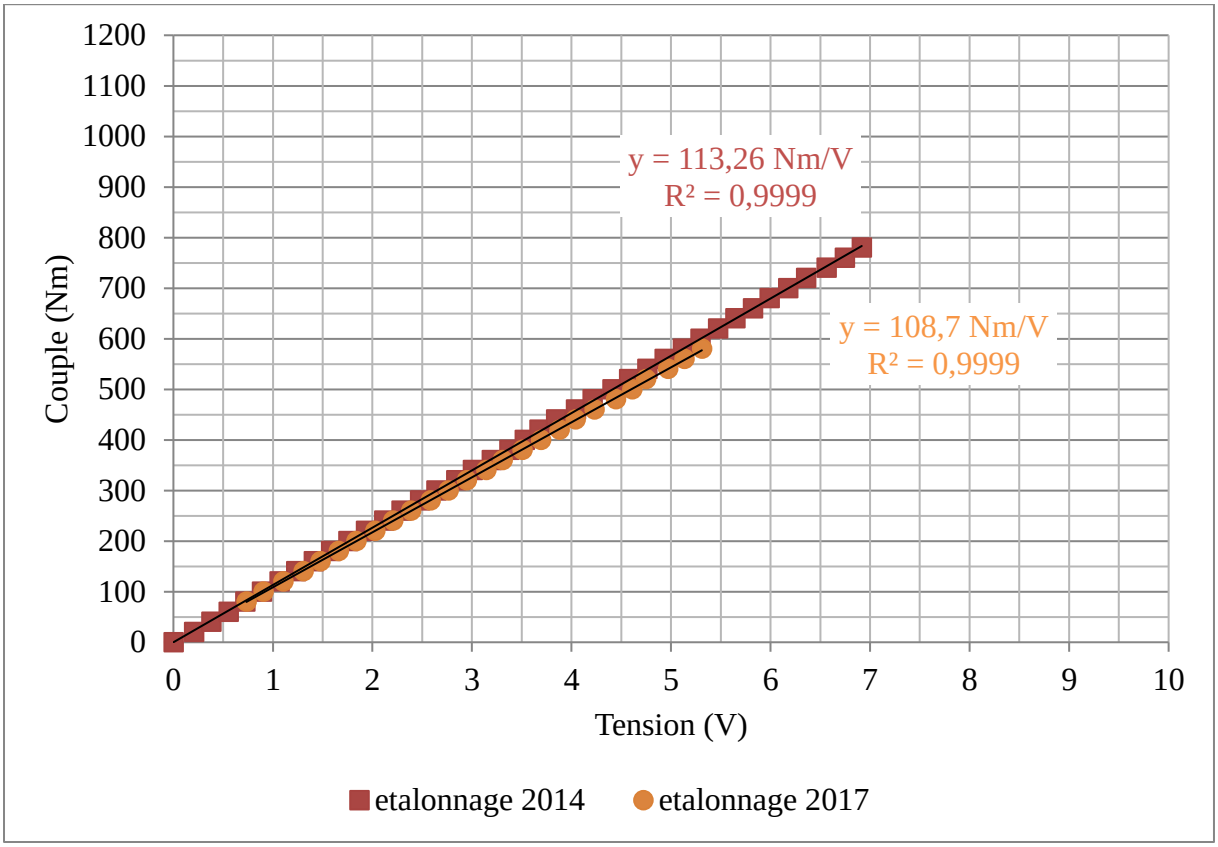
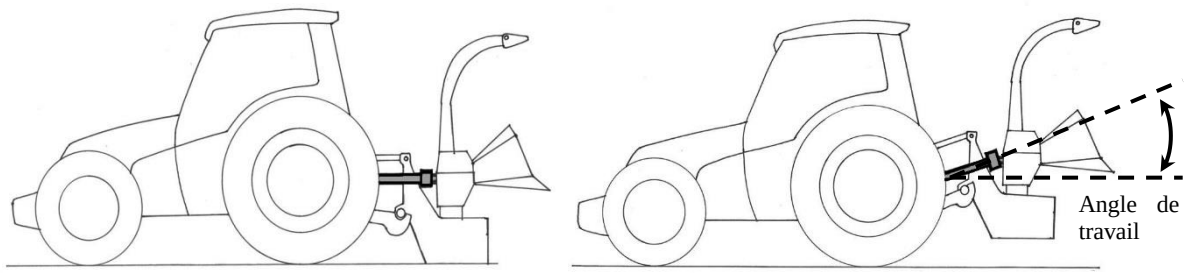


Figure 91 : Sensibilité du cardan instrumenté

La sensibilité est réalisée au début et en fin de thèse. Cette sensibilité a légèrement évolué suite au vieillissement du système. Ceci ne modifie en rien les résultats obtenus mais impose à contrôler l'étalonnage le cardan instrumenté régulièrement.

3. Influence de l'angle de travail sur la mesure du couple :

L'angle de travail est défini par l'angle que prend le cardan lorsque qu'il est fixé à chaque extrémité sur la machine et le tracteur (figure 92).



Position basse: Le cardan est parralèle au sol.
Angle de travail = 0°

Position élevée : Le cardan est incline par rapport au sol.
Angle de travail >0°

Figure 92 : Angle de travail sur une machine attelée sur un tracteur

Dans notre cas, l'angle de travail est de 5°, nous avons choisi d'étudier l'influence de cet angle sur la mesure du couple. Pour cela, j'ai utilisé le même dispositif que dans la partie 2. L'effort et fixé à une valeur de 294N. L'angle de travail est modifié en relevant ou baissant les bras de relevage du tracteur. Les résultats sont donnés sur la figure 93.

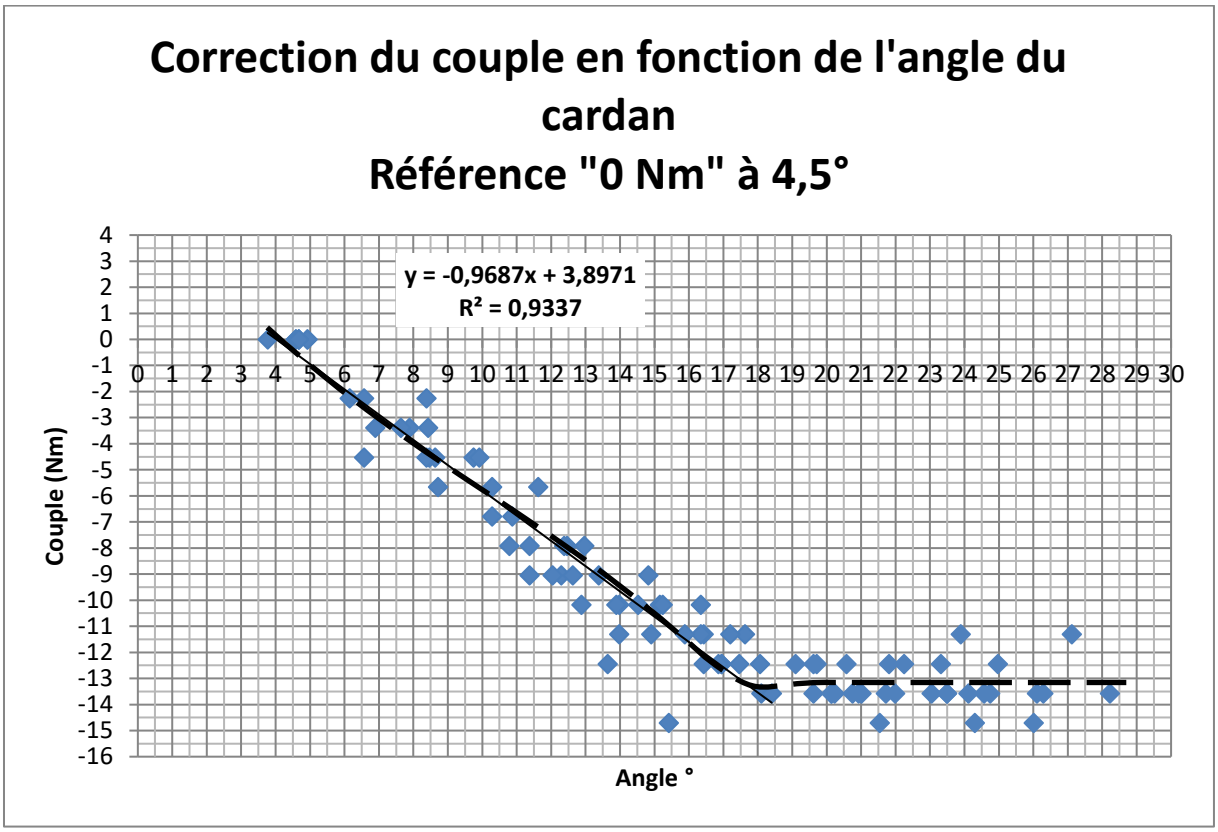


Figure 93 : Influence de l'angle de travail sur la mesure du couple

Modifier l'angle de travail modifie le couple mesuré. Il faut donc pour être précis ne pas modifier l'angle de travail au cours de la mesure. Dans notre cas, le système est immobilisé et posé au sol. Nous ne sommes donc pas impactés par ce phénomène. Une remise à zéro est juste nécessaire.

4. Influence de la non homocinétique du cardan sur la mesure du couple

4.1. L'homocinétique.

L'homocinétique est le fait de transmettre d'un arbre menant à un arbre mené une vitesse identique à tout instant quel que soit l'angle qui peut avoir entre les deux axes. Des exemples d'homocinétiques sont illustrés dans le tableau 24.

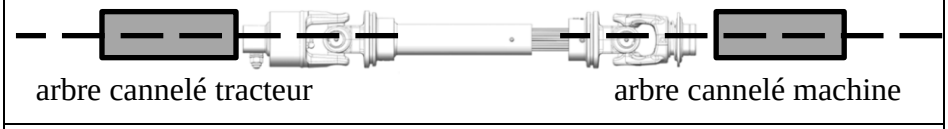
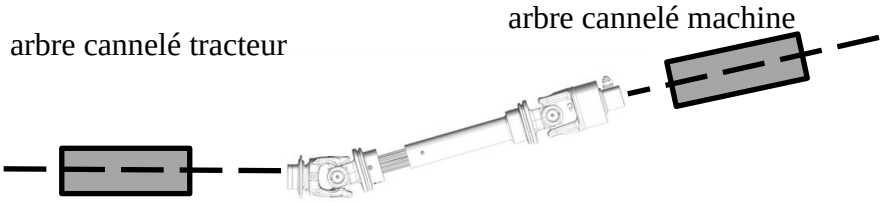
Homocinétique. Les deux axes sont dans la même direction	
Non homocinétique. Les deux axes ne sont pas la même direction	

Tableau 24 : Homocinétique et non homocinétique

La première configuration est le cas idéal où les arbres de la machine et du tracteur sont parfaitement alignés. Le deuxième cas est celui que l'on retrouve souvent où les deux arbres ont la même direction mais sont décalés l'un par rapport à l'autre. Dans ce cas, il y a homocinétique. Pour finir, le troisième cas montre le cas où les deux arbres ne sont pas à la même hauteur et n'ont pas la même direction. Ce cas a une influence sur la mesure du couple et sur l'étalonnage.

4.1. Cas de l'étalonnage si non homocinétique

Le cardan est disposé de manière que les deux arbres n'aient pas la même direction (figure 94). La méthodologie d'étalonnage est la même que présentée dans la partie 1.

Figure 94 : Cas des arbres cannelés avec une direction différente

L'allure du couple est donnée sur la figure 95.

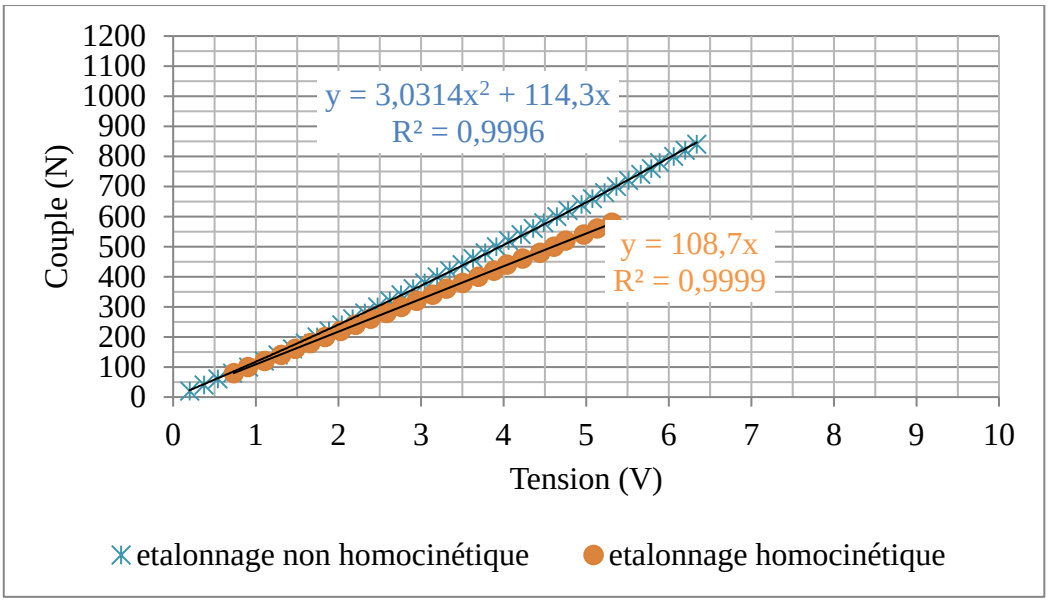


Figure 95 : Influence de la non homocinétique sur l'étalonnage du cardan instrumenté

La courbe prend la forme d'une parabole au lieu d'une droite. Nous pouvons affirmer que cette homocinétique a une important lors de l'étalonnage du couplemètre car elle en modifie le comportement de l'instrument de mesure. Il faut donc pour l'étalonnage que les deux axes aient la même direction.

4.2. Mesure du couple

Nous avons réalisé une mesure du couple lors du démarrage de la déchiqueteuse pour passer d'une vitesse de 0 à 1050 tr/min. Les essais sont réalisés dans le cas où les arbres du tracteur et de la déchiqueteuse ont la même direction et lorsque ce n'est pas le cas. L'allure de la mesure du couple est illustrée sur la figure 96

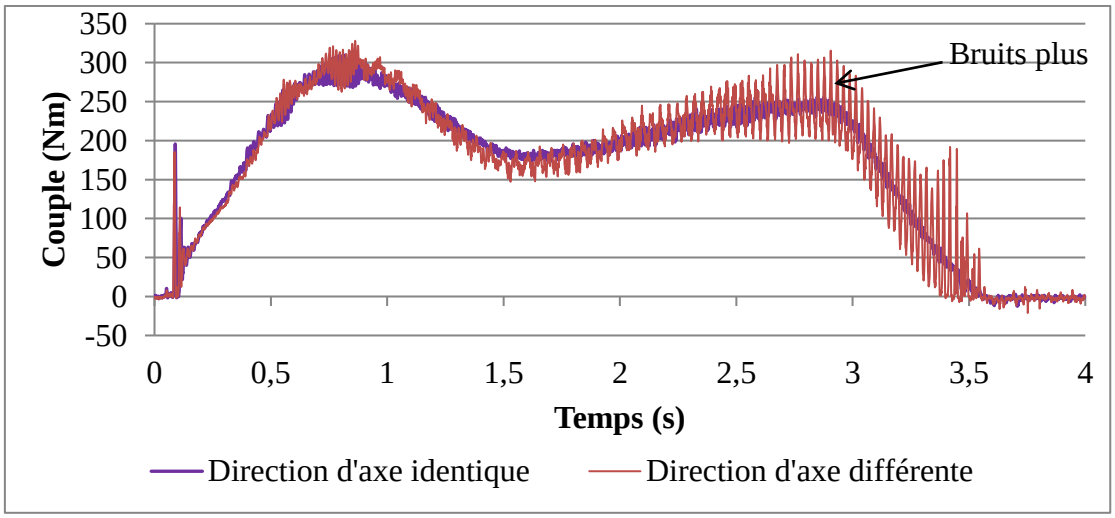


Figure 96 : Exemple de mesure du couple de démarrage du B160 pour deux montages du couplemètre sur les axes de même direction et de directions différentes

Le désaxement entre les deux arbres génère une sinusoïde lors de la mesure du couple plus important que dans le cas où les axes sont alignés. Par contre, la direction des deux axes ne modifie ni le couple, ni la puissance qui passe dans le cardan et l'énergie reste inchangée. Ceci impose uniquement à augmenter la fréquence d'acquisition lors de la mesure pour des arbres n'ayant pas la même direction.

Annexe 2 : Essai de répétition

Nous avons voulu vérifier que notre méthodologie d'évaluation de la performance énergétique était opérationnelle avant de réaliser l'ensemble des essais pour optimiser la déchiqueteuse à disque. Ces essais ont également permis de déterminer la quantité de rondins à déchiqueter pour valider le résultat obtenu.

Un essai de répétition est réalisé sur le B160 montée sur le moteur électrique. Cinq rondins de sapin de diamètre 90 mm, à 20% d'humidité sont utilisés. L'avance par dent de la déchiqueteuse est réglée à 7 mm/dent et la vitesse de coupe à 24 m/s. Les couteaux sont les couteaux constructeurs (α=0°, β= 50° et γ= 40°) et l'angle d'amenage est de 90°.

Les résultats de répétitions sont donnés dans le tableau 25 et la figure 97.

n° de l'essai	Diamètre moyen mm	L_{Bois} mm	m_{Bois} kg	$m_{v,\ bois}$ kg/m³	H% %	f_z mm/dent	Puissance globale moyenne kW	PEDc t_{Ps}/kWh
1	91	2010	6,62	505	20	6,0	14.2	0,136
2	91	2005	5,94	460	20	5,6	14.4	0,142
3	89	2015	5,26	420	19	6,2	14	0,108
4	92	2010	6,32	470	19	6,4	16.1	0,145
5	90	2000	6,22	490	20	6,3	14.8	0,121
Moyenne	91	2008	6,07	470	20	6,1	15	0,131
Ecart type	1	6	0,51	30	1	0,3	1	0,016

Tableau 25 : Résultats de répétition de déchiquetage de 5 rondins de sapin

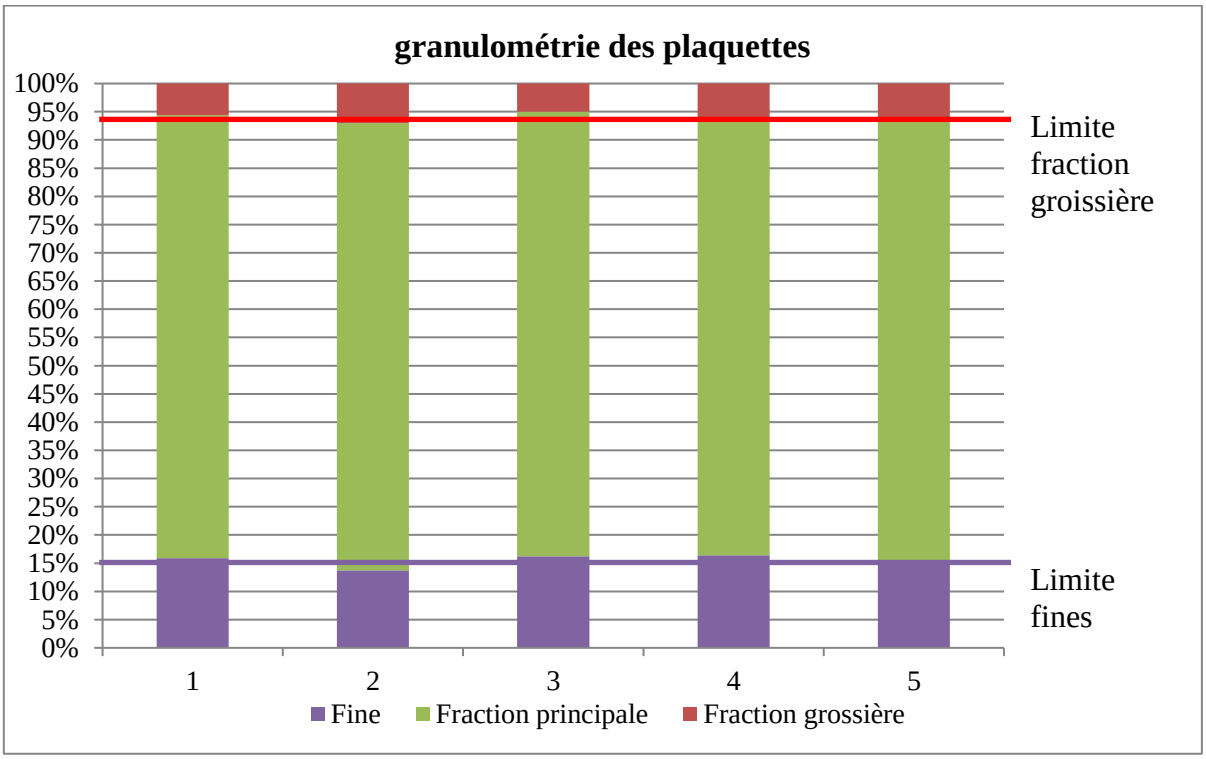


Figure 97 : Granulométrie obtenu pour l'essai de répétition

Les résultats obtenus montrent que les dispersions des valeurs pour 5 essais sont faibles. Pour des rondins de même essence et quasiment identique, les mesures sont proches les unes des autres. Nous considérons donc que 5 rondins à déchiqueter par essais sont suffisants. La vitesse d'amenage mesurée montre un décalage par rapport à l'avance souhaitée : 15% inférieure. Cet écart s'explique par un réglage non parfait sur notre déchiqueteuse, des efforts pour amener le bois non négligeable et des efforts différents selon les rondins. Nous modifions donc la vitesse d'avance du rondin pour corriger cette erreur. La puissance moyenne dans ces configurations est de 15 kW soit 33% de la puissance du moteur électrique. Les moteurs choisis semblent être dans la bonne plage de puissance pour la détermination de la performance énergétique.

Annexe 3 : Casse des couteaux lors du déchiquetage du hêtre

Nous avons présenté lors du plan d'expérience des résultats suivant l'essence de sapin et aucune sur le hêtre. Ceci s'explique par la casse de couteaux lors du déchiquetage des rondins de hêtre de fort diamètre pour les couteaux que nous avons réalisés ($\alpha = 5°$, $\beta = 55°$, $\gamma = 30°$; $\alpha = 10°$, $\beta = 55°$, $\gamma = 25°$). Ces casses répétitives nous ont amené à arrêter l'étude sur le hêtre. Cependant, ces casses des couteaux (figure) nous ont permis de mettre en évidence un phénomène non négligeable à prendre en compte lors de la conception des machines. Ces essais se sont déroulés sur la déchiqueteuse B160 modifiée.

Le tableau 26 résume les deux nuances de carbure et les angles des couteaux qui ont été réalisée.

Nuance carbure	Angles	Remarques
Nuance 11903	α 5° β 50° γ 35°	Résistance bonne dans le sapin Casse dans le hêtre diamètre >= 100 mm
Nuance 11903	α 10° β 50° γ à 30°	Résistance bonne dans le sapin Casse dans le hêtre diamètre >= 100 mm
Nuance 11510	α 5° β 55° γ 30°	Résistance bonne dans le sapin Casse dans le hêtre diamètre >= 80 mm

Tableau 26 : Nuances de carbure utilisées sur les couteaux

Nous avons constaté que les couteaux cassés seulement dans des rondins de hêtre de diamètre supérieur à 80 mm (figure 98). Les couteaux qui cassaient se situent sur la partie extérieure du disque (figure). Nous avons déduit à ce moment-là que les nuance de carbure n'était pas la bonne et que le choc entre le bois et le couteau amené à leur casse.

Figure 98 : Casse des couteaux lors du déchiquetage du hêtre

Nous avions donc fait les hypothèses suivantes :

- La réduction de l'angle de coupe modifie le comportement du couteau qui vient davantage frapper la matière plutôt que la trancher.

- La frappe générée par la réduction de l'angle de coupe pourrait fragiliser la plaquette.

- La nuance 11510 semble moins résistante que la nuance 11903.

Nous avons voulu faire des essais avec des couteaux aciers ($\alpha = 5°$, $\beta = 30°$, $\gamma = 55°$) dont nous n'avons pas fait beaucoup d'essai pour en divulguer les résultats. Après le déchiquetage de rondin de hêtre de fort diamètre, nous avons constaté des coups sur le couteau comme le montre la figure 99.

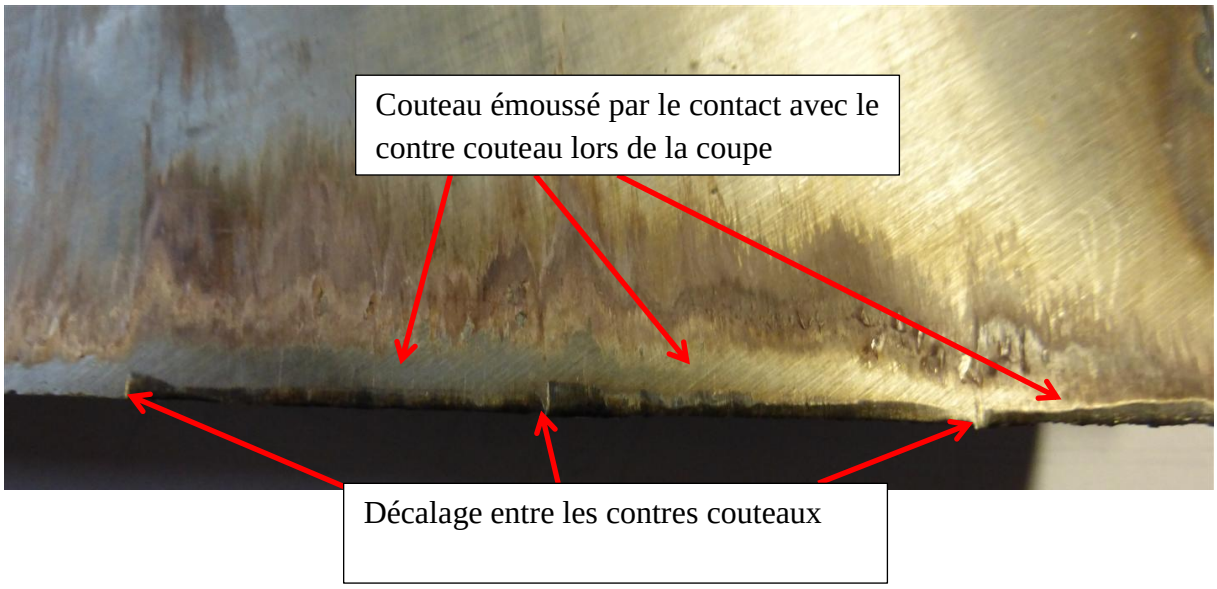


Figure 99 : Emoussage des couteaux en aciers lors du déchiquetage du hêtre

Lors des essais avec les couteaux aciers, nous avons constaté que l'un des couteaux frottait contre les contre couteaux. L'emplacement de ce phénomène coïncide avec celui des couteaux carbures qui cassaient. Nous pouvons dire après essais que les couteaux carbures venaient également toucher les contres couteaux lors de la coupe entrainant la casse des couteaux.

Le contact contre couteau se traduit par deux phénomènes et sont présentés sur la figure 100 :

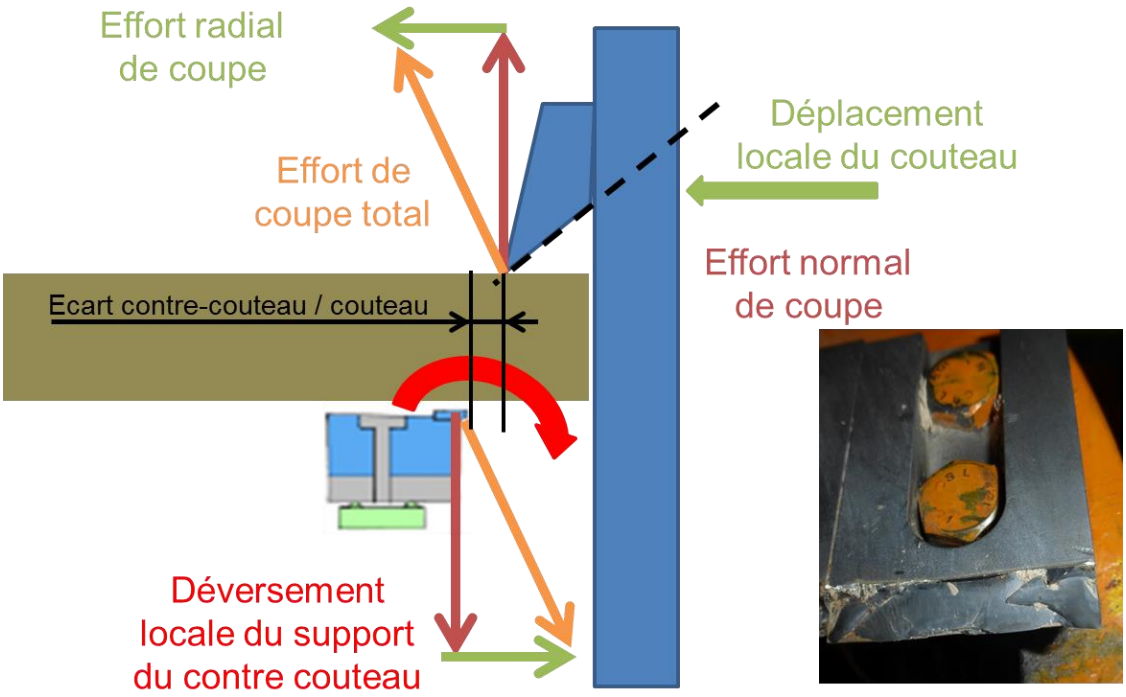


Figure 100 : Illustration du phénomène de casse des couteaux

Déformation locale du disque due à l'effort de coupe dans le couteau : cette déformation locale du disque rapproche le disque des contres couteaux.

Déformation du contre couteau par déversement sous l'effort de coupe. Ceci entraine également un déplacement du contre couteau qui se rapproche du disque. L'écart entre le contre couteau et le disque de 0,7 mm se réduit jusqu'au contact entre le couteau et le contre couteau.

Ce constat a mis en évidence l'importance de renforcer la tôle qui constitue la déchiqueteuse pour éviter ce phénomène.

Résumé :

L'utilisation des plaquettes bois dans le secteur de l'énergie est en pleine croissance depuis les objectifs fixés par le grenelle de l'environnement. Cette utilisation croissante nécessite de plus en plus de matière première ainsi que des matériels de transformation. Ces machines de type déchiqueteuse / broyeur forestier consomme beaucoup d'énergie et dont la principale source est le pétrole. C'est pourquoi cette recherche propose dans un premier temps de définir un moyen d'évaluer la performance énergétique de ces machines puis dans un deuxième temps d'évaluer l'influence des paramètres de coupe sur la performance énergétique. Ce critère est défini comme le rapport entre la tonne de plaquettes sèches et l'énergie consommée par la déchiqueteuse. Il permettra d'évaluer une déchiqueteuse du marché. L'évaluation de la performance énergétique est réalisée en deux endroits distincts de la déchiqueteuse, proche de la coupe et de manière globale. Les différents résultats de l'influence des paramètres de coupe sont présentés afin de caractériser les plus importants dans le but d'une optimisation de la machine étudiée. Cette optimisation a permis de doubler la performance énergétique de la machine. La thèse a également mis en évidence les limites de l'utilisation de certains organes de sécurité réduisant la performance énergétique de 40%. Les différents travaux de recherche doivent permettre d'aider les concepteurs dans le dimensionnement de la source d'énergie nécessaire pour déchiqueter le bois.

Mots clés : Déchiqueteuse, broyeur, bois, puissance, consommation, énergie, coupe.

Abstract :

Consumption of fuelwood, mainly in the form of wood chips, is growing to achieve the goal fixed by the "Grenelle de l'Environment" Laws. Increasing wood chip production needs more and more raw materials and use of wood chippers or shredders is well established. These machines are very energy-consuming particularly in gasoline. First, this thesis presents original methods for measuring chipper performance and focuses on influence of cutting parameters on energy efficiency. Wood chipper energy performance is defined by the ratio between tonnes of dry wood chips and power consumed by the machine to produce them. Using energy efficiency determination method, all wood chippers will be compared and will help customer to choose the machine that consumes the least energy to produce wood chips. Wood chipper performance is measured at two different locations: one closer to the cutting area and the other at the wood chipper drive. The results show that wood chipper performance factor is properly defined and cutting parameters impacts wood chip performance. Cutting optimization halves the chipper fuel consumption to produce the same wood chips quantity. The results also show the limits of safeguard that reduce by 40% chipper performance. This thesis must help designers for developing more efficient machines to reduce their impact on the environment.

Keywords: Chipper, shredder, wood, power, fuel consumption, cutting.