

La coupe du bois vert

2.1 Introduction et principe des essais

La littérature a permis d'identifier l'influence de divers paramètres sur la fragmentation du copeau lors de l'équarrissage du bois vert. Néanmoins, les paramètres régissant les efforts de coupe générés par ce procédé ne sont pas encore quantifiés. Les mécanismes de coupe ainsi que l'état de la matière dans la zone de coupe sont très peu connus dans le cadre de l'équarrissage. (Pfeiffer, 2015) et (Kuljich et al., 2013) se sont récemment attachés à l'étude de ce problème. Le procédé de déchiquetage dispose d'une littérature plus fournie. Ce procédé « cousin » de l'équarrissage donne des indications sur les phénomènes mis en jeu lors de l'équarrissage mais elles ne sont pas toutes transposables à ce dernier. La principale faiblesse de cette comparaison réside dans les directions de coupe différentes des deux procédés. Dans le cadre de l'équarrissage, sans l'être parfaitement, le bois est sollicité de manière tangentielle, puisque la direction de coupe est parallèle aux cernes de croissance. Dans le cas du déchiquetage, il est à la fois sollicité radialement et tangentiellement, l'outil traversant l'intégralité de la section de tronc (ou de branche) et tous les cernes.

Restent les travaux généraux menés sur l'usinage du bois lors de la seconde transformation, c'est-à-dire très similaire au fraisage comme entendu conventionnellement dans l'usinage des matériaux métalliques. Etant donné le caractère hygroscopique du bois, on ne peut pas considérer les généralités connues sur l'usinage du bois sec comme forcément valides dans le cas du bois vert. En effet, la plupart des caractéristiques mécaniques du bois sont très sensiblement réduites dès qu'on utilise le bois à l'état vert (Kollmann, 1968). L'homothétie à faire en termes de sections coupées est également forte. Si en seconde transformation l'épaisseur moyenne de copeau est de l'ordre du millimètre, voire moins selon les opérations, elle est de plusieurs centimètres au cours de la coupe par canters.

L'objectif de la présente étude expérimentale est donc de compléter l'information disponible sur l'influence des principaux paramètres de coupe lors de l'usinage (à fortes sections) du bois vert sur les efforts de coupe, tout en vérifiant que les géométries de plaquettes obtenues sont bien en concordance avec les résultats de la littérature. On apportera une attention particulière à la régularité de la fragmentation. Les relations et tendances identifiées serviront de point de comparaison afin de valider le modèle numérique de coupe présenté et développé dans les chapitres suivants.

Pour mener à bien cette étude, en traitant chaque paramètre indépendamment, le procédé de coupe orthogonale (rabotage) sur Machine-Outil à Commande Numérique d'Usinage Grande Vitesse (MOCN UGV) a été privilégié (Figure 2.1) pour ses avantages suivants :

- Il permet une instrumentation très flexible car les fraiseuses à commande numérique possèdent des codeurs incrémentaux à haute résolution permettant de connaître les positions des éléments mobiles en temps réel. De plus, la table d'usinage est un environnement propice à l'implémentation de capteurs externes additionnels.
- Les efforts admissibles par ce type d'équipement sont relativement importants et permettent de retirer des sections importantes. Elles sont de plus, pour la plupart, très rigides.

- Cette configuration de coupe permet d'isoler les paramètres liés au procédé désirés car toutes les grandeurs sont paramétrables de manière indépendante et sont répétables au cours d'un essai.
- L'utilisation d'un mouvement linéaire simplifie grandement la détermination des positions et orientations dans la matière facilitant l'interprétation des résultats.

Notons néanmoins son principal défaut qui est de ne pas permettre une vitesse de coupe aussi élevée que sur un canter (2 m/s contre environ 60 m/s pour un canter), et des efforts tout de même moindres que lors de l'équarrissage. Les conditions de coupe (surtout en termes de vitesse) sont toutefois nettement supérieures à celles d'essais quasi-statiques comme nous le montrerons par la suite.

Configuration d'équarrissage

Configuration de coupe orthogonale

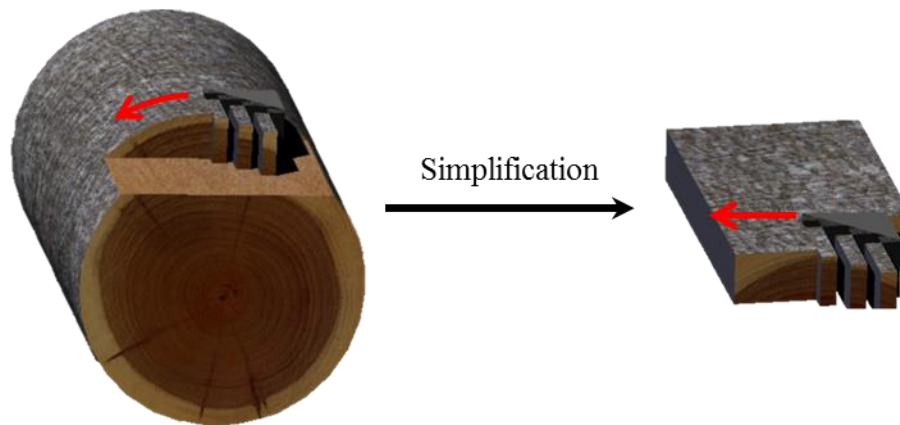


Figure 2.1 : Simplification de l'opération d'équarrissage (mouvement courbe) en opération de coupe orthogonale (mouvement linéaire).

2.1.1 La coupe orthogonale

2.1.1.1 Nomenclature

L'opération de coupe orthogonale (on parle également de « rabotage ») possède un vocabulaire propre qu'il convient d'utiliser et qui diffère de celui de l'équarrissage ou même du fraisage en général. Des grandeurs égales peuvent porter des noms différents. Le Tableau 2.1 propose un parallèle entre les deux nomenclatures afin d'éviter les ambiguïtés.

Tableau 2.1 : Nomenclature des essais de rabotages

Fraisage	Rabotage	Sur la plaquette	Notation
Avance à la dent	Epaisseur coupée	Longueur	h
Profondeur de passe	Largeur coupée	Largeur	b
Vitesse de coupe	Vitesse de coupe	N/A	V_c
Vitesse d'avance	N/A	N/A	N/A

Dans la suite de ce chapitre, ainsi que dans les deux suivants, le vocabulaire utilisé sera celui de la coupe orthogonale (rabotage). La troisième colonne du Tableau 2.1 indique également la correspondance entre les paramètres de coupe et les dimensions des plaquettes générées dans le cas de rabotage $90^\circ - 90^\circ$. En effet, si on considère que longueur – largeur – épaisseur des plaquettes correspondent aux directions longitudinale – radiale – tangentielle, dans ce cas particulier la longueur des plaquettes correspond à l'épaisseur coupée et la largeur à la largeur coupée. Dans le cas où la direction du fil varie, ce parallèle n'est plus exact pour la longueur de plaquette (voir Figure 2.2) mais un calcul trigonométrique permet de la recalculer aisément.

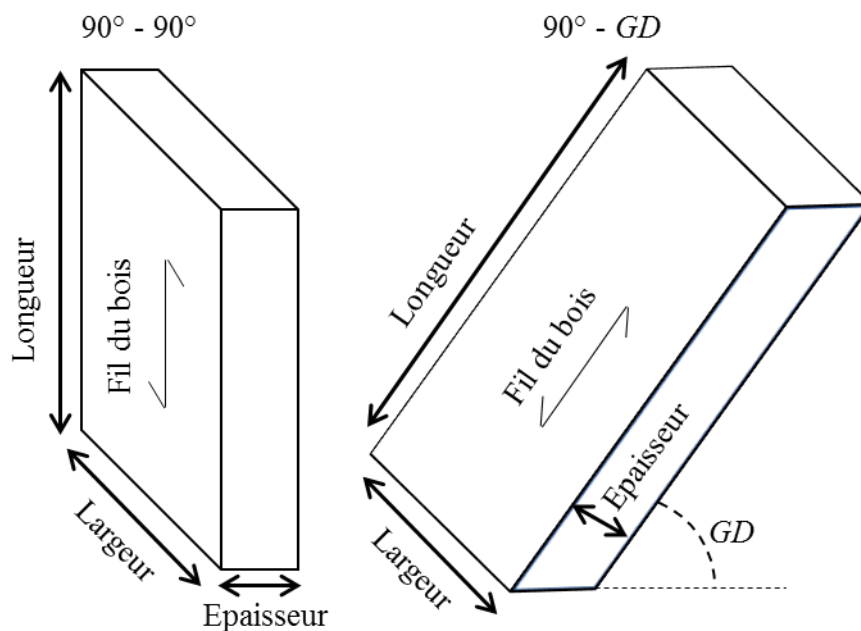


Figure 2.2 : Géométries des plaquettes produites en coupe 90° - 90° et 90° -GD.

2.1.2 Plan d'expérience

Une étude exhaustive de chaque paramètre identifié dans le premier chapitre comme influençant les efforts de coupe ou la fragmentation du copeau serait extrêmement ambitieuse. De plus, comme indiqué dans l'introduction, ce n'est pas la stratégie qui a été adoptée pour ces travaux de thèse. Aussi, des choix ont dû être effectués parmi les paramètres à étudier expérimentalement, ceux-ci sont basés sur des critères parfois subjectifs mais les sous-sections suivantes visent à expliciter les raisons de ces choix. Les paramètres retenus sont de natures variées : la section du copeau $h \times b$, la direction de coupe GD, la vitesse de coupe V_c , et l'angle de bec β . Le mode de coupe a également fait l'objet d'observations (Figure 2.3).

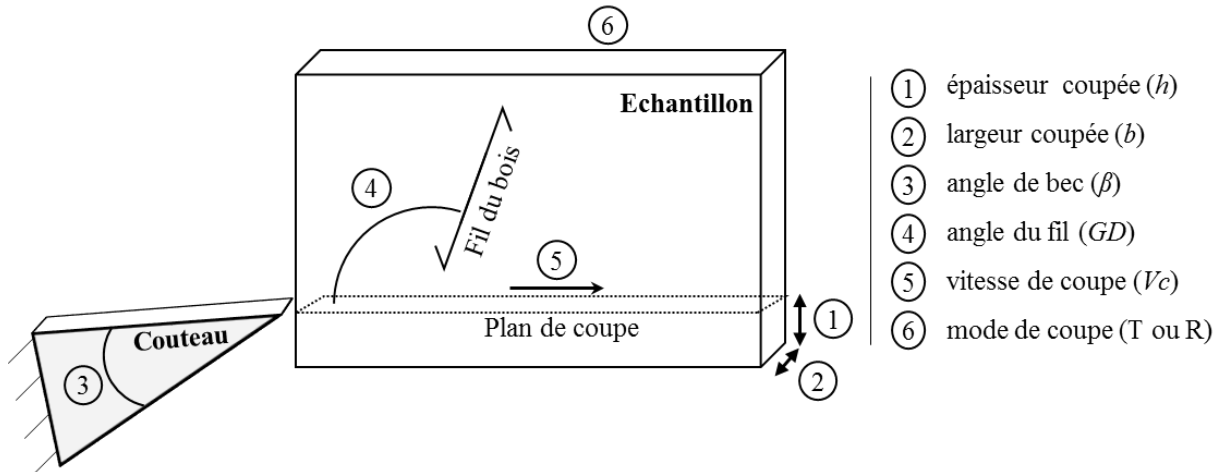


Figure 2.3 : paramètres de coupe retenus.

2.1.2.1 Section du copeau

La section du copeau ($h \times b$) est le critère fondamental régissant les efforts instantanés de coupe en usinage. Les deux grandeurs associées seront considérées séparément.

Largeur de coupe (b)

Seulement deux modalités de largeurs coupées ont été testées car il s'agit du paramètre sur lequel les effets sont connus dans la plage admissible de nos équipements les efforts étant généralement directement proportionnels à la largeur coupée. Les essais se font donc à titre de vérification avec les modalités choisies de 5 mm et 10 mm. Ces largeurs permettent de limiter les efforts de coupe tout en assurant une cohésion des plaquettes correcte comme il a pu être constaté lors des essais. Une largeur coupée plus fine entraînerait un risque de décohésion de la plaquette comme observé par (Pfeiffer, 2015) suivant les cernes ou toute autre singularité du bois entraînant une instabilité de fragmentation. Une largeur plus élevée générerait quant à elle des efforts trop importants réduisant les plages admissibles pour les autres paramètres de coupe plus « intéressants » car les essais présentés se font en limites de capacité de la MOCN (blocage de l'axe linéaire de la machine).

Épaisseur coupée (h)

L'état de l'art réalisé en premier chapitre montre que ce paramètre a déjà fait l'objet de plusieurs études dont les conclusions étaient une influence linéaire sur les efforts de coupe. Cependant la variabilité de ces résultats et la diversité des mécanismes de coupe décrits justifient que ce paramètre fasse l'objet d'une étude complémentaire. En particulier, chacune des études évaluant l'impact sur la fragmentation du copeau ont été conduites sur une plage relativement restreinte qui ne permet pas de décrire dans le même environnement expérimental une plage étendue et complète de variation d'épaisseur. Le parti pris a été d'étudier une plage la plus large possible dans les limites des moyens d'essais disponibles afin de disposer d'observations à même d'affiner le modèle de coupe proposé.

Les modalités de ce paramètre vont du millimètre jusqu'à 15 mm. Ainsi les sections coupées maximum seront de $10 \times 15 \text{ mm}^2$. Cette dimension précise a été étudiée par (Pfeiffer,

2015) et les efforts enregistrés avec un ensemble de paramètres proche de celui qui est employé, montrent des efforts à la limite de ceux considérés comme admissibles par notre montage de rabotage.

2.1.2.2 Direction de coupe (GD)

Les études présentées dans l'état de l'art ont montré que la position du billon n'est pas anodine au cours de l'équarrissage car elle modifie la cinématique de la coupe, notamment l'angle GD formé entre la direction de coupe et la direction du fil du bois ainsi que l'angle d'attaque (Kuljich et al., 2013; Laganière, 2004). Une limitation de ces travaux est la faible plage d'angles testés car l'étude ne concerne que des arbres de faibles diamètres. Hors les canters européens, et entre autres français, usinent des arbres aux diamètres bien plus importants et nécessitent donc des connaissances sur une plage plus étendue.

En conséquence, ce contexte impose d'étudier l'influence de cet angle (qu'on appellera GD) lorsqu'il varie de 10° à 110° . La littérature ayant déjà montré que la coupe à contre-fil est peu recommandée, l'attention sera portée sur les angles inférieurs à 90° et en particulier de 40° à 90° . Le plan d'expérience initial est d'adopter des pas de 5° avec 6 répétitions à chaque fois, hormis pour les très faibles angles (10° , 20° et 30°) où seulement 3 répétitions sont visées. Ceci dû au fait que ces angles sont extrêmement complexes à atteindre pour les canters actuels car ils leur demanderaient d'avoir un diamètre colossal (plusieurs mètres). Ces angles sont donc étudiés à titre purement exploratoire.

2.1.2.3 Vitesse de coupe (V_c)

Bien que la vitesse de coupe soit souvent considérée comme un facteur de second ordre pour la mesure des efforts de coupe, les vitesses accessibles par l'outillage utilisé (2 m/s maximum) sont éloignées (plus d'une décade) de celles de travail des canters (environ 60 m/s). Ce paramètre n'a pas non plus été étudié dans le cas précis de l'équarrissage sauf pour faire varier indirectement l'avance à la dent, mais il n'a pas été isolé. Les dispositifs expérimentaux qui permettraient de couper des sections importantes à des vitesses élevées sont plus des outils balistiques que des machines outil standard même UGV. C'est probablement la raison principale qui explique le peu de travaux menés sur ce paramètre. Cette problématique est d'ailleurs transversale au LaBoMaP qui réfléchit et développe depuis plusieurs années un banc de rabotage instrumenté à haute vitesse et haute capacité. Il est donc pour le moment souhaitable d'étudier l'effet d'une variation d'une décade dans la vitesse de coupe avec le dispositif actuel. Bien sûr, les résultats obtenus ne pourront pas être considérés comme parfaitement extrapolables à des vitesses plus élevées mais le dispositif en cours de développement pourra potentiellement apporter une réponse plus aboutie à cette problématique dans le futur.

2.1.2.4 Angles de coupe (angle d'attaque α et angle de bec β de l'outil)

Les expérimentations récentes de coupe orthogonales menées par S. Kuljich (Kuljich et al., 2013) montrent une diminution des efforts avec l'augmentation de l'angle d'attaque de 35° à

45° et plus. Une étude visant donc à confirmer cette tendance est mise en place. Quatre couteaux standards de canter réaffûtés présentant des angles de bec plus faibles, augmentant d'autant les angles d'attaques seront utilisés.

L'étude sera ainsi effectuée avec quatre modalités d'angle de bec : 32°, 35°, 38° et 40°. Il a été remarqué que les scieries apprécient l'emploi de couteaux à l'angle de bec proche de 35°. Donc la plage ciblée englobe cette valeur. Il n'a pas été jugé nécessaire de discrétiser plus finement cette plage car on s'attend à des variations d'efforts faibles qui risquent d'être peu perceptibles avec des variations de moins de 3° d'autant plus en intégrant la variabilité des échantillons intrinsèque au bois. Chaque essai est réalisé avec 5 répétitions.

2.1.2.5 *Mode de coupe*

Ce paramètre est très particulier. On ne peut pas le modifier sur un canter car il est inhérent à la profondeur de la dosse retirée et dans l'optique du développement d'un modèle numérique, le travail est envisagé uniquement en sollicitation tangentielle. Néanmoins il n'en reste pas moins intéressant puisqu'un canter travaille en coupe mixte radiale-tangentielle la plupart du temps (les cernes forment un angle de quelques degrés avec la direction de coupe). En coupe parfaitement tangentielle, l'effet des alternances de cernes est négligeable car ils sont parallèles à la direction de coupe. La coupe radiale permet, elle, d'observer proprement l'effet de cette alternance de cernes sur la coupe. Dix éprouvettes purement « radiales » ont donc été préparées et rabotées.

2.1.2.6 *Récapitulatif*

L'ensemble des paramètres étudiés, leurs modalités, et le nombre d'échantillons associés à chaque étude sont résumés dans le Tableau 2.2. Des échantillons peuvent être réutilisés dans plusieurs études, donc la somme totale de la troisième colonne (184) ne correspond pas tout à fait au nombre d'essais menés (174).

Notons également qu'une douzaine d'essais additionnels ne seront pas traités dans ce mémoire car les éprouvettes présentaient des singularités (principalement des nœuds) jugées acceptables initialement mais ayant finalement entraîné des arrachements de matière très importants ce qui aurait conduit à des interprétations potentiellement erronées.

Tableau 2.2 : Paramètres de l'étude et modalités associées

Paramètres	Valeurs	Nombres totaux d'échantillons
Epaisseur coupée	1 à 15 mm	41
Largeur coupée	5 et 10 mm	41
Direction de coupe	10° à 110°	55
Vitesse de coupe	0,2, 0,6 et 2 m/s	17
Angle de coupe	32°, 35°, 38°, 40°	16
Direction	T majoritairement, ou R	10 (R)

2.1.3 Eprouvettes de coupe orthogonale

2.1.3.1 Géométrie des épreuves

La géométrie des épreuves est présentée dans les Figures 2.3 et 2.4. Le schéma représente une épreuve typique. Les grandeurs chiffrées sont constantes lors de tous les essais. Les trois grandeurs restantes (direction du fil, épaisseur coupée et largeur coupée) sont variables.

Une épreuve typique est un échantillon de hêtre, coupé en dosse, qui mesure $105 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$ et présentant un fil perpendiculaire à la direction de coupe ($GD = 90^\circ$).

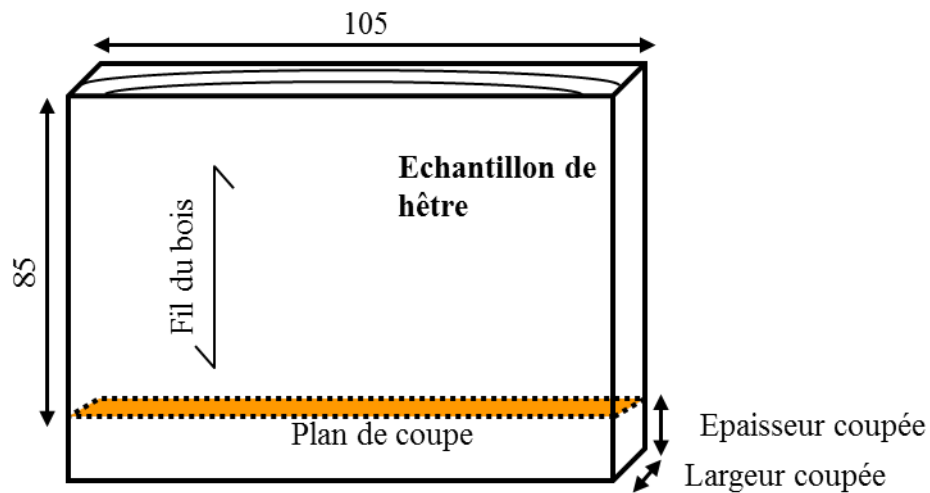


Figure 2.4 : Schéma des épreuves de rabotage.

2.1.3.2 Réalisation des épreuves

Le bois est approvisionné sous la forme de plots courts d'un mètre de long, 300 mm de découvert et 21 mm d'épaisseur. Les opérations d'usinages afin d'obtenir les épreuves sont les suivantes :

- 1) Débit des écorces sur scie circulaire pour préparer les plateaux.

- 2) Rabotage du plateau pour mise à l'épaisseur jusqu'à 10 mm (ou 5 mm selon les échantillons à réaliser au sein du plateau).
- 3) Débit sur MOCN (voir Figure 2.5) de l'éprouvette à l'aide d'un montage dédié. (Sauf pour les éprouvettes de l'étude portant sur la section coupée, voir paragraphe suivant).
- 4) Perçages sur machine à commande numérique des passages de vis nécessaires à la fixation des éprouvettes lors des essais visibles dans la Figure 2.5 (Sauf pour les éprouvettes de l'étude portant sur la section coupée).



Figure 2.4 : Réalisation des éprouvettes.

Les éprouvettes servant à l'étude du paramètre « épaisseur coupée » et du paramètre « largeur coupée » étant de longueurs très variables, le procédé d'obtention choisi est légèrement différent de celui énoncé précédemment. Après l'opération de rabotage, la mise à longueur des échantillons est faite en utilisant une scie circulaire et les perçages sur perceuse à colonne. Cela présente l'avantage de réaliser très rapidement des éprouvettes aux longueurs variées. Cependant, ce procédé est imprécis et les longueurs coupées peuvent être très erronées par rapport aux valeurs cibles. Les causes sont multiples : résolution de la règle, erreur de parallaxe, réglage des butées, souplesse de l'échantillon et de la lame, etc...). Ce problème est résolu par la mesure à posteriori de l'épaisseur coupée réelle lors de la coupe orthogonale sur les images de coupe (ce processus est décrit dans le paragraphe 2.3.3).

Pour des raisons différentes, les angles réglés sur la MOCN pour obtenir des directions données du fil dans les éprouvettes ne peuvent pas être utilisés comme tels, mais le traitement étant à la fois plus complexe et original, il sera lui aussi détaillé à part dans le paragraphe 2.3.4.

2.1.3.3 Stockage et préservation des éprouvettes

Le maintien et la maîtrise de l'humidité des éprouvettes de test pour rester dans des conditions proches de l'équarrissage est une difficulté majeure de ces expérimentations.

Le bois a été approvisionné le plus tard possible et les usinages des éprouvettes réalisés les jours précédant les essais pour garder les échantillons en masse jusqu'à ce moment afin de diminuer leur vitesse de désorption. Les plots ont été conservés en enceinte climatique régulée

à 4,5 °C et les éprouvettes dans la même enceinte mais protégées à l'aide d'un film étirable. Ensuite, le minimum de manipulation est fait entre l'usinage de l'éprouvette et le rabotage. S'il a été constaté que « filmer » les éprouvettes permet de réduire considérablement la perte de masse, cela ne protège pas des attaques de champignons, voir les favorise.

2.2 Procédures des essais de rabotage et des mesures

2.2.1 Montage expérimental

Le montage est réalisé sur une fraiseuse à commande numérique 3 axes DMG DMC 85. Cette machine, équipée de moteurs linéaires, a été détournée de son usage principal pour réaliser des opérations de coupe orthogonale. Ses axes linéaires présentent une rigidité élevée et un effort admissible d'environ 11 kN.

2.2.1.1 Montage mécanique

Le montage mécanique est composé de deux sous-ensembles cinématiques : l'un, comprenant l'outil, est fixe, le second est mobile et contient l'échantillon de bois à usiner.

Partie échantillon

L'échantillon est fixé dans un étau, vissé sur une équerre elle-même fixée à la tête de broche de la machine à commande numérique (Figure 2.6). L'équerre est une pièce mécanique dessinée et réalisée au sein du laboratoire initialement pour une application de rabotage du cuivre. L'étau a dû être spécifiquement conçu pour les besoins de cette thèse car les sections coupées impliquent une rigidité très importante. Ses spécifications sont présentées en annexe.

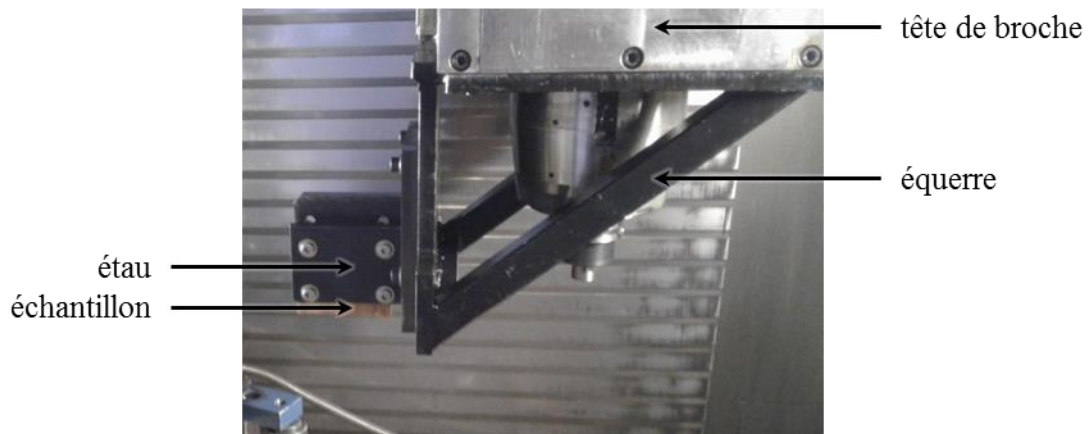


Figure 2.5 : Partie mobile du montage de rabotage.

Partie outil

L'outil est monté sur un porte-outil qui lui assure son inclinaison. Ce porte-outil est monté sur une plaque métallique permettant de réaliser la liaison entre l'outil et une platine de mesure d'effort. La platine est quant à elle montée sur une rehausse permettant de surélever l'ensemble afin de travailler à une hauteur suffisante pour que la tête de broche ne travaille pas en bout d'axe ce qui nuirait à sa raideur. Cette rehausse est directement bridée sur la table de la machine (Figure 2.7). Comme pour le porte outil, la conception et le dessin de la rehausse ont été réalisés au cours de la thèse. Ses spécifications se trouvent également en annexe.

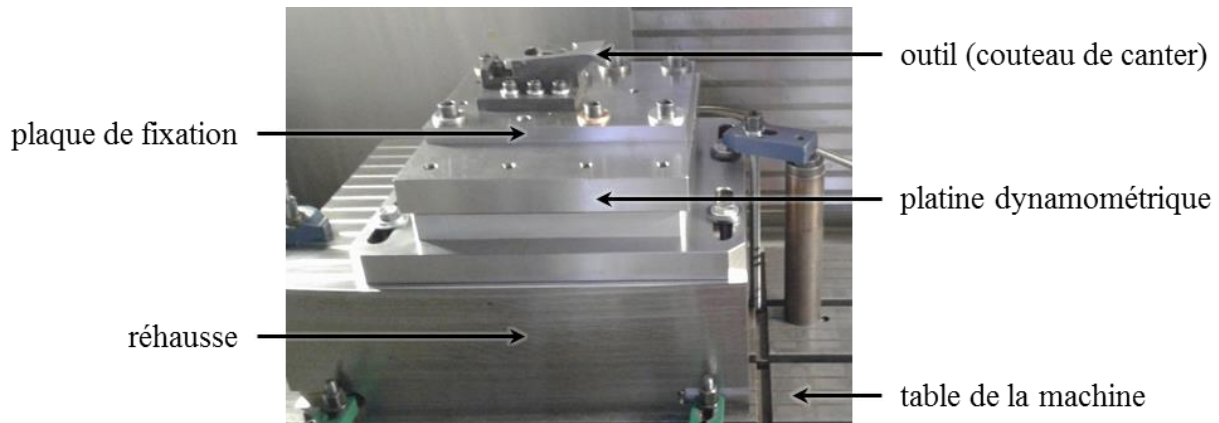


Figure 2.6 : Partie fixe du montage de rabotage.

Etant donné que ce montage n'était pas voué à des utilisations répétées fréquemment dans le temps, le positionnement des éléments a été réalisé par dégauchissage à l'aide d'un comparateur à levier, à 5 centièmes de millimètre sur 10 cm de mesure dans le moins bon cas, ce qui correspond au défaut de forme le plus critique présent dans le montage.

Deux orientations ont été particulièrement contrôlées : celle de la face de l'étau recevant l'échantillon par rapport aux axes de la machine, et celle de l'arête de l'outil par rapport aux axes de la machine.

2.2.1.2 L'opération de rabotage

La cinématique des essais de rabotage est très simple : l'échantillon est translaté en direction de l'outil, contrôlé par programmation dédiée. Solidaire de la tête de broche, il suit une rampe d'accélération jusqu'à un palier à vitesse constante V_c lors de la coupe (Figure 2.8), puis subit une rampe de décélération en bout de course. La zone de vitesse V_c est obtenue dans une zone relativement restreinte (110 mm) comparée aux 850 mm de course disponible sur l'axe X de la machine, aussi des échantillons plus longs ne sont pas envisageables. Ce qui est une conséquence directe des limitations de la machine en termes d'accélération et de vitesse. La hauteur de l'échantillon et de la tête de broche définissent l'épaisseur de copeau coupée.

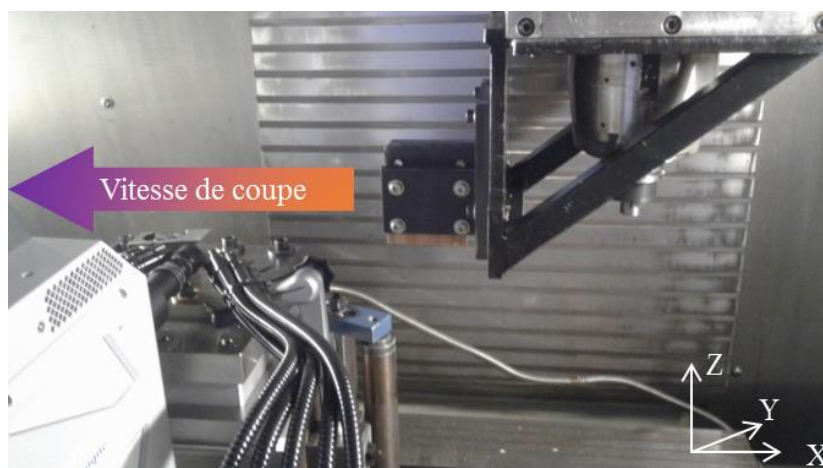


Figure 2.7 : Vue d'ensemble du montage et du mouvement de l'échantillon.

2.2.2 Mesure des positions

De nombreuses données sont enregistrées au cours de l'essai, certaines servent au traitement des essais, et d'autres à leur contrôle. Ces dernières sont réalisées grâce à des sorties analogiques programmées au sein du centre d'usinage via des modules ajoutés et délivrant des données machine à une fréquence de 250 Hz : il s'agit de la vitesse et position analogique des axes. Les puissances (en Watt) et charges (en % admissibles) des axes X et Z de la machine (voir Figure 2.8) sont également enregistrées pour vérifications régulières et se prémunir du blocage potentiel de l'axe machine.

En plus des sorties analogiques calculées par le centre d'usinage, le signal renvoyé par un codeur incrémental sur l'axe parallèle à la direction de coupe (X) est dérivé et enregistré. Il est traité par un comparateur différentiel pour ôter le bruit indésiré et un Arduino© comptant les fronts montants et descendants du signal afin de remonter aux positions de l'axe X. Ce signal de position est dérivé (temporellement) pour en déduire la vitesse de l'échantillon en temps réel.

2.2.3 Mesure des efforts

L'acquisition des efforts se fait par l'intermédiaire d'une platine dynamométrique à 3 composantes Kistler 9255A. Cet outillage permet de mesurer les efforts résultants (ainsi que les moments) dans les trois directions de l'espace. Ce type de platine est composé de deux plateaux assemblés entre eux par l'intermédiaire de quatre capteurs piézoélectriques. Le déplacement relatif d'un plateau (en l'occurrence le plateau supérieur) par rapport à l'autre (le plateau inférieur) engendre la déformation des capteurs piézoélectriques qui renvoient une charge proportionnelle à leur niveau de déformation. Cette charge est ensuite transmise par le biais d'un câble dit « sommateur » à très fort isolement et faible impédance à un amplificateur de charge où il est amplifié. De par sa conception, ce matériel renvoie des données en continu, mais l'acquisition est déclenchée par le programme d'usinage au moment du départ de la phase d'accélération de l'outil et stoppée à la fin de sa phase de décélération.

La fréquence d'acquisition est de 20 000 Hz. En effet la fréquence de résonance est estimée très approximativement dans la documentation constructeur à 1 500 Hz (1 690 Hz dans les directions X et Y après mesure par sonnage avec la masse embarquée de l'outil, donc il est possible de supposer que la fréquence propre de la platine est en fait bien supérieure à 1 500 Hz, puisque l'apport de masse embarquée devrait diminuer la fréquence propre de l'ensemble). Afin de pouvoir traiter le signal correctement, une fréquence d'acquisition au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans le signal (Shannon, 1949). Dans la pratique, il est plutôt considéré qu'une fréquence d'échantillonnage six à huit fois supérieure à la fréquence maximale est à privilégier afin d'observer des signaux fidèles à ceux renvoyés par le capteur. Or, la platine fonctionne comme un filtre passe-bas et présente une fréquence de coupure proche de sa fréquence de résonance autour de 2 000 Hz, on s'attend donc à avoir très peu de signal à des fréquences plus élevées. On considèrera donc cette fréquence comme la fréquence maximum ce qui nécessiterait d'acquérir les signaux à une

fréquence de 16 000 Hz. Le matériel ne nous permettant pas d'utiliser cette fréquence, et la limite de 2 000 Hz étant arbitraire, l'arrondi supérieur est fait pour atteindre les 20 000 Hz.

Précisons que la platine de mesure ne possède plus de certificat d'étalonnage à jour. Sa justesse a été vérifiée en la sollicitant de manière quasi-statique avec des masses en fontes connues. Les mesures enregistrées étaient cohérentes avec les masses utilisées. Cependant la plage de mesure de la platine est très supérieure à la gamme testée à l'aide des masses et la réponse de la platine dynamométrique n'est pas parfaitement linéaire sur l'intégralité de sa plage de mesure. Il est donc impossible de donner une incertitude aux mesures d'efforts réalisées, mais les précautions ont été prises pour avoir un niveau de confiance raisonnable dans les grandeurs mesurées.

2.2.4 Acquisition des images

L'acquisition d'images est réalisée grâce à une caméra ultra-rapide Photron SAZ complétée par une chaîne optique comprenant, une lentille, un tube de réglage et un objectif de microscope télécentrique Mitutoyo ML Finite Brightfield X1 (pas de zoom). Le tout est monté sur une tourelle de réglage X, Y et Z afin d'observer la zone souhaitée et d'optimiser la netteté. L'axe optique est dégauchi par rapport aux axes de la machine (sur le tube de réglage car c'est le seul à avoir une longueur d'appui suffisante pour le comparateur).

La caméra est déclenchée par un Arduino®, le signal de départ se faisant à une position codeur machine donnée correspondant à l'entrée de l'outil dans le champ visuel de la caméra. Cette position est définie au préalable par l'utilisateur.

L'acquisition se fait à 20 000 images par seconde. Pour un essai se déroulant à 2 m/s, l'échantillon se déplace de 0,1 mm entre chaque image.

Le champ visuel de la caméra sur l'échantillon est une aire d'un peu plus de 18 x 18 mm².

2.2.5 Acquisition et synchronisation des signaux

L'ensemble des signaux analogiques (SA) est enregistré par l'intermédiaire deux cartes d'acquisition NI9215 tandis que les signaux codeurs sont enregistrés par une carte NI9401. La synchronisation est réalisée par un rack NI cDaQ 9188 sur un signal trigger de commande. Seule la partie optique est indépendante de ce circuit d'acquisition. Le déclenchement de la caméra ultra-rapide s'effectue en fonction de la position mesurée via le codeur incrémental de la MOCN. L'acquisition des efforts et des positions (SA ou codeur) sont synchronisées par le rack. Une configuration très proche est détaillée par T. Baizeau (Baizeau et al., 2015).

2.2.6 Résumé des informations brutes enregistrées

L'ensemble des informations brutes mesurées et du matériel nécessaire à leur mesure, enregistrement, et déclenchement, est représenté dans le Tableau 2.3 et la Figure 2.9.

Tableau 2.3 : Récapitulatif des données brutes enregistrées

Type	Paramètre	Plage de mesure configurée	Résolution	Fréquence d'acquisition (Hz)
SA	Position X	N/A	Non calculée	20 000 (sync)
SA	Charge X	$\pm 100\%$	Non calculée	20 000 (sync)
SA	Puissance X	$\pm 10\,000\text{ W}$	Non calculée	20 000 (sync)
SA	Charge Z	$\pm 100\%$	Non calculée	20 000 (sync)
SA	Puissance Z	$\pm 10\,000\text{ W}$	Non calculée	20 000 (sync)
Codeur	Position X	N/A	$2\text{ }\mu\text{m}$	20 000 (sync)
Platine	F_x	$\pm 3\,000\text{ N}$	$\approx 0,09\text{ N}$	20 000 (sync)
Platine	F_y	$\pm 1\,000\text{ N}$	$\approx 0,03\text{ N}$	20 000 (sync)
Platine	F_z	$\pm 3\,000\text{ N}$	$\approx 0,09\text{ N}$	20 000 (sync)
Caméra	Image	N/A	$17,58 \times 17,58\text{ }\mu\text{m}^2/\text{pixel}$	20 000

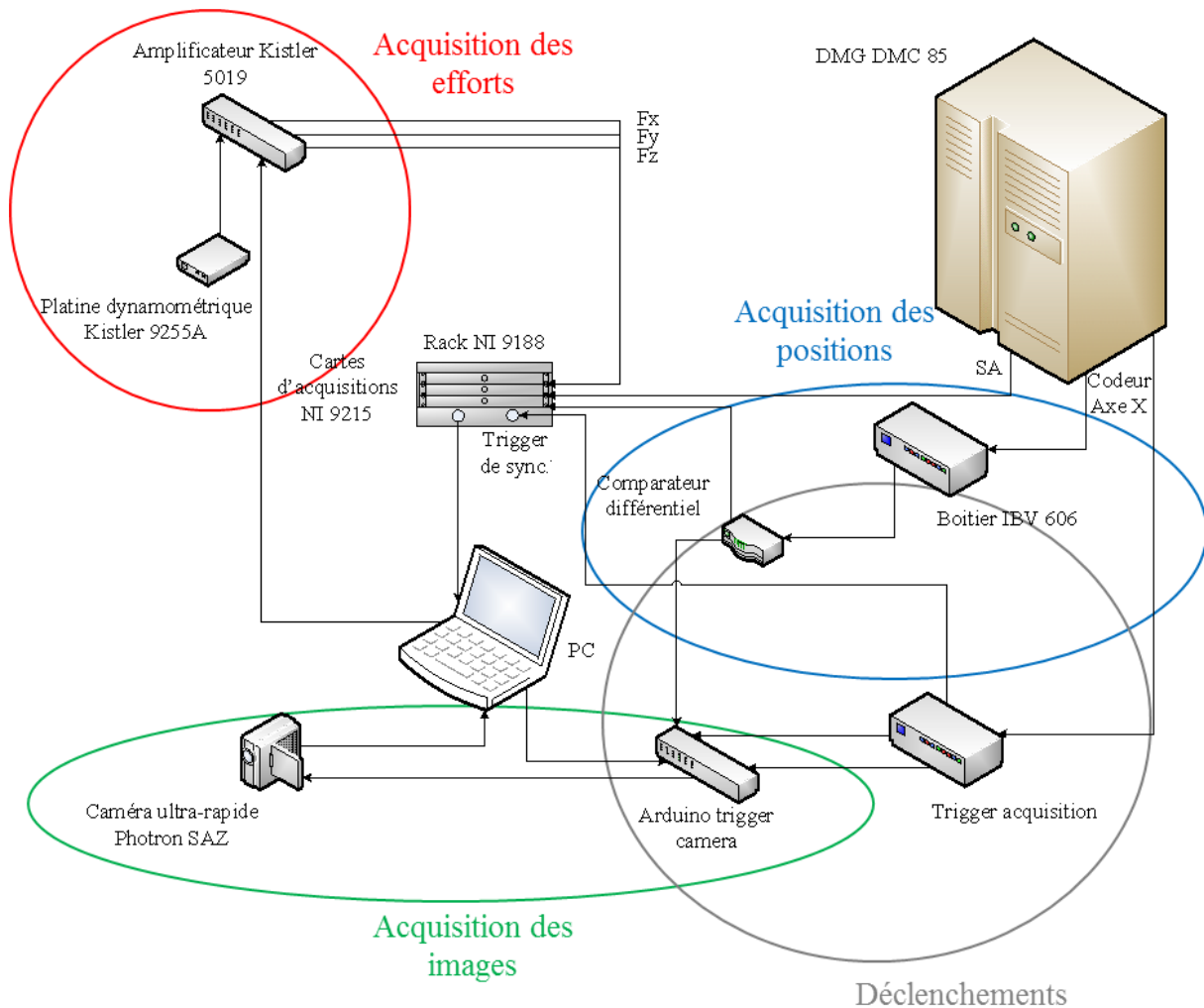


Figure 2.8 : Chaîne d'acquisitions des données des essais de coupe inspirée de (Baizeau et al., 2015).

2.3 Procédures des traitements

2.3.1 Zone d'étude

Le parti-pris est d'étudier une zone d'étude ne comprenant pas l'intégralité de l'échantillon usiné. Durant la phase d'entrée de l'outil dans l'échantillon, la zone de contact entre ces deux entités évolue fortement. Elle n'est donc pas considérée dans le traitement des données. La sortie se fait avec un arrachement de matière dans beaucoup de cas. Elle est donc négligée également. Qu'il s'agisse de l'entrée en matière ou de la fin de l'échantillon, les phénomènes observés sont eux aussi riches d'enseignements sur le comportement du bois vert pendant l'usinage, mais l'objectif de cette thèse est de développer un modèle DEM réaliste de la coupe de bois vert par fraisage. En première approche, il est plus direct de se focaliser sur des phénomènes stabilisés. Nous étudions donc seulement la zone « centrale » de la coupe de l'échantillon lors du traitement des données (Figure 2.10).

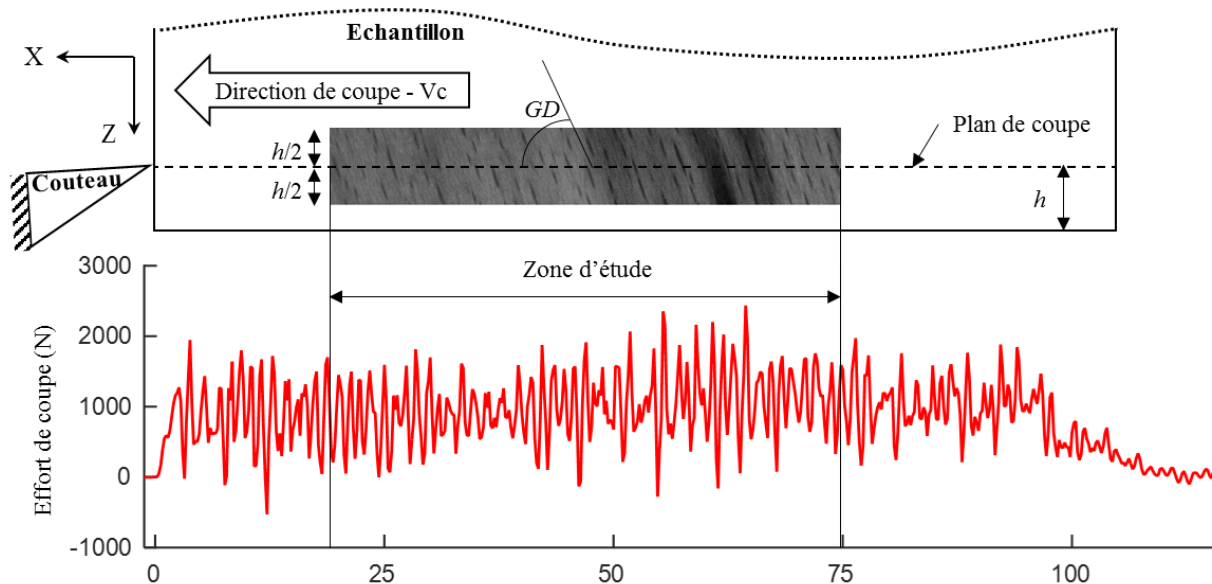


Figure 2.9 : Zone d'étude des essais de coupe et relevé de l'effort correspondant.

2.3.2 Traitement des efforts

La Figure 2.11 présente des efforts typiques des essais réalisés dans la direction de coupe mesurés sur le couteau. Les directions X, Y et Z sont celles de la platine de mesure d'effort (Ses axes sont dirigées selon les mêmes directions que celles de la MOCN, seul leur sens diffère).

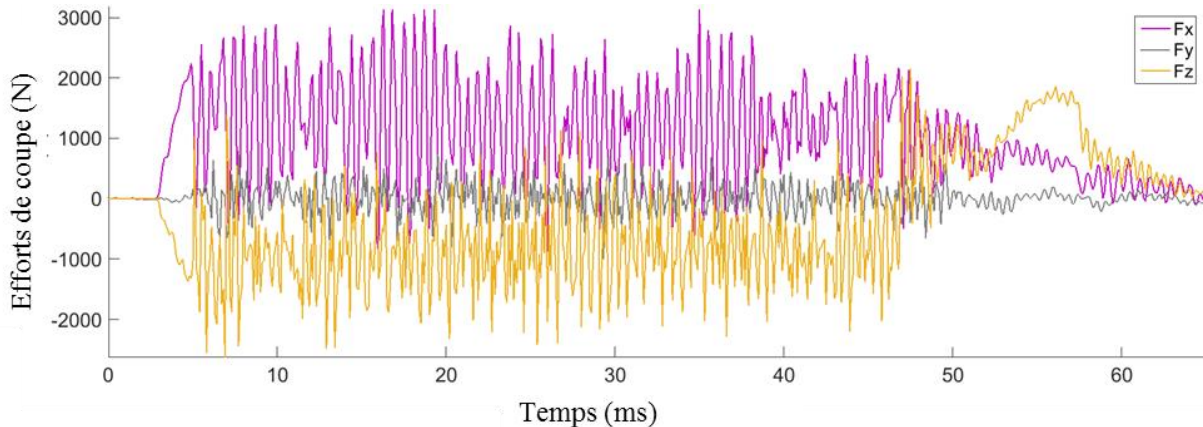


Figure 2.10 : Relevé des efforts de coupe mesurés par la platine dynamométrique lors de l'usinage d'un échantillon.

La mesure est fortement oscillante. Si l'alternance de pics d'efforts et de creux est prévisible pour des essais de coupe où le copeau se fragmente, les oscillations observées ici ne sont pas liées à ce phénomène (du moins directement). Deux indices permettent d'affirmer ceci. Le premier, basé sur l'observation du signal temporel est que les creux d'efforts renvoient occasionnellement des valeurs négatives. Le second nécessite de regarder l'autospectre du signal, on remarque ainsi que la fréquence la plus énergique est la fréquence de résonance de la platine (1690 Hz), et en effet la période des oscillations observées correspond bien à cette fréquence. Il s'agit d'un écueil bien connu dans la mesure des efforts de coupe en fraisage où l'aspect dynamique de l'observation génère fréquemment de ce type de signaux bruts.

Dans le cadre où l'on souhaite déterminer des tendances sur les efforts de coupe, il suffit de moyenner le signal sur une zone donnée (voir 2.3.1). Les efforts présentés dans les prochaines sections seront donc simplement moyennés.

Néanmoins, les essais à plus faibles vitesses, qui sollicitent beaucoup moins la fréquence de résonance du dynamomètre montrent qu'il est possible d'observer la montée en effort due à la compression du copeau et la chute brutale liée à sa rupture. La question se pose donc de savoir si oui ou non cette information est toujours présente même dans les signaux bruités comme ci-dessus. Pour faire face à ce problème il faut utiliser des techniques de traitements du signal liés à la compensation dynamique des signaux (Altintas & Park, 2004). Cette investigation a été réalisée, basée sur une méthode déjà publiée (Girardin et al., 2010). Ce traitement donne des résultats très prometteurs exposés en fin de chapitre (section 2.8).

2.3.3 Mesure des plaquettes

2.3.3.1 Mesure de l'épaisseur

La mesure des plaquettes peut être réalisée par divers moyens selon l'application. Dans une optique de rendements industriels purs, la meilleure solution est d'utiliser le système de grilles comme préconisé par les normes. Ainsi, il est possible de connaître exactement sans avoir à mener aucun calcul la proportion (massique) de plaquettes acceptables, rejetées, fines, etc.

Ce système de calibration des plaquettes est souvent adopté par les scieries avec un nombre de cribles limités (utilisation de deux ou trois grilles).

Cette solution n'a pas été retenue pour une raison double. D'une part, on souhaite définir une tendance plus fine et non discrète. D'autre part, les sections coupées étant plus faibles que celles usuelles en scierie, réaliser une homothétie sur la taille des tamis normés rajoute un degré d'extrapolation supplémentaire à l'étude.

Une deuxième solution serait de mesurer physiquement chaque plaquette par des moyens de métrologie, tels qu'un pied à coulisse ou d'un mesureur d'épaisseur. Les plaquettes séchant très rapidement à cause de leur faible volume, les variations dimensionnelles seraient telles que la mesure devrait être effectuée instantanément après la coupe. Si la solution est envisageable, elle se révèle extrêmement fastidieuse pour des mesures aussi nombreuses et il est complexe d'exprimer son incertitude.

La solution retenue est la mesure numérique des plaquettes sur les images enregistrées des essais. Idéalement, un traitement automatisé est possible, mais se heurtant à au moins 3 principales difficultés : le caractère mobile de l'échantillon et des plaquettes, les mouvements hors plans des plaquettes, et les différents faciès de rupture possibles.

La mesure est donc réalisée intégralement manuellement. L'instant de séparation des plaquettes est relevé pour chaque plaquette et l'écart de temps entre deux séparations, converti en différence de position de l'échantillon entre ces deux instants, indique l'épaisseur de la plaquette générée (Figure 2.12). Dans le cas d'angles de fil différent de 90° , l'épaisseur doit être corrigée (voir Figure 2.2) à l'aide de $\sin(GD)$. Cette hypothèse implique que les plaquettes sont parfaitement fragmentées selon le fil du bois. Dans le cas des plaquettes bien conditionnées, cette assertion est très juste ; dans le cas des gros arrachements de matière, elle est plus contestable. Ces derniers sont néanmoins très rares et l'imprécision faite a une importance mineure car l'épaisseur est déjà très grande par rapport à celle des plaquettes bien formées.

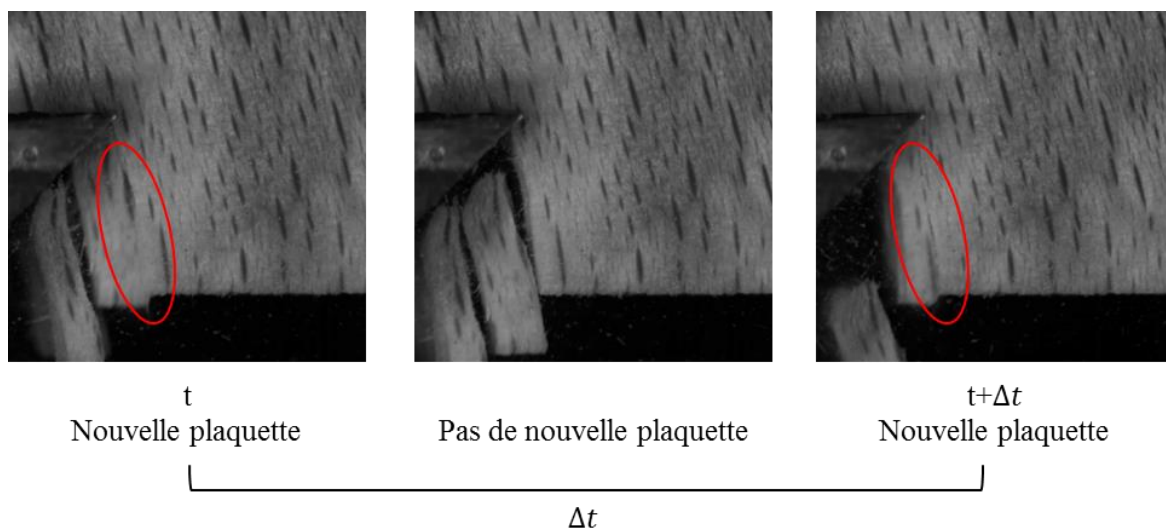


Figure 2.11 : Laps de temps entre la production de deux plaquettes successives.

Aucune erreur liée à l'opérateur ne sera considérée dans la détection de l'instant de fissuration puisque dans la grande majorité des cas la séparation est très marquée. Il est cependant impossible de s'affranchir de l'erreur de résolution qui correspond au pas de position entre deux images qui a été calculé à 0,1 mm. Cette erreur n'est pour autant pas négligeable dans le cas de plaquettes très fines car elle peut vite engendrer une incertitude de plus de 10%.

2.3.3.2 *Mesure de la longueur*

La mesure de la longueur des plaquettes concerne uniquement les éprouvettes réalisées sur scie circulaire dans le but de faire varier l'épaisseur coupée. Les mesures sont elles aussi réalisées sur les images enregistrées lors des essais de coupe. Le traitement a été mené sur ImageJ. Dans un premier temps, un réglet (très fin) a été positionné sur la surface de l'éprouvette pour calibrer les dimensions d'un pixel. Pour s'affranchir de l'erreur de résolution du réglet, la distance entre les deux mêmes côtés de deux graduations les plus espacées possible est divisée par le nombre de pixels compris entre ces deux. L'hypothèse est faite que le réglet est parfaitement parallèle aux côtés des pixels. Ainsi l'incertitude est seulement d'un pixel ce qui correspond à environ 2 centièmes de millimètre. Réparti entre tous les pixels cette incertitude devient négligeable.

Au final, l'opération la moins robuste est le positionnement au niveau de l'arête, qui est réalisé avec environ 5 pixels d'erreur, ce qui équivaut à 0,1 mm d'erreur.

2.3.4 **Mesure des angles réels des échantillons par traitement des images**

Le protocole de fabrication des éprouvettes afin d'obtenir des orientations du fil différentes étant en boucle ouverte, il ne permet pas d'anticiper les variations du fil au sein du bois. Aussi des erreurs peuvent exister dans l'orientation locale estimée du fil dans les éprouvettes usinées. Il s'agit d'un point essentiel dans la construction du modèle. L'information locale de l'orientation des fibres est riche et nécessaire ce qui impose de développer une méthode de mesure objective durant les essais.

La problématique liée à ces mesures ressemble à celle liée à la mesure des épaisseurs de plaquettes. Des méthodes performantes de mesures de l'orientation des fibres existent et ont été éprouvées dans la littérature (Daval et al., 2015; Nyström, 2003; Simonaho et al., 2004). Le LaBoMaP est d'ailleurs équipé de l'outillage nécessaire à la réalisation de ces mesures. Toutefois, réaliser ces mesures avant les essais de coupes serait une cause supplémentaire de perte d'humidité des échantillons.

Donc, dans une logique similaire à celle appliquée pour la mesure des plaquettes, une méthode numérique de la mesure de la pente de fil sur les images enregistrées a été mise en place. Cette méthode est inspirée de travaux récents qui ont utilisé la texture inhérente au bois de hêtre afin d'estimer la direction du fil du bois par traitement d'image (Ehrhart et al., 2017).

Un script a ainsi été développé afin de traiter les images de coupe enregistrées pour y détecter les rayons ligneux et leur orientation (voir Figure 2.13). Des séries de six images sont traitées pour chaque essai afin de couvrir l'intégralité de la zone d'étude. Les images en

niveaux de gris sont seuillées et binarisées afin d'isoler les rayons ligneux du reste de l'image. Leurs contours sont détectés et remplis pour former des clusters de points en lieu et place des rayons ligneux. Les directions principales de ces clusters sont déterminées par une analyse en composantes principales. Les vecteurs propres de la matrice de covariance et les valeurs propres correspondantes sont ainsi calculées. Le premier vecteur propre de chaque cluster indique sa direction dans laquelle il est le plus allongé tandis que le second est la direction orthogonale à la première. L'observation des rayons ligneux semble indiquer que l'allongement de ces derniers est dirigé selon les fibres du bois dans le plan RT. En se basant sur cette hypothèse, chaque vecteur propre devient donc un indicateur local de la direction du fil du bois. En plus de ce traitement, tous les contours englobant une surface trop petite ou ceux avec un ratio de valeurs propres trop faibles sont éliminés. On évite ainsi de se baser sur des rayons ligneux trop petits ou ronds pour calculer une direction, privilégiant les plus allongés. Dans les cas où des petits nœuds ou des taches de couleur contrastées sont présents sur la face de l'échantillon, cette condition permet également de ne pas les prendre en compte. Une fois que toutes les directions des rayons ligneux présents dans le lot d'images sont calculées, elles sont moyennées pour estimer la direction moyenne du fil dans l'échantillon.

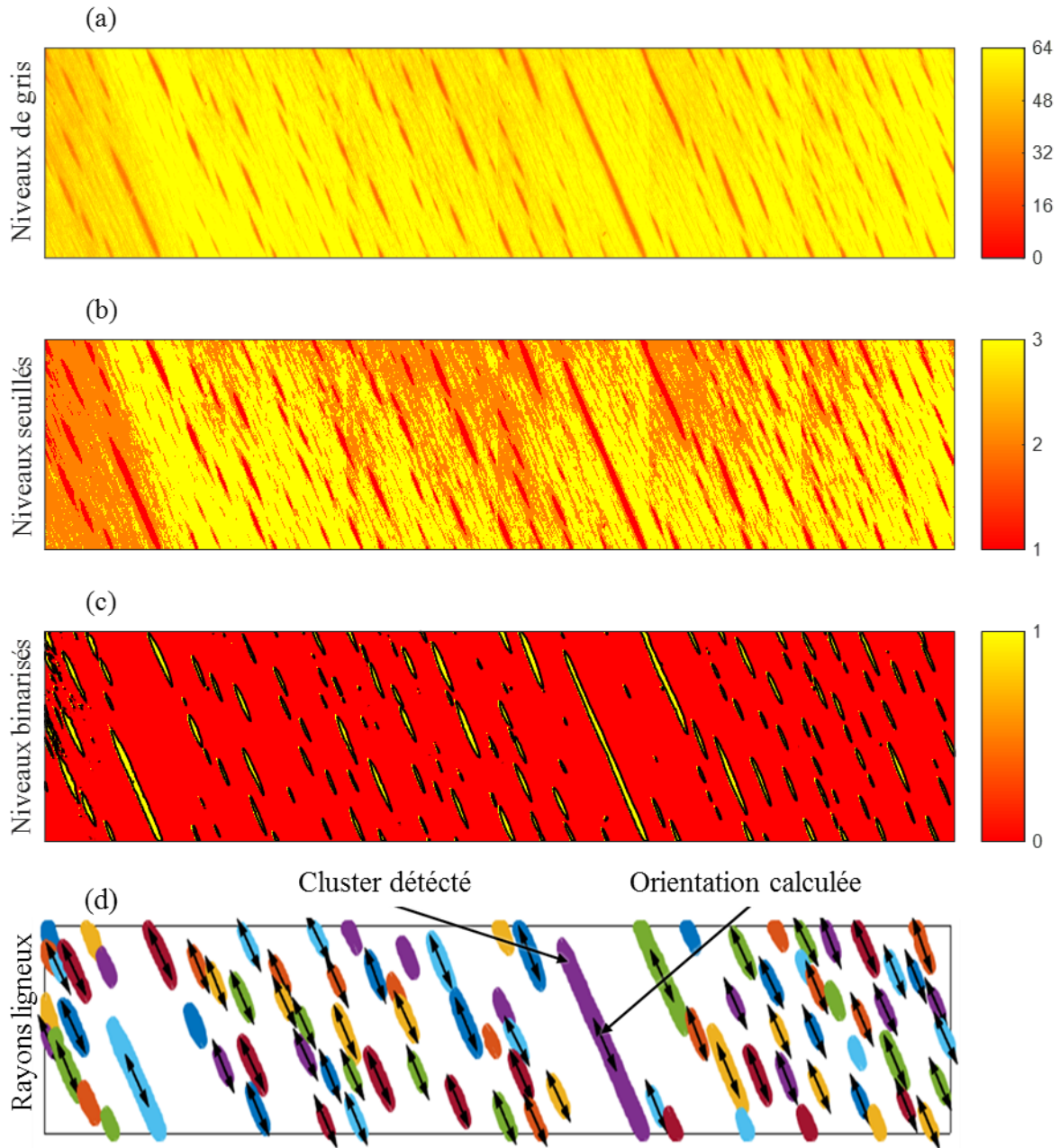


Figure 2.12 : Procédure de calcul de l'angle du fil moyen dans les échantillons. (a) Etat initial des images (12 bits convertis en 8 bits pour le traitement). (b) Image multi-seuillée. (c) Image binarisée. (d) Clusters de points et directions associées calculées si considérés comme valides.

Cette procédure est importante à réaliser car le fil peut beaucoup varier au sein d'une planche. Ceci est mis en exergue par les différences calculées entre la pente de fil théorique réglée sur la fraiseuse à commande numérique et celle mesurée sur les images (voir Figure 2.14a et 2.14b). L'erreur relative à beau être bien centrée autour de 0, beaucoup dépassent 5% d'erreur en valeurs absolues. Cela signifie a priori que le processus d'obtention des éprouvettes est correctement réglé puisque l'erreur moyenne est bonne, mais les fluctuations du fil obligent à retraiter les angles, à minima quand c'est cette grandeur qui est étudiée.

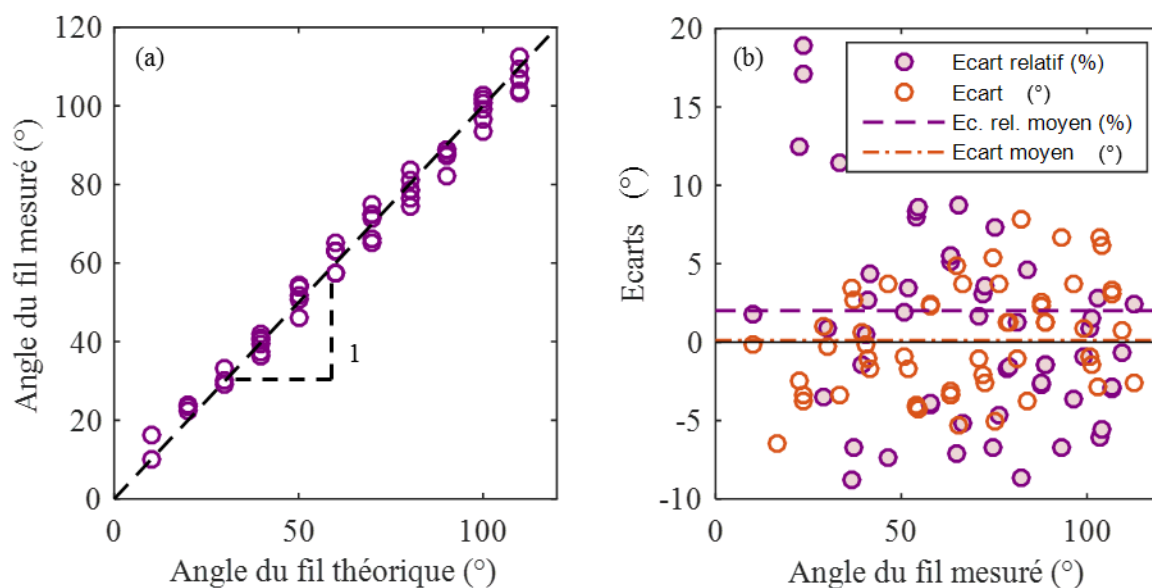


Figure 2.13 : (a) Angle du fil mesuré numériquement en fonction de l'angle de fil théorique. (b) Écarts et erreurs relative entre angle du fil mesuré et théorique. Un point singulier (erreur relative de 60% pour un angle du fil théorique de 17°) n'est pas représenté pour la lisibilité.

2.3.5 Résumé des paramètres traités

Quatre données majeures vont servir à l'analyse des essais de coupe. Elles sont rappelées Tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Grandeurs mesurées lors des essais de coupe

Paramètre	Moyen ou méthode de mesure	Source potentielle d'erreur
Efforts moyens de coupe dans les trois directions de l'espace	Platine de mesure d'efforts	Calibrage
Epaisseur de plaquette	Détection de fragmentations sur images de coupe	Résolution (0.1 mm)
Longueur de plaquette	Mesure sur images de coupe	Opérateur (0.1 mm)
Direction du fil du bois	Traitement d'image	Fiabilité de l'hypothèse de l'allongement des clusters de rayons ligneux selon le fil

Deux données complémentaires, mesurées après les essais s'ajoutent à cet ensemble de données : l'humidité et l'infradensité des échantillons.

2.4 Mesure de champs lors des essais de coupe

2.4.1 Introduction

Des mesures de champs ont été réalisées par corrélations d'images sur la base des images prises via la caméra ultra-rapide lors des essais de coupes. Afin d'obtenir une image complète des 105 mm de long de l'éprouvette une stratégie précise a dû être mise en place.

Pour rappel, la mesure de champs par corrélation d'images consiste en la comparaison de deux images (ou plus) afin de déterminer, les éventuels déplacements moyens de zones d'intérêt (qui correspondent à un ensemble de pixels) ayant eu lieu d'une image à l'autre ; ces déplacements peuvent être forcés comme devant être cinématiquement admissibles dans le cas de besoins spécifiques. De ces déplacements peuvent être déduites les déformations de la matière. Une image est dite « de référence » tandis que l'autre est dite « déformée ». Cette technique s'applique aussi bien à des champs 2D que 3D (dans ce dernier cas, au moins un second point de vue est nécessaire au même instant via un autre imageur, cela nécessite une étape de calibration entre les deux points de vue).

Déterminer les déformations dans l'échantillon lors des essais de coupe permettrait de juger de la fidélité des sollicitations et des champs de déplacement (ou de déformation) au sein des modèles DEM par rapport aux expériences et ainsi d'évaluer la robustesse de l'approche numérique proposée.

2.4.2 Mise en place de la corrélation d'images

S'il est relativement aisé de réaliser des traitements par corrélations d'images sur la partie initiale de la coupe de l'échantillon, car le bois entre non déformé au contact de l'outil et une image de référence est incluse dans le film de la coupe, dans la zone d'étude centrale à l'échantillon, le processus est par contre plus complexe. En effet, dans cette zone, nous ne disposons pas immédiatement d'une image de référence de l'échantillon non déformé par l'action de coupe. Lorsque du bois entre dans le champ de vision de la caméra, il est susceptible d'être déjà déformé par l'action de coupe sans que l'on puisse estimer, sans extrapolation, son niveau de déformation. De plus, traiter les images par incrémentation des déformations présente le risque d'accumuler les erreurs, et le nombre d'itérations nécessaires peut s'avérer élevé dans notre cas d'étude.

Pour pallier à ce problème, une stratégie de « double-passe » est proposée. Avant chaque essai (dédié aux traitements par corrélations d'image, car le procédé fait perdre quelques minutes amplifiant d'autant plus la perte d'humidité de l'échantillon), l'outil est démonté et une première passe de l'échantillon, sans coupe, est faite devant la caméra dans les conditions cinématiques similaires. Un jeu d'images de l'échantillon non déformé aux mêmes instants que lors de la future coupe de ce même échantillon est ainsi obtenu. Dans un second temps, l'outil est remonté (la répétabilité de sa position et de son orientation étant assurée par l'emploi de 3 cales générant un positionnement isostatique) puis une passe « normale » est réalisée, en enregistrant un deuxième jeu d'images. Les images de ces deux ensembles sont

ensuite corrélées une à une. Nous obtenons ainsi un champ de déplacement dans une zone fixe autour de l'outil évoluant au cours du temps et du déplacement de l'échantillon.

2.4.3 Qualité de la corrélation en fonction de la préparation des échantillons

Il est d'usage lors de mesures de corrélation d'images de texturer l'éprouvette avec du mouchetis peint ou un éventuel traitement de la surface à observer ; ce prétraitement devant être adéquat afin d'optimiser les contrastes et la taille des motifs de la texture observée.

Dans ce but, quatre éprouvettes tests (de hêtre sec) ont été usinées sur lesquelles nous avons appliqué 3 densités de mouchetis (une de contrôle n'ayant pas été mouchetée). Deux critères ont été observés pour juger de leur impact : l'étalement du spectre (Figure 2.15) des niveaux de gris des images et l'erreur de corrélation moyenne renvoyée par le logiciel de corrélation d'images CorreliQ4 développé par le laboratoire LMT de Cachan.

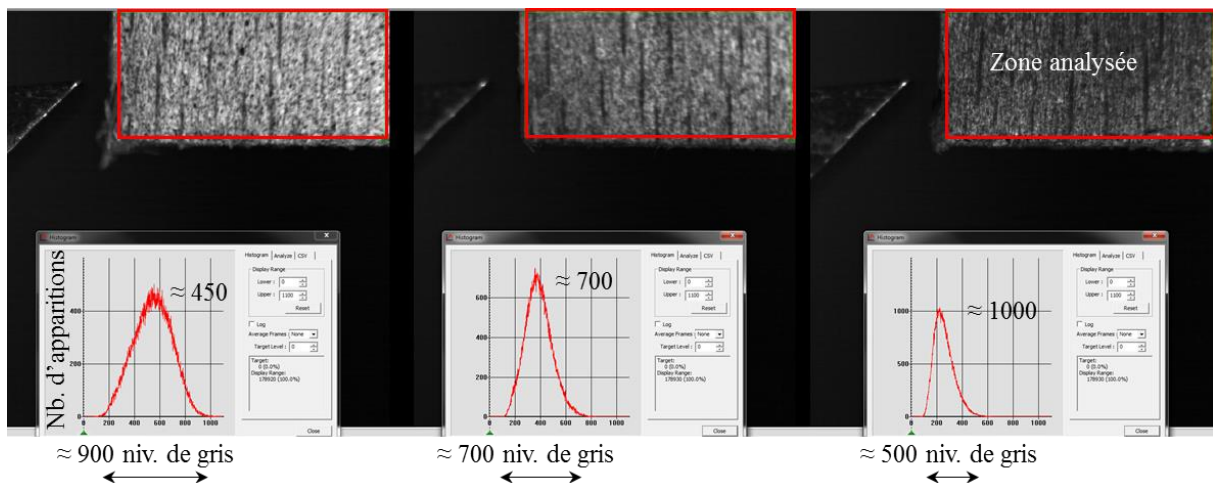


Figure 2.14 : Histogrammes enregistrés pour les trois nuances de densité de mouchetis testées.

Il a été conclu que le premier niveau de densité de mouchetis fournissait le meilleur résultat, maximisant les différences de niveaux de gris (environ 900 niveaux de gris pour une dynamique du capteur de 12 bits soit 4096 niveaux de gris disponibles) et minimisant l'erreur moyenne de corrélation, devant l'absence de mouchetis et les deux niveaux de mouchetis plus denses. Tous les mouchetis ont donc été réalisés, du mieux possible, en concordance avec ces résultats. Il est tout de même notable que la texture naturelle inhérente au bois de hêtre en coupe LT (ou LR) permet de réaliser des traitements par corrélation d'image sans application de mouchetis (dans les conditions cinématiques et optiques des expériences présentes). Il a néanmoins été préféré par simple sécurité de toujours appliquer un mouchetis léger sur la surface observée de tous les échantillons analysés par corrélation d'images. Remarquons que la forte humidité interne du bois n'a que très peu nui à la tenue du mouchetis sur l'éprouvette.

2.4.4 Premiers résultats

Afin de valider la méthode, des essais de corrélations d'images ont été réalisés sur des éprouvettes tangentielle (LT), mais aussi sur des éprouvettes radiales (LR) (Figures 2.16 et 2.17). Lors des essais menés par R. Pfeiffer, il était possible d'observer des bandes de compressions en amont de l'outil qui ont été dans un premier temps associées aux zones d'apparitions futures des plaquettes. Après examens de ces résultats, nous avons émis l'hypothèse que les deux zones étaient peu corrélées, et que ces bandes étaient plutôt dues à l'alternance bois de printemps – bois d'été au sein des éprouvettes coupées. C'est pour vérifier cette théorie que des éprouvettes LR ont été coupées, en plus d'éprouvettes de douglas aux cernes bien plus larges.

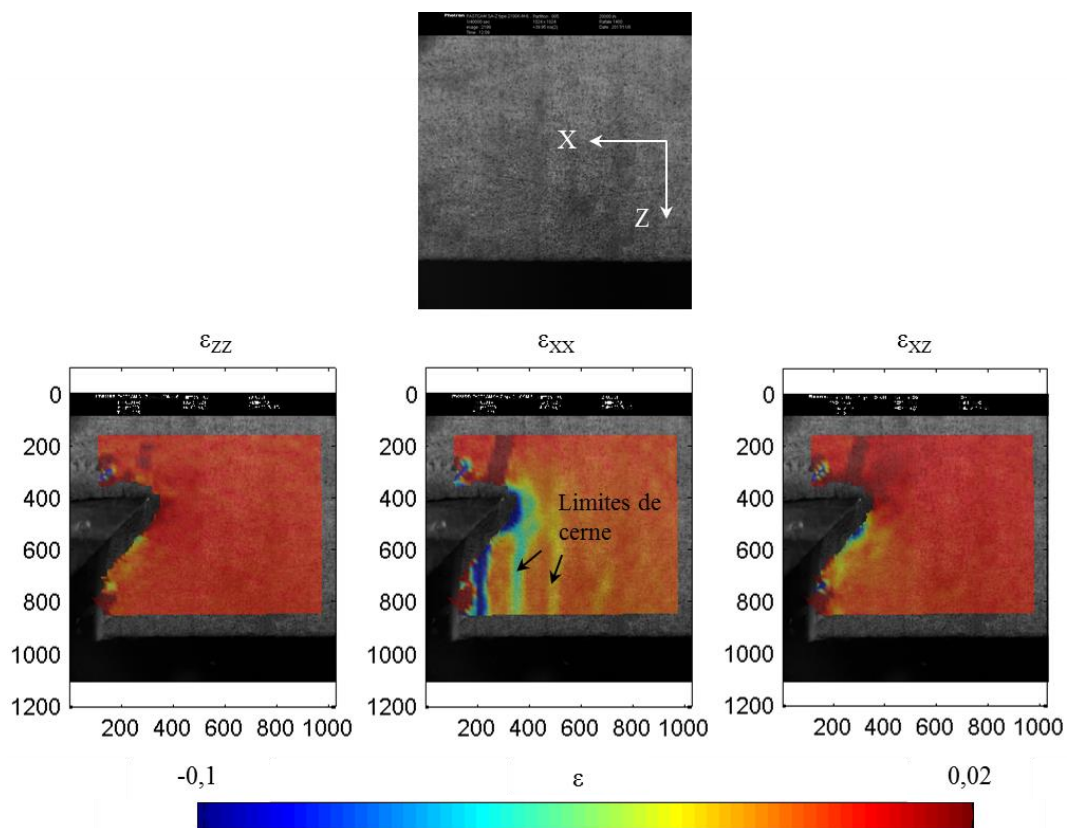


Figure 2.15 : Image non déformée et déformées par l'action de coupe d'éprouvette de hêtre vert coupée dans le plan LR (lissage par zone de convolution de 9 zones d'intérêts).

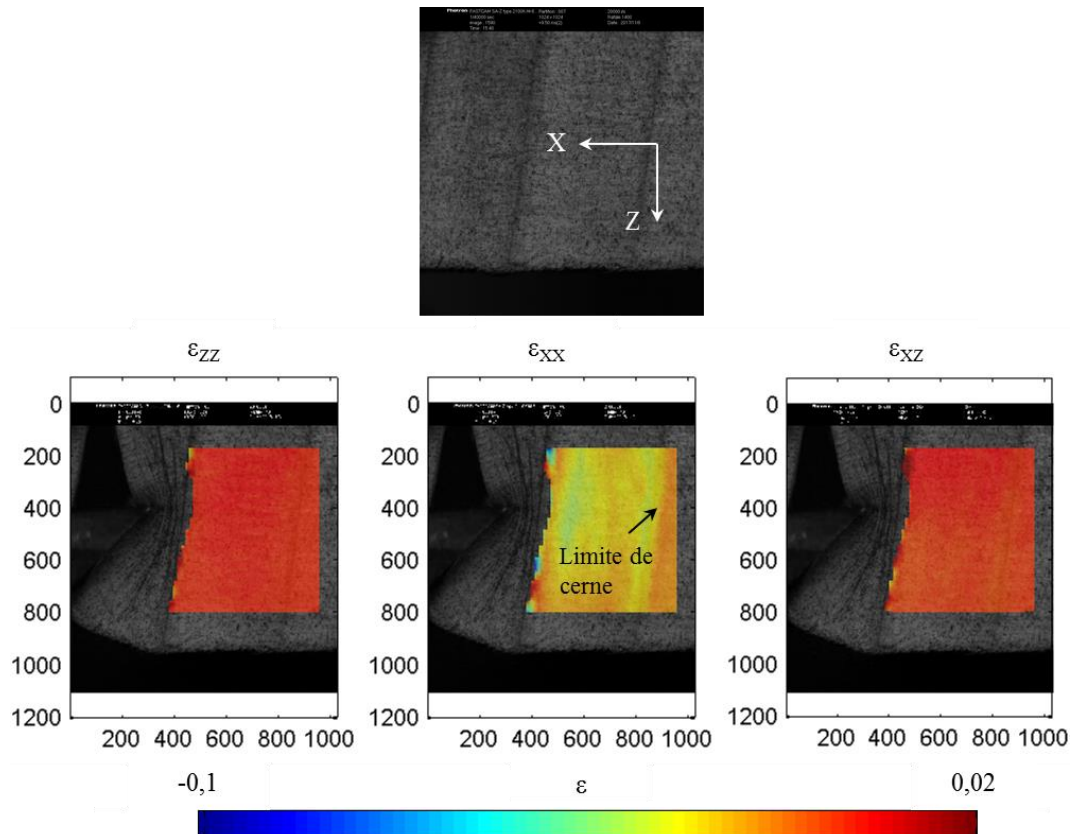


Figure 2.16 : Images non déformée et déformées par l'action de coupe d'éprouvette de douglas vert coupée dans le plan LR (lissage par zone de convolution de 9 zones d'intérêt).

2.4.5 Perspective des résultats

La méthode expérimentale étant définie, les champs de déformations dans les éprouvettes de coupe peuvent être connus. Ils peuvent ainsi être comparés aux champs de déformations obtenus lors des simulations numériques. Une analyse avec corrélation d'images via CorreliQ4 a d'ailleurs été conduite avec succès lors de précédents travaux MEF (Baizeau et al., 2016) à la même vitesse de coupe et en utilisant le même imageur par rapport à des simulations par la Méthode des Eléments Finis.

La méthode a été validée et pourra être utilisée de façon systématique dans le futur, mais les mesures n'ont pas été effectuées sur tous les échantillons car les traitements sont à la fois chronophages et produisent un volume de donnée suffisamment grand pour que leur stockage devienne une problématique à part entière. Tant que les simulations ne donnent pas des résultats plus probants sur les critères fondamentaux que sont les efforts de coupe et la géométrie de plaquette, la comparaison des champs de déformation demeure annexe pour le moment mais constitue une perspective d'analyse riche d'informations.

2.5 Mesures complémentaires de l'humidité et de l'infradensité des échantillons

2.5.1 Humidité des échantillons

La mesure de l'humidité des échantillons utilisés lors des essais de coupe est réalisée selon la norme (NF B51-004, 1985). Chaque éprouvette est pesée juste après la coupe (avec une résolution de 0,001 g). Le temps entre l'opération et la pesée est d'environ 1 minute (moyenne mesurée pour quelques essais). Dans ce laps de temps on considère que l'humidité est restée constante. Etant donné les forts taux de compression associés à l'opération de coupe, il est aussi très probable que cette opération entraîne elle-même une perte d'humidité de l'échantillon en provoquant la désorption de l'eau libre, mais cette hypothèse, bien que visible dans les vidéos de coupe, n'a pas été quantifiée. Les éprouvettes sont ensuite séchées dans un four à 103 ± 1 °C jusqu'à ce que la variation de masse soit inférieure à 0,05% entre deux mesures successives espacées de 4 h. Cette norme n'est plus en vigueur depuis deux ans et n'a pas été explicitement remplacée. Des normes similaires existent cependant dont la différence réside surtout dans la variation de masse autorisée et le laps de temps entre deux mesures.

L'humidité est ensuite calculée grâce à la formule (1.1) et les résultats sont présentés dans la Figure 2.18.

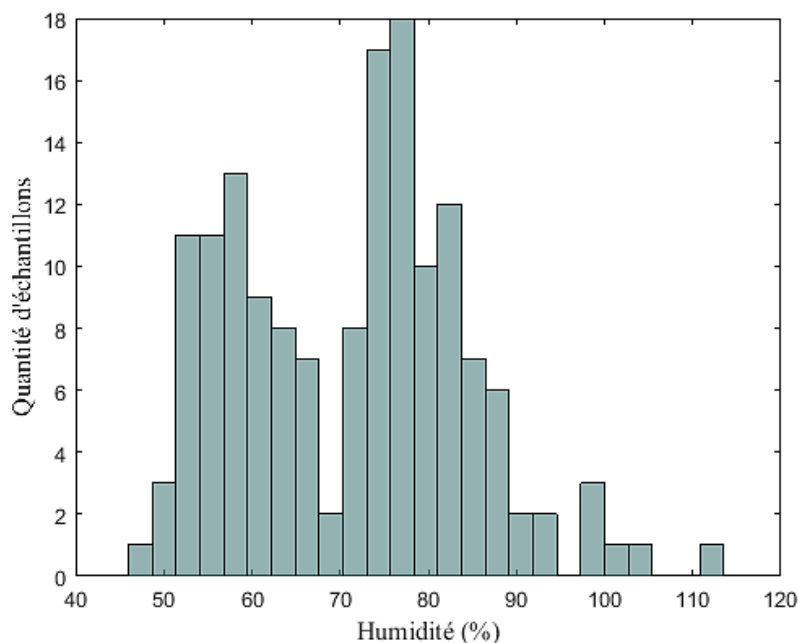


Figure 2.17 : Histogramme de l'humidité des échantillons utilisés lors des essais de coupe.

L'humidité moyenne est de 70% avec un écart type de 14% (à titre indicatif, la distribution n'étant à priori pas Gaussienne). Cette variation peut avoir des origines multiples, le billon d'origine, la position de l'éprouvette dans le plateau ou d'autre propriété locale du bois entraînant des différences dans la cinétique de désorption du bois. Cependant, l'analyse menée de ces causes n'a pas permis de conclure quant à l'origine de la forme, surprenante, de

« double Gaussienne » observée. Cependant, la position des plateaux dans les billons et des billons dans la grume ne sont pas connues et pourraient expliquer cette forme. On retrouve en effet dans des cartographies d'humidités du hêtre vert des gradients d'humidité relativement forts. Certaines humidités « intermédiaires » peuvent être très peu présentes au sein de billons alors que des humidités plus fortes et plus faibles y sont observées (Pepliński et al., 2008). En revanche, l'humidité de nos échantillons est toujours supérieure au PSF du hêtre qui est d'environ 32% (CIRAD Tropix 7, 2015), il est donc possible de qualifier les échantillons de « verts ».

2.5.2 Infradensité des échantillons

Comme les échantillons ont tous été préparés dans une unique essence, l'étude se place dans un cas particulier où l'impact de la densité devrait être linéaire.

Le calcul de l'infradensité nécessite deux données : la masse de l'éprouvette sèche, dont la mesure est décrite dans le paragraphe immédiatement précédent, et le volume de l'éprouvette saturée en eau. Cette seconde donnée est généralement mesurée par le principe de poussée d'Archimède en suivant les recommandations de (Williamson & Wiemann, 2010). En l'absence de dispositif adapté à ce type de mesure au sein du laboratoire, un montage a dû être conçu sur une perceuse à colonne. Une balance (avec une résolution de 0,1 g – pas de certificat d'étalonnage à jour) est positionnée sur le plateau de la perceuse tandis qu'un bac d'eau est posé sur celle-ci. L'échantillon est immergé dans le bac d'eau à l'aide d'un montage fixé dans la broche de la perceuse à colonne constitué de trois pointes et d'une interface mandrin-pointes. Les butées de la perceuse sont réglées de telle sorte que l'éprouvette soit juste pleinement immergée, ainsi, le volume occupé par les pointes dans l'eau est négligeable. Au préalable des mesures, les échantillons (ayant déjà été rabotés) ont été laissés au repos dans un récipient rempli d'eau pour être saturés en eau (vérifié par pesée). A chaque mesure, la balance est tarée, l'échantillon immergé et la masse renvoyée par la balance relevée. Cette masse est équivalente au volume d'eau déplacé. Ces mesures ont été effectuées à titre exploratoire sur un lot restreint de 55 échantillons qui sont ceux dédiés à étude de l'influence de la direction de coupe. La variation d'infradensité sur ce lot s'est montrée relativement faible comme il est possible de le constater sur la Figure 2.19.

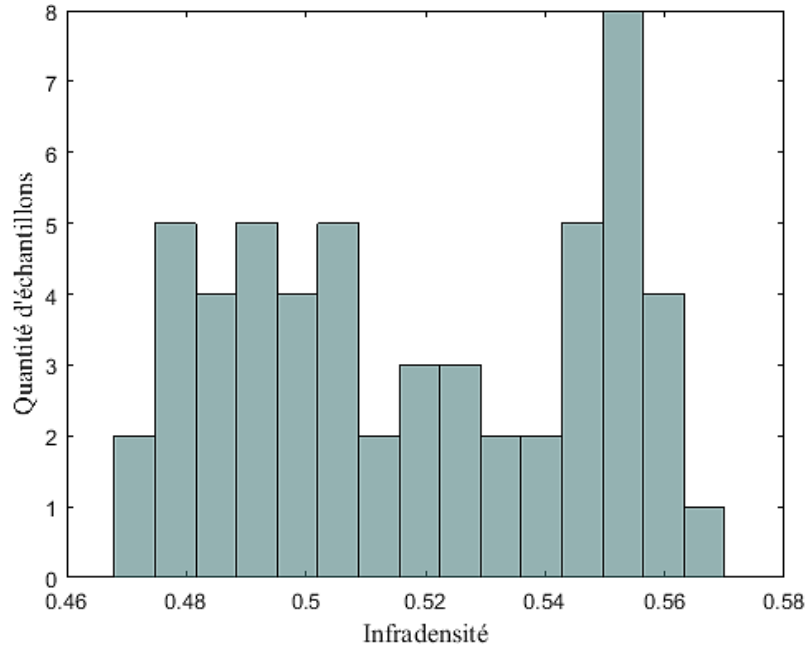


Figure 2.18 : Histogramme de l'infradensité des échantillons utilisés lors des essais.

La moyenne d'infradensité sur le lot testé est de 0,52 avec un écart type de 0,03. L'écart maximum entre l'infradensité mesurée minimale et maximale est seulement de 20%. Le lot est donc relativement homogène en termes d'infradensité. Un calcul de propagation des incertitudes (uniquement liées aux erreurs de résolutions des deux balances utilisées) a été mené afin de vérifier que cet écart type n'était pas uniquement lié à l'imprécision de mesure étant donné qu'il est faible. L'incertitude obtenue étant de $5,1 \times 10^{-4}$ g, cette dernière n'est pas à l'origine des écarts d'infradensité observés.

2.6 Influence des paramètres majeurs sur les efforts de coupe

2.6.1 Influence de la section coupée

L'état de l'art suggérait une influence linéaire de la largeur et l'épaisseur coupée sur les efforts de coupe. A la vue des résultats obtenus, il est possible d'affirmer que les essais réalisés sont tout à fait en cohérence avec les investigations passées, même si la plage d'épaisseurs coupées est plus conséquente. L'ensemble de ces résultats est présenté Figure 2.20.

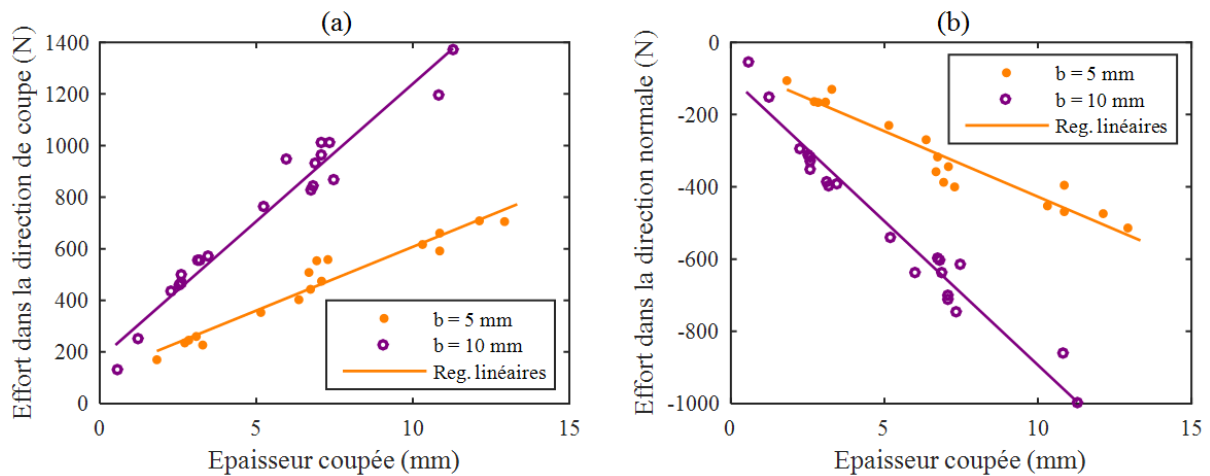


Figure 2.19 : Influence de la section coupée sur les efforts parallèles à la direction de coupe (a) et sur les efforts normaux (b).

L'expression des efforts de coupe (qu'ils soient parallèles ou normaux à la direction de coupe) peut donc se mettre sous la forme d'une loi affine suivante avec C_1 et C_2 deux constantes :

$$F = C_1 \times b \text{ (ou } h) + C_2. \quad (2.1)$$

Afin de déterminer l'impact d'un paramètre puis l'autre, dans un premier temps les efforts de coupe sont normalisés par la largeur coupée (Figure 2.21a). Dans un second temps, ils sont normalisés par la largeur coupée (Figure 2.21a).

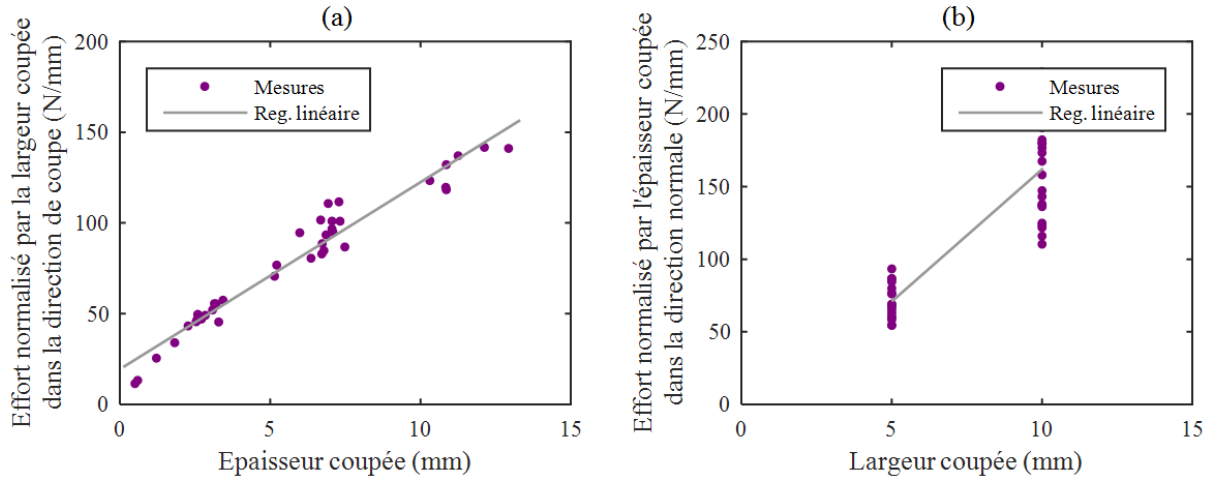


Figure 2.20 : Influence de l'épaisseur coupée (a) et de la largeur coupée (b) sur les efforts parallèles normalisés par la seconde dimension.

Les valeurs des constantes sont regroupées dans le Tableau 2.5, ainsi que le coefficient de corrélation linéaire associé à chacune des régressions linéaires. Dans le cas des efforts normalisés par une dimension, les unités de C_1 et C_2 deviennent respectivement des N/mm² et des N/mm.

Tableau 2.5 : Paramètres des régressions linéaires pour l'influence de la section coupée sur les efforts de coupe.

Paramètre	Effort	C_1 (N/mm)	C_2 (N)	R
h pour $b = 5$ mm	F_x	49,41	111,64	0,9690
	F_z	-36,25	-64,78	-0,9573
h pour $b = 10$ mm	F_x	106,56	174,04	0,9782
	F_z	-79,61	-97,24	-0,9775
h	F_x/b	10,30	19,43	0,9757
	F_z/b	-7,56	-11,28	-0,9695
b	F_x/h	18,20	-20,08	0,8600
	F_z/h	-11,66	10,04	-0,9041

Les corrélations entre la régression linéaire et les données mesurées sont très bonnes ce qui est confirmé par les coefficients de corrélation calculés. Seul le fait de normaliser les efforts de coupe par l'épaisseur coupée (deux dernières lignes du Tableau 2.5) afin d'étudier l'impact de la largeur coupée semble peu pertinent. Ceci est sûrement dû au fait que les lois sont du type affine et cette normalisation néglige l'ordonnée à l'origine dans les régressions. Cela se traduit par le plus faible des coefficients de corrélation de 0,86. Cette normalisation peut tout de même s'avérer utile si le modèle numérique est utilisé pour modéliser des coupes à largeur de coupe unitaire par exemple.

C_2 , l'ordonnée à l'origine, est majoritairement positive lorsque les efforts observés sont positifs, ou négative dans le cas contraire. Ce qui est caractéristique des efforts de coupe. Même si le sens commun voudrait que les efforts soient nuls pour une section coupée nulle, un écart est toujours observé dû au frottement de l'outil sur la matière et à l'énergie de

création d'une surface. Cet effet est bien connu dans le milieu de l'usinage (Atkins, 2003). L'unique déviation à cette affirmation réside à nouveau dans la régression entre effort normalisé par l'épaisseur coupée et la largeur coupée. Elle s'explique probablement par la mauvaise qualité de cette régression comme évoqué précédemment.

2.6.2 Influence de la vitesse de coupe

Les résultats des essais à vitesse de coupe variable sont présentés Figure 2.22a pour l'influence sur les efforts parallèles à la direction de coupe et Figure 2.22b pour les efforts normaux à la direction de coupe.

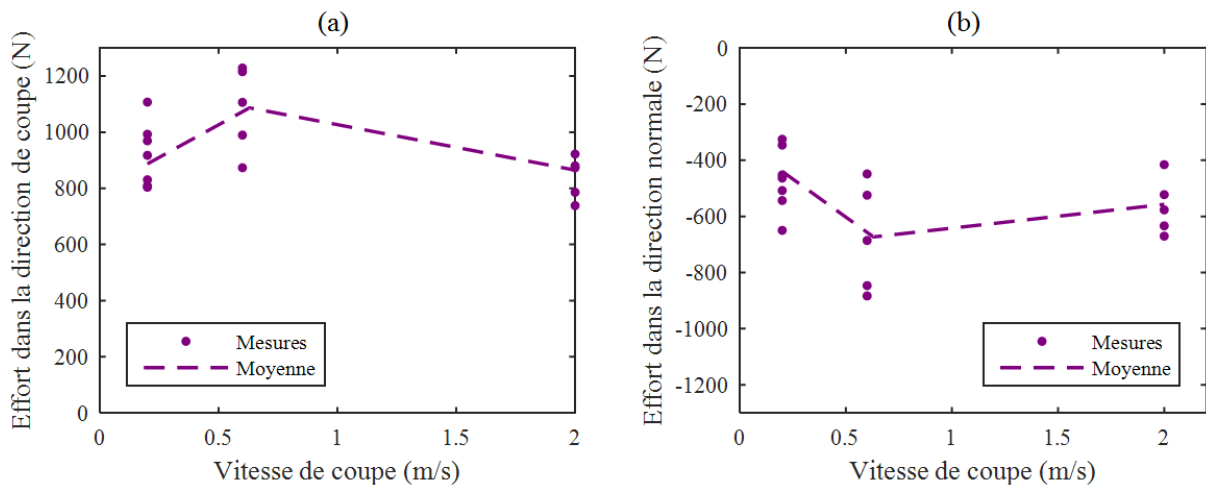


Figure 2.21 : Influence de la vitesse de coupe sur les efforts parallèles à la direction de coupe (a) et sur les efforts normaux (b).

Une légère augmentation des efforts est observable entre la vitesse de coupe la plus faible et la vitesse intermédiaire, puis une diminution encore plus légère s'observe à la vitesse maximale. A faible vitesse, la variabilité des efforts moyens semble plus importante qu'à forte vitesse. Celle-ci n'a pas été quantifiée étant donné le nombre peu conséquent d'échantillon ne permettant pas d'analyse statistique. Il a été constaté au cours des essais et à la vue des vidéos de coupe que les plus faibles vitesses favorisaient des arrachements de matières, illustrés en Figure 2.28. Dès lors que des arrachements ont lieu, la mesure d'effort perd beaucoup de sens, car le couteau traverse tantôt de la matière, tantôt une absence de matière là où ces arrachements ont eu lieu, ce qui crée de fortes variations d'efforts, qui se traduit par la variabilité de la moyenne. Cette variabilité, couplée à la quantité restreinte d'essais de répétitions effectués peut être une explication de ce comportement observé. L'influence de la vitesse de coupe sur la fréquence d'apparition de ces arrachements, bien que non quantifiée, est intuitive. Moins il est coupé rapidement, moins de puissance est apportée à la coupe. L'énergie de rupture des surfaces est atteinte moins rapidement. De ce fait, les plaquettes ne se forment pas et tout un bloc se déforme en amont de l'outil jusqu'à ce que les déformations et contraintes soient telles que l'énergie emmagasinée amorce une fissure. Ce phénomène

n'est pas surprenant puisqu'à haute vitesse de déformation, le matériau présente une rigidité apparente plus élevée (voir Chapitre 4).

L'extrapolation de ces résultats à des vitesses de coupe plus élevées semble dangereuse. Dans un premier temps, les simulations devront reproduire les effets des différents paramètres de coupe à la vitesse de 2 m/s. Des informations complémentaires à plus haute vitesse de coupe paraissent nécessaires pour juger de la qualité des simulations à venir à vitesse plus conséquente. Notons tout de même que l'apport de vitesse supplémentaire semble avoir pour principal effet de favoriser et de stabiliser le phénomène de fragmentation du copeau en plaquettes.

2.6.3 Influence des angles de coupe

Etant donné que les couteaux ont été réaflutés au niveau de la face de coupe afin d'obtenir des angles de becs différents, les angles d'attaque ont eux aussi été modifiés (voir Tableau 2.6). La Figure 2.23 montre donc l'influence de l'angle de bec sur les efforts de coupe mesurés.

Tableau 2.6 : valeur de l'angle d'attaque en fonction de l'angle de bec de l'outil testé

Angle de bec	32°	35°	38°	40°
Angle d'attaque	53°	50°	47°	45°

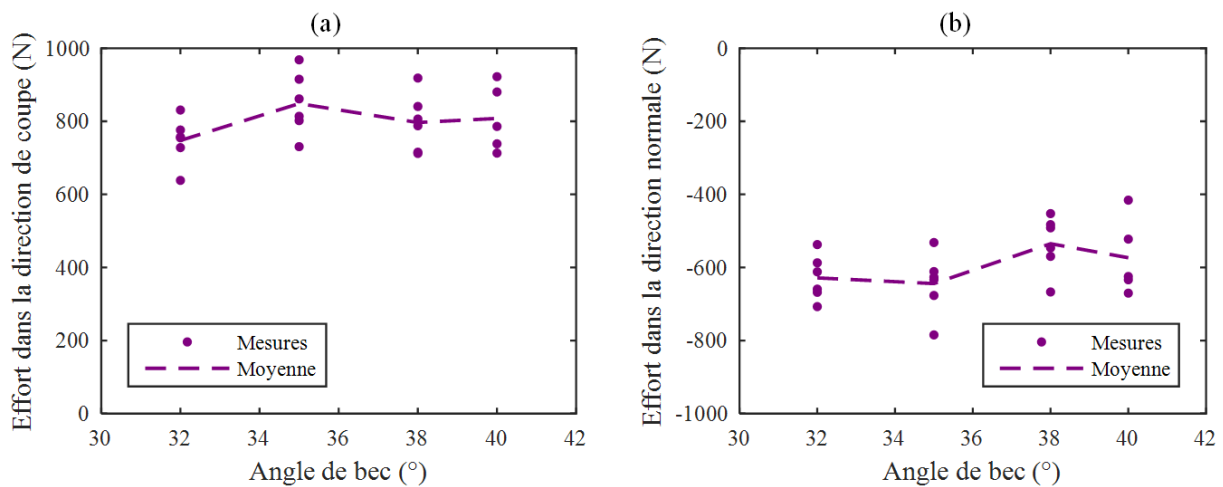


Figure 2.22 : Influence de l'angle de bec sur les efforts parallèles à la direction de coupe (a) et sur les efforts normaux (b).

Dans la plage observée, l'influence des couples d'angle de bec et d'angle d'attaque testés est faible. Non seulement la moyenne des efforts de coupe évolue très peu en fonction de ces angles, étant à peine plus basse pour un angle de bec de 32°, mais ces variations demeurent dans la plage de variabilité des répétitions. Cette variabilité semble d'ailleurs elle aussi peu voire non affectée par l'angle de bec utilisé. Comme pour l'étude portant sur l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe, le nombre d'éprouvettes peu conséquent, couplé à l'interaction angle de bec/angle d'attaque, ne permet pas de conclure statistiquement sur l'effet de l'angle de bec.

Il serait pertinent, lors d'une étude future, de faire varier l'angle d'attaque en le compensant avec l'angle de dépouille, pour dissocier l'influence de l'angle de bec et de celui d'attaque. De même pour l'angle d'attaque. L'affûtage des couteaux serait plus difficile, mais demeure techniquement tout à fait réalisable. Une plage de variation de ces deux paramètres plus grande serait également bénéfique si les variations induites sont faibles.

2.6.4 Influence de la direction de coupe

Les efforts de coupe moyens sont présentés Figure 2.24 en fonction de l'angle de fil des échantillons dans la zone d'étude. La Figure (a) indique les efforts parallèles tandis que la Figure (b) indique les efforts normaux en fonction de l'angle de fil des échantillons. Les cercles vides sont les efforts corrigés $F\rho$ par l'infradensité des échantillons et les points pleins représentent les efforts moyens bruts. La correction se fait exactement de la même façon pour les efforts parallèles ou les efforts normaux :

$$F_p = F \times \frac{\bar{\rho}_l}{\rho_i} \quad (2.2)$$

Pour rappel, ρ_i est l'infradensité d'un échantillon et $\bar{\rho}_l$ l'infradensité moyenne du lot d'échantillon. Trois régressions linéaires sont également représentées pour chaque nuage de point sur trois zones de 0° à 50° , de 50° à 90° et de 90° à 180° . En effet, trois comportements distincts sont observés lors des essais de coupe en fonction dans l'angle de fil des éprouvettes, et les délimitations sont fixées arbitrairement à 50° et 90° à l'observation des résultats. Dans les faits, la transition d'un type de phénomène à un autre est progressive et on ne peut pas énoncer clairement d'angle net de transition. Ces phénomènes seront détaillés plus loin lors de l'étude du copeau, mais on retrouve sur les efforts de coupe la même distinction, avec des tendances différentes selon la plage d'angle de fil observée

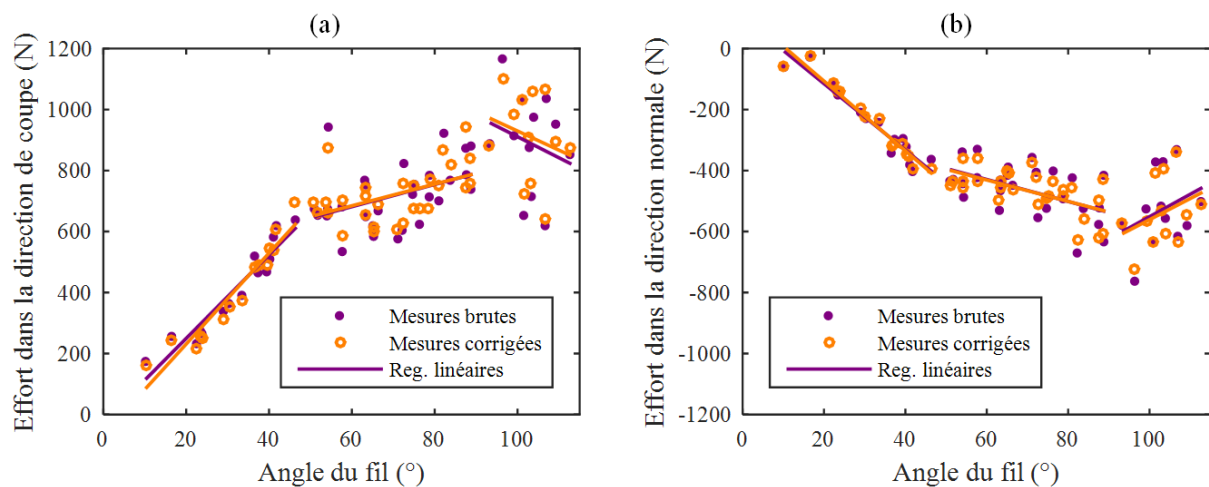


Figure 2.23 : Influence de l'angle de fil sur les efforts parallèles à la direction de coupe et sur les efforts normaux.

De 10° à 90°, c'est-à-dire lorsque la coupe se fait dans le fil du bois, les efforts augmentent constamment. Cependant la croissance des efforts est 3 à 4 fois plus rapide de 10° à 50° d'après la pente des régressions linéaires calculées présentée dans le Tableau 2.7. Passé 90°, lorsque la coupe se fait à contre-fil, la variabilité des efforts devient telle, qu'il est impossible d'identifier une tendance. De façon encore plus importante que lors des essais à faible vitesse de coupe, les arrachements de matière sont très présents dès lors que la coupe est réalisée à contre-fil entraînant des variations d'efforts très marquées et peu maîtrisées.

Tableau 2.7 : Paramètres des régressions linéaires pour l'influence de l'angle du fil sur les épaisseurs de plaquettes.

	Paramètre	Effort	C_1 (N/°)	C_2 (N)	R
Efforts corrigés	Zone 1	F_x	14,91	-66,99	0,9583
		F_z	-11,42	121,62	-0,9756
	Zone 2	F_x	3,54	471,94	0,4860
		F_z	-3,50	-221,03	-0,6136
	Zone 3	F_x	-6,28	1 557,51	-0,2305
		F_z	6,91	-1 252,34	0,3379
Efforts bruts	Zone 1	F_x	13,70	-24,31	0,9550
		F_z	-10,87	102,10	-0,9602
	Zone 2	F_x	3,64	463,05	0,4227
		F_z	-3,61	-212,85	-0,5373
	Zone 3	F_x	-6,88	1 599,08	-0,2288
		F_z	7,34	-1 285,70	-0,3209

La correction des efforts de coupe par l'infradensité des échantillons est intéressante. En soit, le terme de correction est maladroit, car l'effort « corrigé » n'est pas plus juste que l'effort mesuré. Néanmoins, en éliminant une partie de l'effet de l'infradensité de l'échantillon sur les efforts, elle permet de mieux identifier visuellement la tendance uniquement dû à l'angle de fil. Les tendances identifiées mathématiquement sont en réalité très peu modifiées, les coefficients des régressions linéaires demeurent quasiment égaux. En revanche, ce calcul supplémentaire permet de réduire systématiquement la dispersion des points, même si l'écart est faible, les coefficients de corrélation s'en retrouvent tous améliorés quelques soit la plage d'angle de fil concernée. Si la densité du bois n'a pas été étudiée en tant que telle, cette correction montre que l'influence de la densité est très certainement présente dans les essais présentés. Si la correction va dans le bon sens, elle semble trop légère et une loi quadratique serait potentiellement plus efficace qu'une loi linéaire suggérée par la littérature pour une telle correction.

2.7 Influence des paramètres majeurs sur la géométrie des plaquettes

2.7.1 Influence de la section coupée

La Figure 2.25 représente l'épaisseur de chaque plaquette mesurée sur les vidéos de coupes à l'aide de la méthode décrite dans la section 2.3.3.1, dans le cadre des essais liés à l'influence de la section coupée. Pour rappel chaque point de mesure possède une erreur estimée de 0,1 mm, que ce soit sur les abscisses ou les ordonnées. Elles ne sont pas représentées pour la lisibilité du graphique, si ces erreurs sont relativement faibles dans le cas de plaquettes de plus d'un millimètre d'épaisseur, elles sont plus dommageables dans le cas des plaquettes les plus fines. Les écart-types ne sont pas représentés mais seront calculés et utilisés au cours de la section 2.7.5 pour quantifier la variabilité d'épaisseur des plaquettes produites.

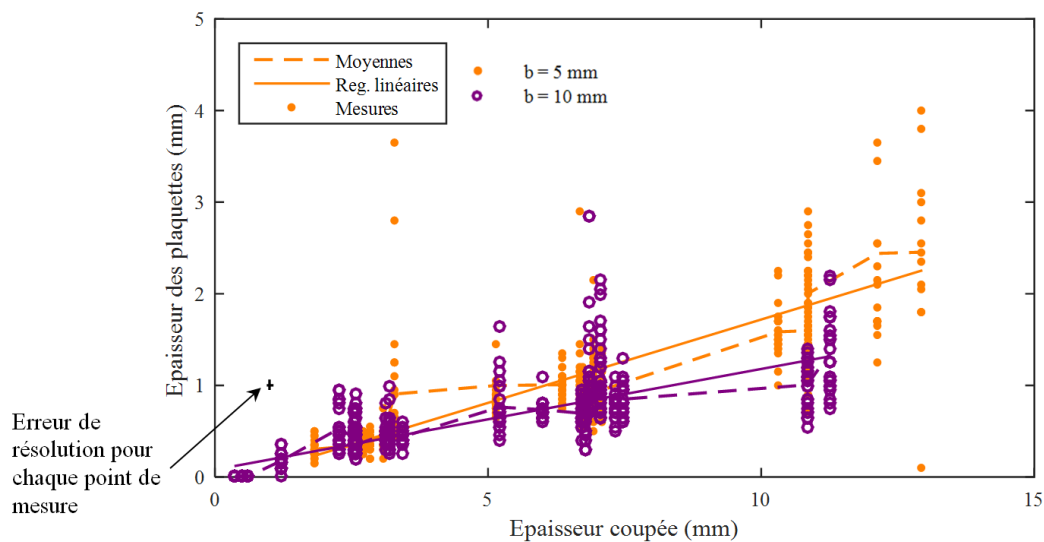


Figure 2.24 : Influence de l'épaisseur coupée et de la largeur coupée sur l'épaisseur des plaquettes générées.

En premier lieu, remarquons que dans les cas des plus petites épaisseurs coupées (inférieures au millimètre), un ruban continu est généré (Figure 2.26a), et le copeau ne se fragmente pas (il n'en demeure pas moins extrêmement cassant, et semble fortement fissuré, mais cela n'a pas été quantifié). La transition vers un copeau fragmenté en plaquettes est très rapide (Figure 2.26b), passé le millimètre d'épaisseur coupée, le phénomène est déjà très net et similaire à ce qui est observable à forte section.

L'épaisseur moyenne des plaquettes augmente ensuite en fonction de la longueur coupée comme l'état de l'art le montrait. Néanmoins, les plaquettes les plus larges ont tendance à être les moins épaisses, ce qui est contradictoire avec la littérature. Ce qui est d'autant plus surprenant que, indépendamment des études passées, il semblerait logique que le copeau le moins large soit plus sensible aux hétérogénéités et se fissure souvent le long de celles-ci. La tendance inverse aurait ainsi semblé être plus intuitive, en plus d'être cohérente avec les études passées.

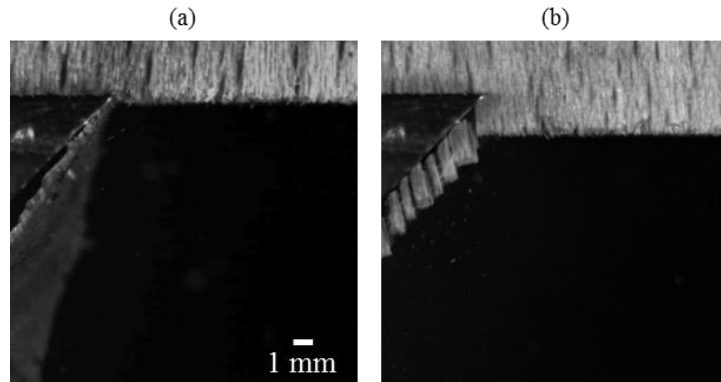


Figure 2.25 : Copeau continu ($b = 10 \text{ mm}$, $h = 0,4 \text{ mm}$) et fragmentés en plaquette ($b = 10 \text{ mm}$, $h = 2,15 \text{ mm}$).

Dans l'exemple de fragmentation exposé Figure 2.26b, il est possible de remarquer que la fragmentation n'est pas parfaitement régulière, l'épaisseur des plaquettes varie assez fortement entre les plaquettes successives. La régularité de la fragmentation sera traitée indépendamment après l'étude de l'influence des divers paramètres sur l'épaisseur moyenne de plaquette, en section 2.7.5.

2.7.2 Influence de la vitesse de coupe

L'influence de la vitesse de coupe sur l'épaisseur des plaquettes est illustrée Figure 2.27. Chaque série de points est composée de 5 essais ou plus et d'au moins 75 plaquettes. Trois essais à la plus faible vitesse n'apparaissent pas car l'intégralité de la zone d'étude centrale avait déjà été arrachée avant même que l'outil ne l'atteigne.

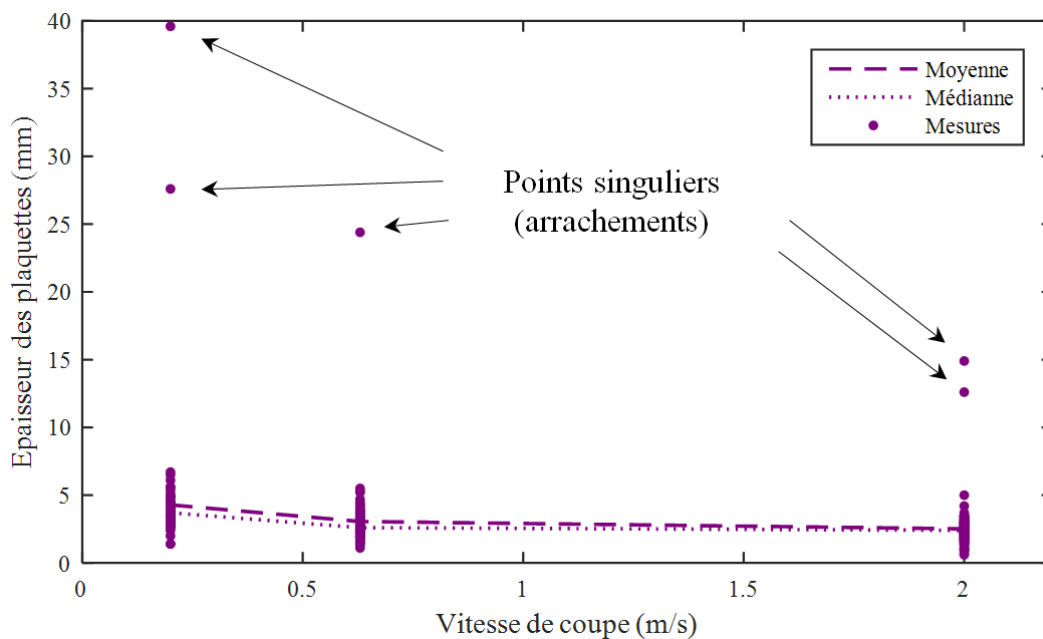


Figure 2.26 : Influence de la vitesse de coupe sur l'épaisseur des plaquettes générées.

Si la variation de vitesse de coupe n'entraînait pas des conséquences importantes sur les efforts de coupe, la diminution de l'épaisseur moyenne de plaquette avec l'augmentation de la vitesse de coupe est plus notable. La médiane a également été tracée afin de vérifier que les points singuliers ne faussaient pas cette hypothèse.

Les points très éloignés de la moyenne correspondent à des arrachements de matière (Figure 2.28a) et non à des plaquettes. Dans les zones plus « denses » en points de mesure de la Figure 2.27, de nombreux arrachements de taille moindre sont également présents. A l'observation des échantillons et des vidéos de coupe, la diminution de la vitesse semble favoriser ce phénomène d'arrachement de matière qui est bien plus fréquent.

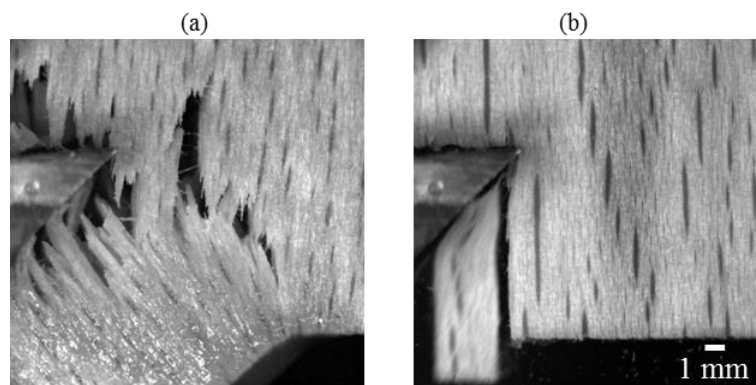


Figure 2.27 : Exemples d'arrachement de matière (à $V_c = 0,2$ m/s) et de bonne fragmentation du copeau en plaquettes (à $V_c = 0,63$ m/s).

2.7.3 Influence des angles de coupe

L'impact de l'angle de bec (et de l'angle d'attaque) sur l'épaisseur des plaquettes est montré Figure 2.29. Chaque série est composée de 6 essais et d'un minimum de 90 plaquettes.

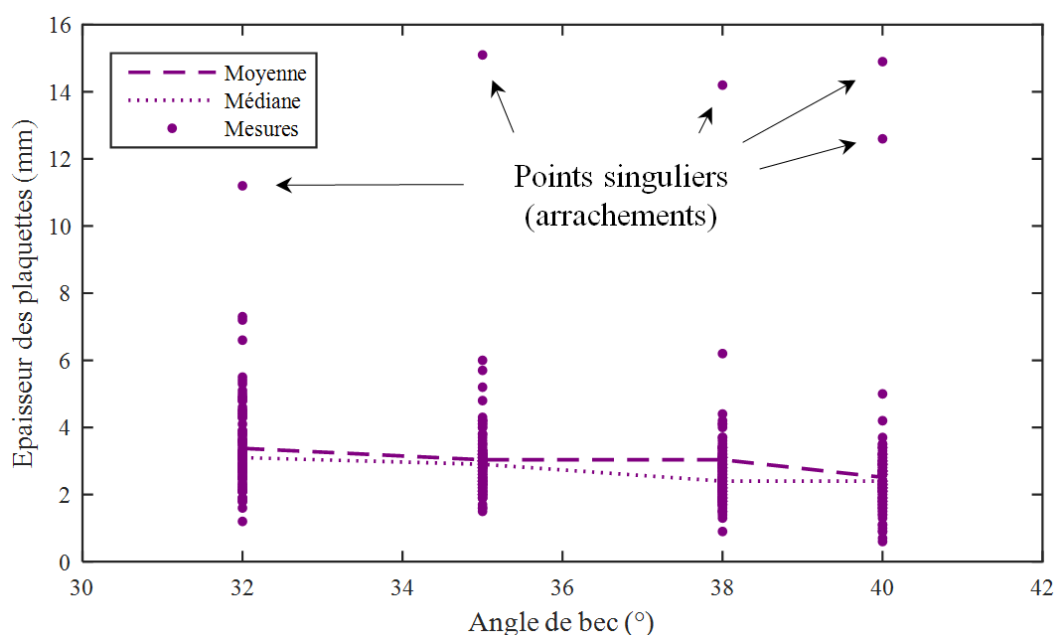


Figure 2.28 : Influence de l'angle de bec sur l'épaisseur des plaquettes générées.

A nouveaux, quelques points singuliers, correspondant à des arrachements de matières sont présents, mais en nombre très restreint. Globalement, la diminution de l'angle de bec, couplée à l'augmentation de l'angle d'attaque, entraîne l'augmentation, faible, de l'épaisseur moyenne de plaquette.

2.7.4 Influence de la direction de coupe

La direction de coupe a une influence forte sur l'épaisseur des plaquettes sur la plage étudiée. La Figure 2.30 représente l'épaisseur mesurée des plaquettes en fonction de l'angle du fil mesuré par la méthode de traitement d'image présentée section 2.3.4.

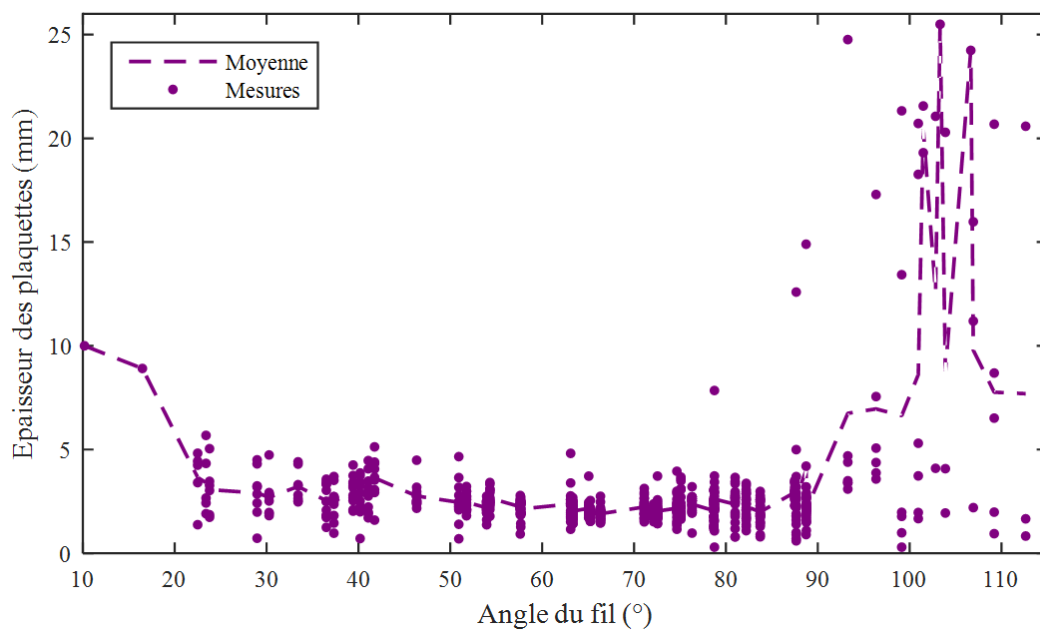


Figure 2.29 : Influence de l'angle du fil sur l'épaisseur des plaquettes générées.

L'épaisseur de plaquette décroît rapidement entre 10° et 30° de pente de fil. La décroissance est ensuite plus lente jusqu'à 60° puis proche d'être constante jusqu'à un peu moins de 90°. A 90° l'épaisseur moyenne de plaquettes augmente très fortement. En effet lors de la coupe à contre-fil, de gros morceaux de bois sont arrachés de l'échantillon comme constaté par R. Pfeiffer (Pfeiffer et al., 2014) dans le cas particulier de $GD = 110^\circ$. Il faut également noter la présence de plaquettes très fines même à contre-fil. Cette présence est due au fait que l'arrachement de gros blocs entraîne fréquemment (mais pas nécessairement) un profil déjà pré-morcelé en amont de l'outil (voir Figure 2.31) qui se sépare très facilement du reste de l'échantillon au passage de l'outil.

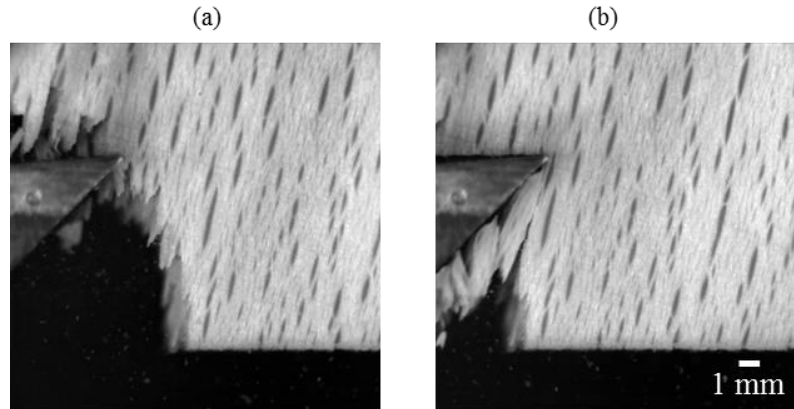


Figure 2.30 : fines succédant à un arrachement (essai à $GD = 100,94^\circ$).

Les angles trop faibles ($< 20^\circ$) et trop élevés ($> 90^\circ$) doivent donc être évités lors de la coupe afin de produire des plaquettes aux proportions voulues. Dans cette plage, une régression quadratique entre l'épaisseur moyenne de plaquette et l'angle de fil permet d'obtenir une relation plus précise entre ces deux grandeurs. Plus généralement, à chaque fois que des relations seront étudiées par rapport à l'angle de fil, l'attention sera portée sur cette plage de $[20^\circ ; 90^\circ]$ en Figure 2.32.

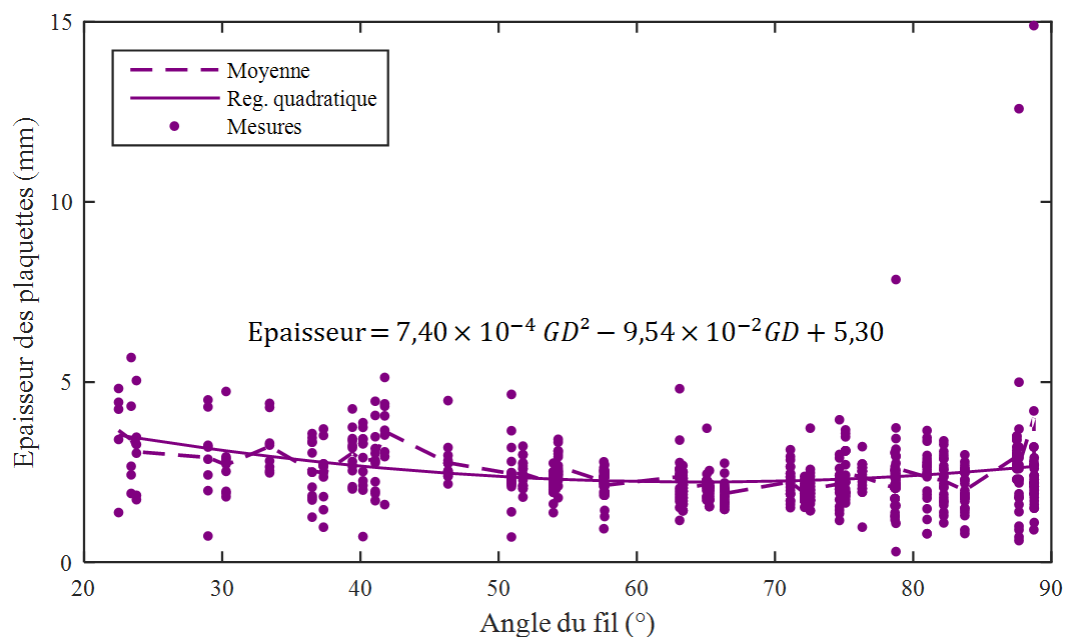


Figure 2.31 : Influence de l'angle du fil sur l'épaisseur des plaquettes générées sur la plage d'angle de fil restreinte $[20^\circ; 90^\circ]$.

Lors des essais à angle de fil variable, la relation entre longueur et épaisseur peut être observée pour des longueurs plus élevées que celles testées lors de l'étude sur la section, car à cause de l'angle du fil, la longueur des plaquettes peut être plus grande que l'épaisseur coupée et ainsi dépasser 15 mm. La tendance précédemment identifiée est bien respectée malgré la différence d'orientation des fibres dans l'échantillon.

Remarque : Il est très difficile de faire le lien entre efforts de coupe et épaisseur moyenne de plaquette générée car, notamment lors des essais concernant l'angle de fil, les efforts évoluent de façon monotone dans la zone de bonne fragmentation entre 20° et 90°, alors que ce n'est pas le cas pour l'épaisseur moyenne de plaquette, présentant un minimum local à 65°. La zone de coupe optimale est donc située pour des angles du fil compris entre 20° et 90°, centrée si possible autour de 65°.

2.7.5 Régularité de la fragmentation

Dans un contexte industriel, il est souhaitable de trouver un ensemble de paramètres pour viser une production présentant une épaisseur moyenne de plaquette donnée, typiquement entre 3 et 8 mm. Néanmoins, si la dispersion des épaisseurs est trop forte, l'intérêt d'avoir une épaisseur moyenne correcte reste limité. Il est donc nécessaire de s'intéresser également à l'influence des divers paramètres de coupe sur la régularité d'épaisseur des plaquettes. Le critère utilisé est le coefficient de variation :

$$CV = \frac{\text{écart-type (épaisseurs)}}{\text{épaisseurs}}. \quad (2.3)$$

Aussi, minimiser l'écart-type serait plus pertinent car il n'y a pas de raison d'être plus permissif sur la variation d'épaisseur pour des plaquettes épaisses ou plus fines. Dans le cadre d'une étude plus amont comme présentement, normaliser l'écart-type par la moyenne permet de mieux se rendre compte de la taille de la dispersion autour de la moyenne. La Figure 2.33 présente les coefficients de variation calculés en fonction des principaux paramètres de coupe étudiés.

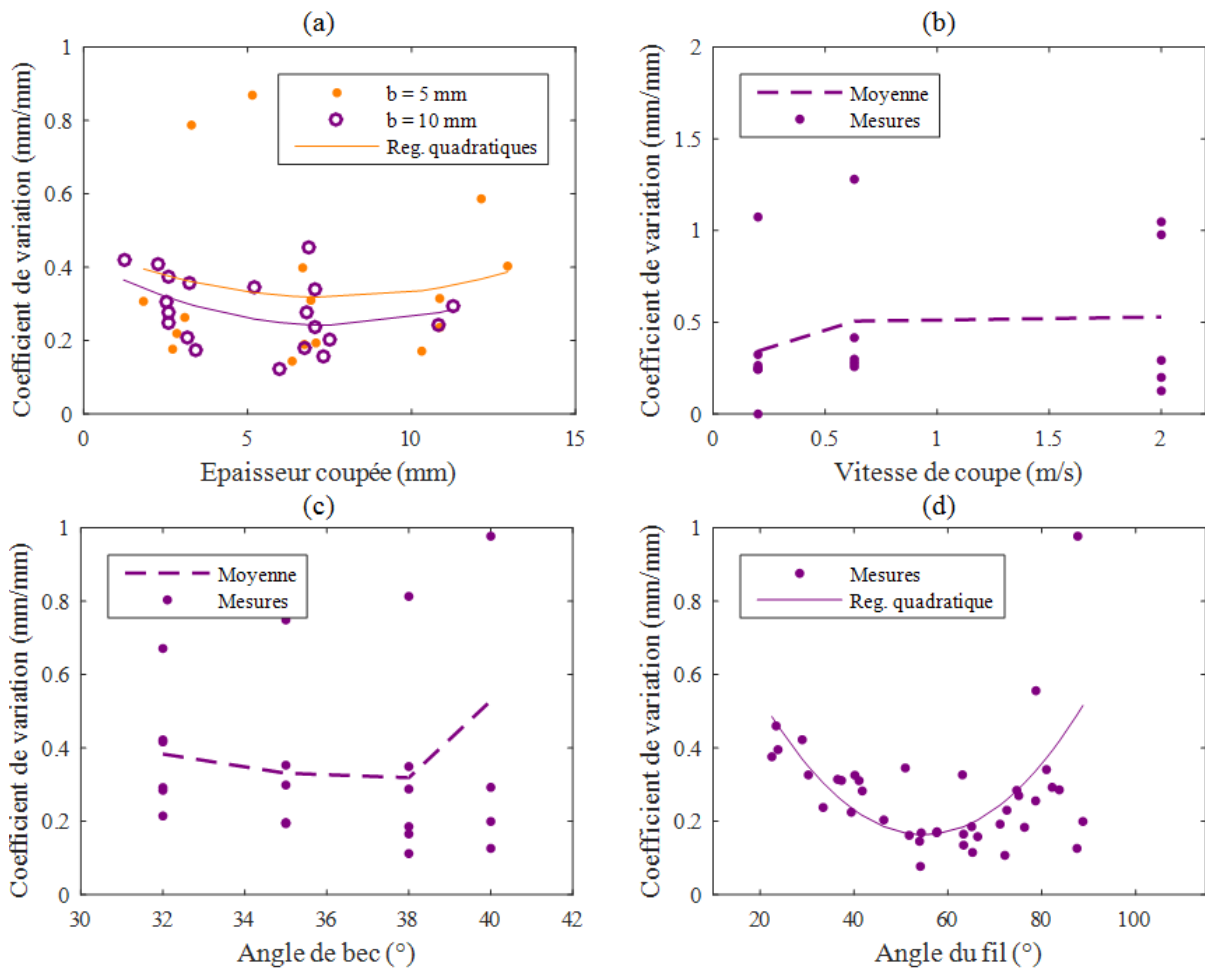


Figure 2.32 : Influence des 5 paramètres de coupe principaux sur la dispersion d'épaisseur des plaquettes.

Ni l'épaisseur coupée, ni la largeur coupée b ne semblent avoir une influence bien identifiée sur la dispersion des épaisseurs de plaquettes car confondue dans la variabilité des essais.

L'étude sur la vitesse de coupe a entraîné une variabilité encore accrue avec des arrachements fréquents et de grandes tailles ; aussi, le coefficient de variation moyen observé pour chaque modalité a une significativité très réduite. Subjectivement, à l'observation des essais lors de leur réalisation, la plus haute vitesse semblait néanmoins à l'origine de la fragmentation la plus régulière, deux essais présentant de forts arrachements s'opposent néanmoins à ce constat.

Il en est de même pour l'angle de bec. S'il semble préférable d'utiliser un angle de bec faible (et un angle d'attaque élevé) afin de minimiser la dispersion d'épaisseur de plaquette, les deux mêmes essais à angle de bec égal à 40° présentant de forts arrachements tempèrent cette conclusion.

Le seul paramètre semblant influencer nettement sur la régularité de la fragmentation est l'angle de fil. Si cet angle est choisi autour des 55° , la dispersion d'épaisseur sera la plus limitée. Le fait d'avoir étudié les 4 précédents paramètres pour un angle de fil de 90° a été dommageable, la fragmentation est instable à cet angle de fil. En effet, il s'agit de l'angle de

transition entre coupe dans le fil et coupe à contre-fil. En conséquence, même de faibles variations locales d'angle de fil dans l'échantillon font passer d'un mode de coupe à l'autre, entraînant soit une fragmentation du copeau en plaquettes, soit des arrachements de matière. Il aurait en fait été préférable d'étudier l'impact des autres paramètres avec un angle de fil constant mais plus faible, afin de s'assurer que celui-ci interfère le moins possible dans l'interprétation des résultats.

Bien évidemment, l'homogénéité du bois est également cruciale pour assurer cette régularité. Dans le cas d'étude, un soin particulier a été apporté à la sélection d'éprouvettes les plus saines possible. L'effet des singularités n'a donc pas été étudié en tant que tel. Cependant, quelques éprouvettes en contenant, en particulier des nœuds, ont été volontairement usinées puisque la ressource en présentait, séparément des lots d'étude. Les arrachements au niveau des singularités étaient tels que ni les mesures d'efforts ni les images de coupe ne sont exploitables car l'outil ne rencontre plus de matière passé quelques millimètres de coupe à cause d'arrachements encore plus volumineux que pour les « mauvais » paramètres de coupe.

2.8 Intérêt de la compensation dynamique des efforts de coupe

2.8.1 Principe

S'il est facile d'interpréter les variations brutales des efforts de coupe comme l'effet de la fragmentation des plaquettes, ce constat serait erroné. En effet, les oscillations observées ont lieu à une fréquence proche de la fréquence de résonance du dynamomètre indiqué par sa documentation constructeur. La courbe de réponse typique donnée par le constructeur étant présentée Figure 2.34a, avec f_0 la fréquence de résonance théorique de la platine dynamométrique, f la fréquence, et x/x_0 le rapport entre force (ou accélération) de sortie et de la platine de mesure d'efforts. La fréquence propre de l'ensemble platine + outil bridé sur la table de la machine a été mesurée à environ 1 667 Hz (Figure 2.34b). En conséquence, l'effort mesuré est notablement différent de l'effort de coupe réel puisque les sollicitations dynamiques dues à la coupe contiennent les fréquences propres du système de mesure. Si nous souhaitons être capable d'aller plus loin dans la comparaison des résultats des expériences et de simulations numériques, et ne plus traiter uniquement les efforts moyens, il faut pouvoir remonter au plus proche possible de ces efforts réels (c'est-à-dire sans les effets dynamiques).

Considérons une largeur plaquette moyenne générée variant de 1 mm à 5 mm et une vitesse de coupe de 2 m/s, la fréquence de génération de plaquette varie donc entre 400 Hz et 2 000 Hz. Il n'est donc pas question de filtrer notre signal à l'aide d'un filtre passe-bas ou coupe-bande avec une fréquence de coupure à $f_0/2$ comme conseillé par le constructeur, car nous filtrerions également la composante spectrale de l'effort nous intéressant, c'est-à-dire celle correspondant à la fragmentation cyclique des plaquettes.

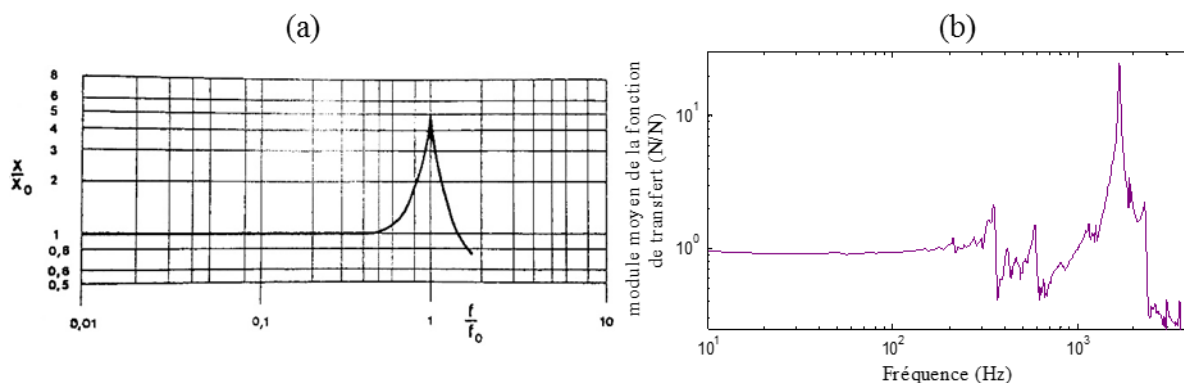


Figure 2.33 : (a) Fonction de transfert type d'un dynamomètre. (b) Fonction de transfert mesurée du système dynamomètre + outil bridé sur la table de la MOCN.

Dès lors que le phénomène à analyser s'inscrit dans le domaine fréquentiel de la résonance du système de mesure, il faut alors s'intéresser au principe de la compensation dynamique des signaux (ici les efforts de coupe), afin de « filtrer » le signal en ne ciblant que sa composante due à la réponse vibratoire du système (dynamomètre + montage fixé).

Basé sur les travaux de F. Girardin (Girardin et al., 2010) un traitement par compensation dynamique des efforts a donc été réalisé. Le principe est le suivant : le système de mesure est

sollicité à l'aide d'un dispositif (impacteur ou pot vibrant, en l'occurrence un marteau dynamométrique) dont on maîtrise la sollicitation (que ce soit son accélération ou son effort d'impact). En mesurant la réponse du système vibrant, la fonction de transfert ce celui-ci peut être définie. Pour corriger l'effort mesuré, il est multiplié par « l'inverse » de la fonction de transfert calculée, afin de théoriquement retrouver la sollicitation qui a conduit aux signaux mesurés. Mathématiquement cette procédure peut s'exprimer ainsi : soit $\underline{F(f)} = \begin{pmatrix} F_X(f) \\ F_Y(f) \\ F_Z(f) \end{pmatrix}$ le vecteur force mesurée dans le domaine fréquentiel (une transformée rapide de Fourier ayant été appliquée au signal temporel), et $\underline{F^i(f)} = \begin{pmatrix} F_X^i(f) \\ F_Y^i(f) \\ F_Z^i(f) \end{pmatrix}$ celui produit par le marteau dynamométrique connu, alors la fonction de transfert (H) du système est telle que :

$$\text{et } \underline{F^i(f)} \underline{H(f)} = \underline{F(f)} \begin{pmatrix} H_{XX}(f) & H_{XY}(f) & H_{XZ}(f) \\ H_{YX}(f) & H_{YY}(f) & H_{YZ}(f) \\ H_{ZX}(f) & H_{ZY}(f) & H_{ZZ}(f) \end{pmatrix} = \underline{F(f)}. \quad (2.4)$$

Chaque composante de $\underline{H(f)}$ étant une fonction complexe, discrète de la fréquence. En inversant chaque terme de la matrice de transfert, si un effort $\underline{F(f)}$ est mesuré, on estime qu'un effort $\underline{F'(f)} = \begin{pmatrix} F'_X(f) \\ F'_Y(f) \\ F'_Z(f) \end{pmatrix}$ a été produit, avec :

$$\underline{F'(f)} = \underline{F(f)} \underline{H^{-1}(f)} = \underline{F(f)} \begin{pmatrix} H_{XX}^{-1}(f) & H_{XY}^{-1}(f) & H_{XZ}^{-1}(f) \\ H_{YX}^{-1}(f) & H_{YY}^{-1}(f) & H_{YZ}^{-1}(f) \\ H_{ZX}^{-1}(f) & H_{ZY}^{-1}(f) & H_{ZZ}^{-1}(f) \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Il ne reste plus qu'à retransformer $\underline{F'(f)}$ dans le domaine temporel pour reconstruire le signal d'effort théoriquement subit par le système outil + platine. Notons que toutes les grandeurs sont exprimées dans le domaine complexe. Schématiquement, ce procédé est représenté en Figure 2.35.

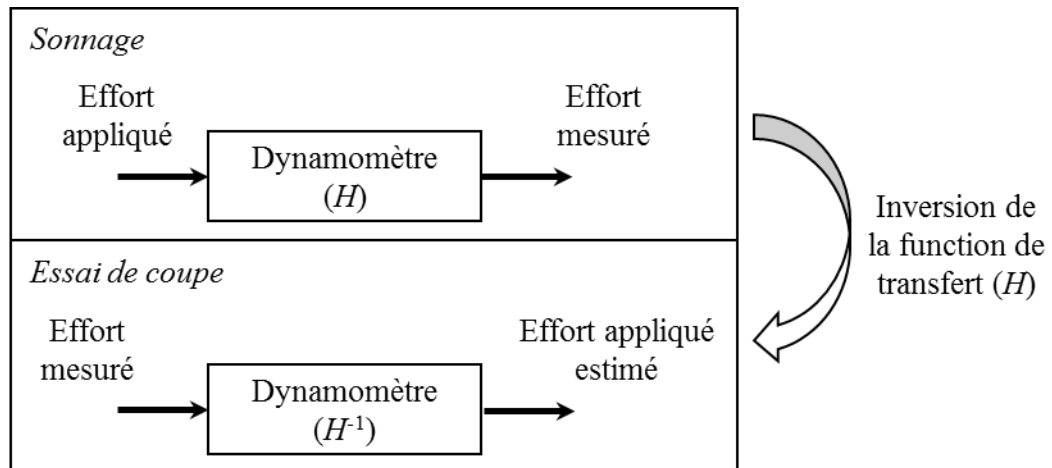


Figure 2.34 : Principe schématisé de la compensation dynamique.

De ces composantes sont calculées les modules de la fonction de transfert et sa phase en fonction de la fréquence ; en parallèle, la matrice de cohérence de cette fonction est également calculée (voir Figure 2.36). La cohérence indique le niveau de corrélation entre le signal mesuré et celui de sonnage, une cohérence de 1 indique une corrélation parfaite tandis qu'une cohérence de 0 indique l'absence de corrélation, ce qui est souvent le cas dans le cas d'antirésonances.

Des répétitions allant de 3 à 10 sonnages (selon les campagnes) ont été réalisées en vérifiant à chaque fois la qualité de l'impulsion et la cohérence des signaux ; les 3 signaux, moyennés, donnant la meilleure cohérence sont utilisés pour calculer la fonction de transfert $H(f)$ du système {platine dynamométrique + outil}.

2.8.2 Résultats et perspectives d'usage

La cohérence obtenue est bonne (supérieure à 0,9) dans le cas des composantes unidirectionnelles jusqu'à environ 9 kHz, mais au contraire mauvaise quelle que soit la fréquence pour les composantes croisées (lorsqu'on sollicite le système dans une direction et que la mesure des efforts est effectuée dans les deux autres directions).

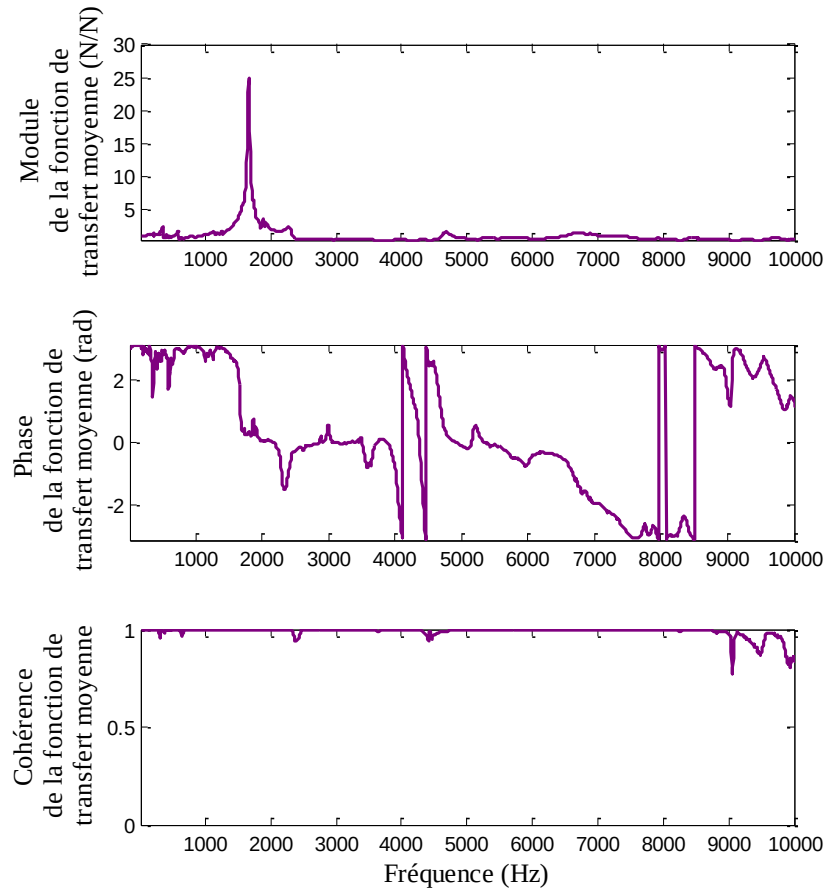


Figure 2.35 : Fonction de transfert et cohérence identifiées du système {platine + outil}.

Nous faisons donc l'hypothèse que les composantes croisées sont nulles, c'est-à-dire que solliciter l'outil dans la direction X ne génère aucun effort en Y. Bien qu'étant forte, cette hypothèse permet tout de même d'obtenir de bons résultats comme le montre la Figure 2.37. De plus, avant d'appliquer le traitement de compensation dynamique proposé, un filtre passe-bas (filtre de Butterworth d'ordre 4 réglé à une fréquence de coupure de 8 kHz) est appliqué aux signaux d'efforts de sorte à ne pas compenser faussement des composantes du signal à des fréquences correspondant à du bruit (largement hors du domaine fréquentiel identifié comme intéressant pour l'analyse des efforts de coupe et de la fragmentation).

La Figure 2.37 montre un signal non corrigé superposé avec un signal corrigé par cette méthode. Sur cette figure sont également représentés les instants de fragmentations des plaquettes obtenus d'après les observations de la coupe avec la caméra ultra-rapide.

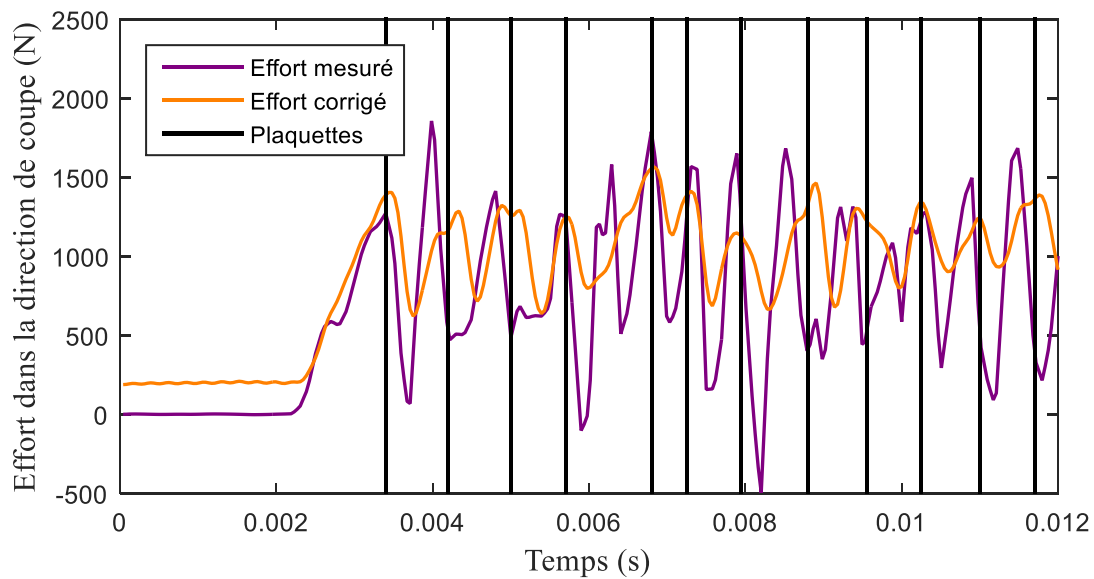


Figure 2.36 : Efforts mesurés et corrigés en fonction du temps, pour une fréquence de fragmentation d'environ 1467 Hz.

Dans les cas plus défavorables comme celui présenté Figure 2.38 où la fréquence de fragmentation (f_f) vaut environ 3 200 Hz, car la platine piézoélectrique coupe (atténuée fortement) les fréquences concernées par la fragmentation, le signal est plus complexe à compenser. De surcroît, les variations d'efforts sont d'amplitudes faibles puisque les plaquettes produites dans ces conditions sont fines car elles correspondent à de faibles sections coupées.

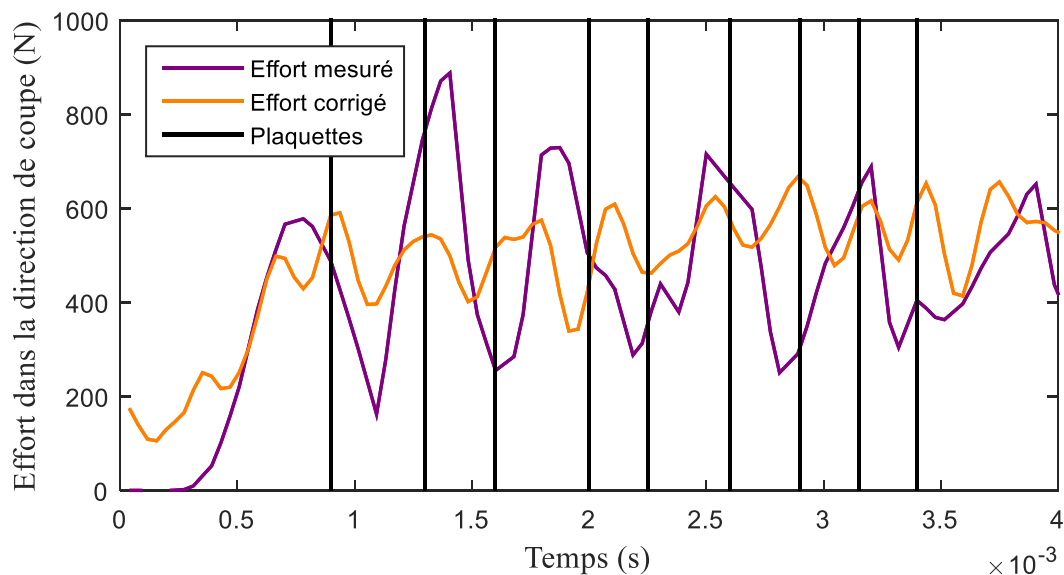


Figure 2.37 : Efforts mesurés et corrigés en fonction du temps, pour une fréquence de fragmentation d'environ 3200 Hz.

Le bénéfice du traitement est donc évidemment moindre, mais reste quoi qu'il en soit intéressant au vu des résultats obtenus (bien qu'il faille être attentif à de telles conditions

puisque les potentielles erreurs dues au traitement peuvent s'avérer importantes). Les erreurs pouvant amoindrir l'efficacité du traitement ne sont pas forcément imputables uniquement à ce dernier car, lorsque des plaquettes sont générées irrégulièrement, certaines d'entre elles peuvent être créées de façon très rapprochée : la fréquence d'apparition devient alors trop proche de la fréquence d'échantillonnage des signaux pour que le signal correspondant à la fragmentation soit retranscrit efficacement.

Pour les rares cas présentant des plaquettes apparaissant à des fréquences encore plus élevées se rapprochant soit de la fréquence d'échantillonnage soit de la fréquence où la cohérence de la fonction de transfert de la platine s'effondre, la compensation dynamique ne présente plus d'effet.

La compensation dynamique, même utilisée sous les hypothèses actuelles, présente un réel apport. Cependant, la prise en compte des termes croisés, ou l'amélioration de la méthode de compensation, en utilisant par exemple des filtres de Kalman (Kalman, 1960) pour représenter la fonction de transfert de la platine, peut potentiellement encore améliorer ce processus et conduire à des efforts plus proches de leurs valeurs réelles. L'efficacité de ces filtres ayant été prouvée au travers de plusieurs travaux concernant la correction des efforts de fraisage (Altintas & Park, 2004; Scippa et al., 2015).

L'intérêt de la compensation dynamique est certain afin de comparer proprement les mesures d'efforts aux simulations qui, elles, ne sont pas soumises à des oscillations du système de mesure. Les analyses présentées dans le corps du mémoire ne font pour autant état que des efforts moyens.

En optimisant le traitement jusqu'à pouvoir le réaliser en temps réel, il peut être envisagé pour les scieurs de connaître la taille des plaquettes générées en ligne. Cette information en temps réel permettrait d'adapter les paramètres de coupes (tels que la vitesse d'aménage ou la hauteur de la bille) pour contrôler et optimiser l'épaisseur des plaquettes produites.

2.9 Synthèse

L'étude de l'effet des principaux paramètres de coupe par canter a été réalisée en coupe orthogonale sur MOCN. Cinq variables ont été privilégiées, l'épaisseur et la largeur de copeau, la vitesse de coupe, la direction du fil et l'angle de bec de l'outil (couplé à son angle d'attaque). La configuration en coupe orthogonale a permis une instrumentation complète des essais.

Beaucoup de mesures ont été réalisées à partir du traitement des images de coupe afin de limiter la manipulation des éprouvettes afin de conserver l'état vert le plus proche possible de celui de l'arbre tout juste abattu, sans avoir à ré-humidifier artificiellement les éprouvettes.

Il s'est avéré que les grandeurs les plus influentes sur les efforts étaient logiquement la section coupée, mais aussi la direction du fil du bois. Chaque variable a conduit à des variations plus ou moins grandes des épaisseurs de plaquettes. Il a aussi été possible d'observer que certaines configurations entraînaient une variabilité plus forte que d'autres sur cette dimension, notamment l'angle du fil, qui est dommageable d'après les critères qualités nécessaire au bon traitement de ces plaquettes par l'industrie de la pâte à papier.

Etant donné que chaque paramètre a été étudié séparément, les tendances identifiées, qu'elles aient été quantifiées ou non, ne peuvent être utilisées dans un modèle analytique sans avoir étudié l'interaction entre les paramètres. Pour cela, un lot d'échantillons plus important et un plan d'expérience dédié à ce type d'étude devraient être réalisés.

Les tendances identifiées serviront majoritairement de référence afin de vérifier le bon comportement du modèle numérique développé. Retrouver les ordres de grandeur et principales tendances d'évolutions des épaisseurs de plaquettes paraît très important. Il en est de même pour l'évolution des efforts en fonction de la section coupée et de l'orientation du fil du bois. Le modèle présenté au Chapitre 5 devra donc à terme respecter les tendances pour être considéré comme fidèle à la réalité observée.

L'approche numérique choisie n'est pas de l'identification inverse, ce ne sont donc pas les essais de coupes eux-mêmes qui permettent la calibration du modèle. Les propriétés mécaniques du matériau doivent être étudiées et bien définies afin d'être intégrées dans le modèle numérique. C'est donc cette première étape dans le développement du modèle qui est présentée dans le chapitre suivant.