

Contexte et étude de Le bois

Le bois

Le bois est un matériau cellulaire d'origine végétale composé majoritairement de matière organique. Il est lui-même le composant majoritaire des plantes ligneuses (les arbres et arbustes). Malgré une image de matériau « vieux comme le monde » qu'il transmet contre son gré à son industrie, c'est un matériau extrêmement complexe dont de nombreuses propriétés physiques et mécaniques ne sont pas encore bien quantifiées. Il apparaît donc nécessaire de présenter les principales propriétés qui influent directement ou indirectement sur le travail de ce matériau par outil coupant et les connaissances déjà établies à ce sujet.

1.1.1 L'anatomie du bois – un matériau directionnel à toutes les échelles

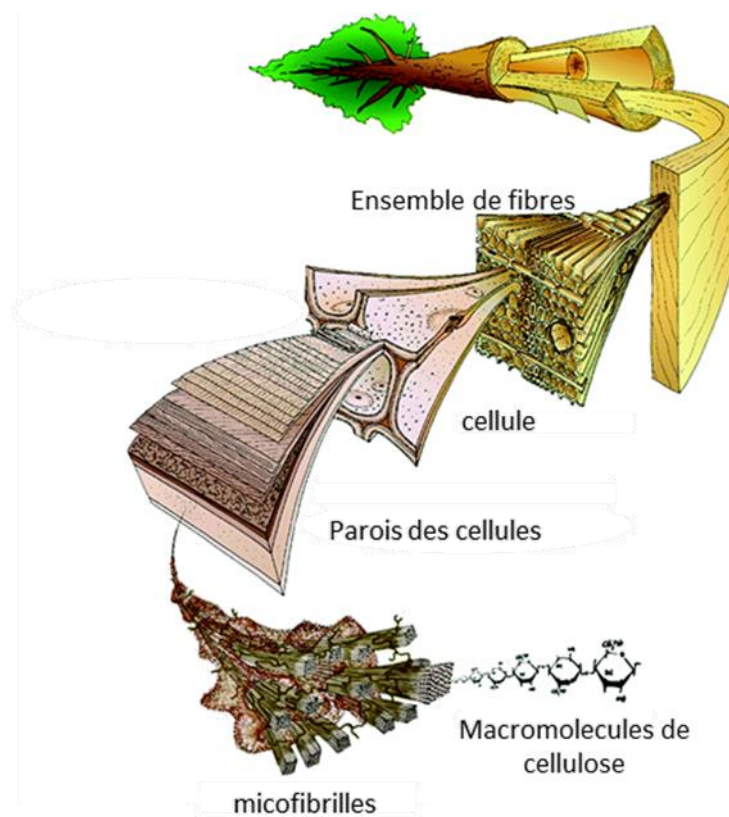


Figure 1.1 : Composition du bois d'après la représentation schématique de Mark Harrington.

Le matériau bois est un matériau composite naturel (Figures 1.1 et 1.2). Du point de vue structurel, Il est constitué principalement de cellules, les trachéides, appelées communément « fibres » de par leur nature très élancée. Ces fibres sont noyées dans une matrice, la lamelle mitoyenne. Une cellule de bois est elle-même composée de quatre couches : les couches S3, S2, S1 et la paroi primaire qui la sépare de la lamelle mitoyenne (Figure 1.3). Le centre de la cellule est appelé lumen et est empli soit d'air soit d'eau (soit des deux dans une proportion donnée) selon l'humidité du bois.

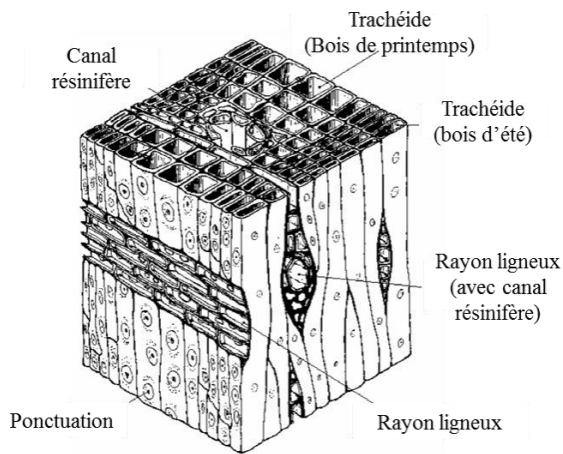


Figure 1.2 : Organisation cellulaire d'un bois résineux (Guitard, 1987).

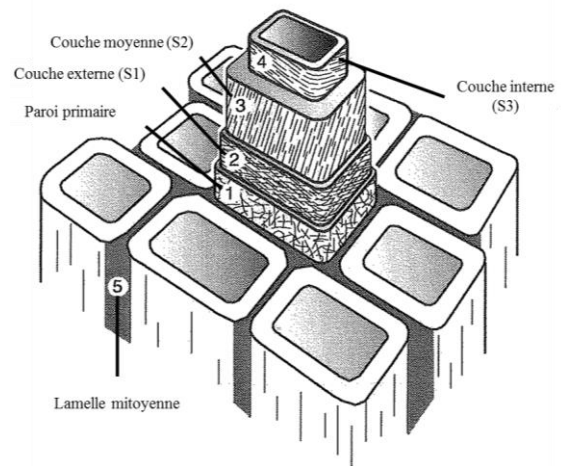


Figure 1.3 : Composition des cellules de bois, traduit de (Holmberg, 1998)

D'un point de vue chimique, trois principaux polymères forment le bois : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Leur proportion varie en fonction de la localisation dans la cellule. Cette variation est exposée dans la Figure 1.4, d'après des études de P. Navi (Navi & Heger, 2005). Une famille de composée, appelée les extractibles, est négligée de par sa présence en faible quantité et son impact quasi nul sur les propriétés mécaniques du bois.

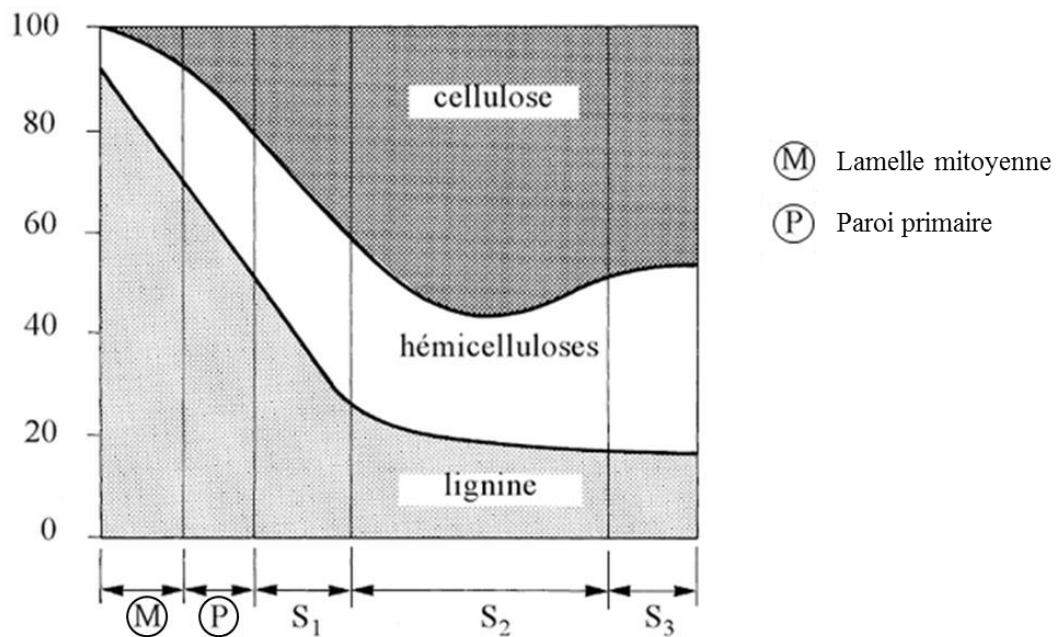


Figure 1.4 : Composition chimique d'une cellule de bois selon la localisation dans la cellule (Navi & Heger, 2005).

1.1.2 Un matériau orthotrope

La structure fibreuse présentée dans le paragraphe précédent confère au matériau bois des propriétés physiques orientées. On parle d'orthotropie cylindrique. L'orthotropie cylindrique (plus rigoureusement appelée anisotropie orthotrope cylindrique) est une caractéristique fortement marquée dans la plupart des bois. De par son anatomie, le bois possède une direction privilégiée, selon la direction dans laquelle il s'est développé. En effet les fibres sont orientées dans cette direction pour assurer l'assise mécanique de l'arbre. Cela est vrai aussi bien pour le tronc de l'arbre que pour ses branches. Il est notable que, celles-ci se développant dans des directions différentes du tronc, elles perturbent localement cette orthotropie.

A petite échelle, l'orthotropie cylindrique peut disparaître pour laisser place à une orthotropie simple (voir Figure 1.5).

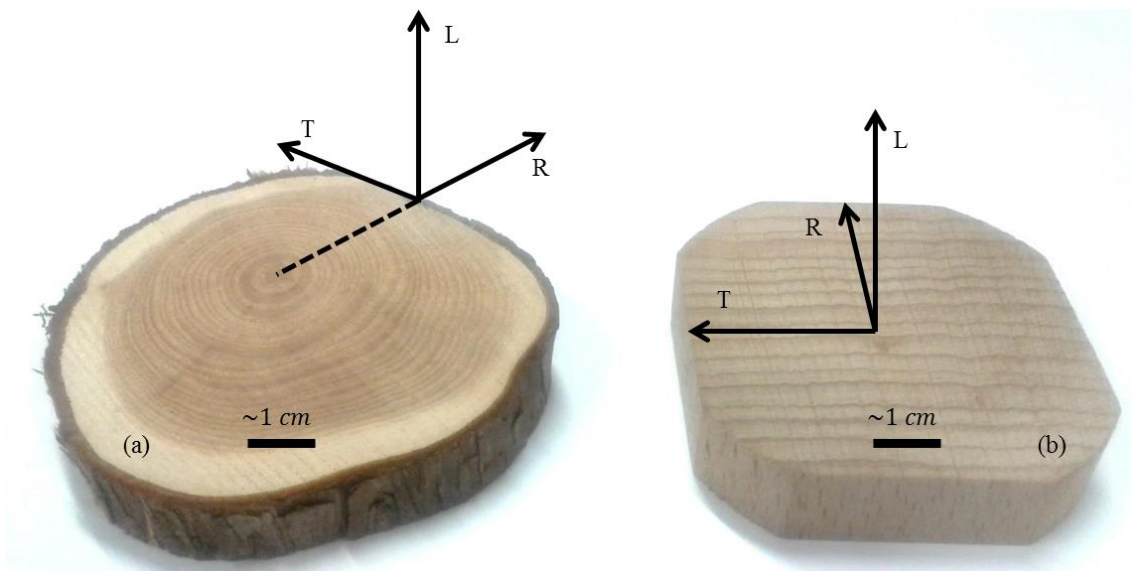


Figure 1.5 : (a) Echantillon de genévrier orthotrope cylindrique. (b) Echantillon de hêtre orthotrope simple.

1.1.3 Un matériau hétérogène

Le bois est un matériau hétérogène à toutes les échelles. A l'échelle de la ressource, deux arbres, ayant poussé dans les mêmes conditions environnementales peuvent présenter des propriétés singulièrement différentes. De plus, au sein d'un arbre le matériau en lui-même varie de sa périphérie vers sa moelle et de ses racines jusqu'au houppier. A l'échelle des centimètres, les branches sont à l'origine de nœuds aux propriétés très différentes en termes d'orientation et de valeurs du reste du bois composant l'arbre. Les hétérogénéités à cette échelle sont critiques lors de la mise en forme du bois par enlèvement de matière. A plus petite échelle, on retrouve encore de nouvelles formes d'hétérogénéités, comme elles auront moins d'importance vis-à-vis de la coupe du matériau, elles ne seront pas détaillées ici.

1.1.4 Un matériau hygroscopique

Les propriétés du bois évoluent en fonction de son humidité (et de sa température dans une moindre mesure). Il existe plusieurs définitions de l'humidité du bois. Dans ce manuscrit, toutes les humidités évoquées seront des humidités dites « sèches », c'est-à-dire correspondant à la proportion massique entre l'eau liquide et le bois. La définition mathématique de l'humidité $H\%$ est donc la suivante :

$$H\% = \frac{m_{eau}}{m_0} \times 100 = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100, \quad (1.1)$$

Avec m_{eau} la masse d'eau contenue dans un échantillon de bois, m_H la masse totale de l'échantillon et m_0 la masse de l'échantillon à l'état anhydre.

L'eau se trouve sous différentes formes dans le bois sur pieds (Figure 1.6), et ce à différents endroits :

- L'eau libre est présente dans les lumens. Lorsque le bois sèche, cette eau est la première à se vaporiser et à s'évacuer du bois.
- L'eau liée est présente dans les parois cellulaires. Cette eau s'évacue en second lors du séchage du bois, et sa perte entraîne des retraits dimensionnels du bois. Lorsqu'il ne possède plus d'eau libre mais seulement de l'eau liée, le Point de Saturation des Fibres (PSF) est atteint. Par défaut il est dit qu'il est atteint vers 30% d'humidité, mais en réalité le PSF peut s'écarter de plus d'une dizaine de pourcents de cette valeur selon les bois dans un sens comme dans l'autre.

Le bois dit « vert » est du bois dont les cellules contiennent encore de l'eau libre. Son humidité est donc élevée et supérieure au PSF. Dans cet état, l'évolution de son humidité n'entraîne pas de retrait dimensionnel du matériau.

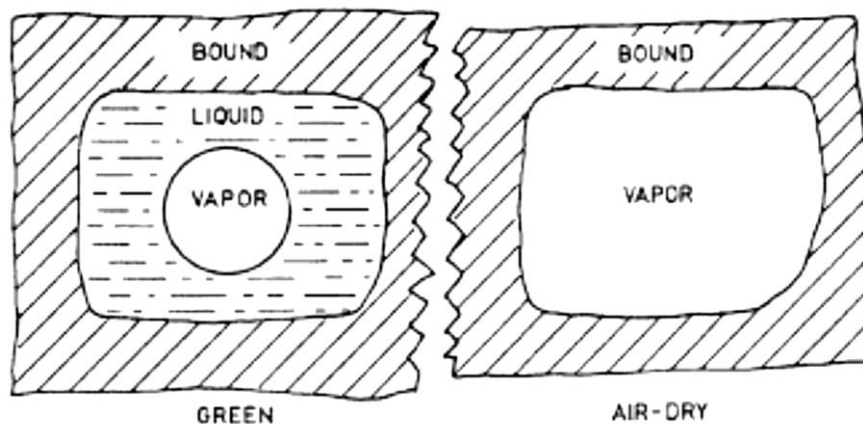


Figure 1.6 : Représentation schématique de l'état de l'eau dans une cellule de bois vert et une cellule de bois séchée à l'air libre (Skaar, 1988).

1.2 Première transformation du matériau bois et sciage

La première transformation du bois s'étend de « l'arrivée du bois en scierie » jusqu'au bois « scié », « tranché », « déroulé », « fendu » ou « déchiqueté » selon l'application finale de ces produits semi-finis (ONF, 2018), voir Figure 1.7. On y adjoint souvent l'industrie de la trituration. La flèche rouge représente les plaquettes produites en scierie et le sujet central de cette étude.

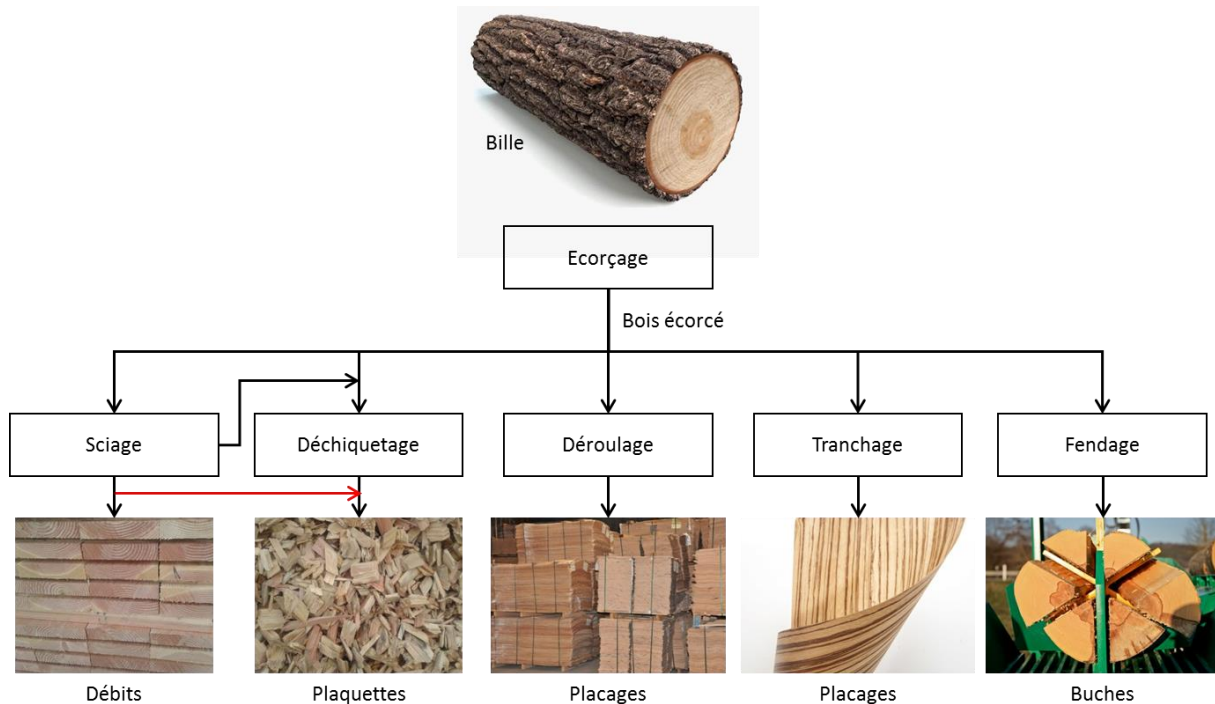


Figure 1.7 : Usages du bois dans la première transformation. La trituration est omise.

Dans l'industrie de première transformation le bois travaillé est « vert » car il est en général frais d'abatage ou n'a que peu amorcé son séchage.

1.2.1 Cas du sciage

1.2.1.1 L'écorçage

Le sciage se fait suivant plusieurs opérations successives : en premier lieu l'écorçage. Il s'agit de retirer l'écorce de la grume afin de protéger les outils coupants utilisés et de ne pas polluer les plaquettes et copeaux avec de l'écorce. En effet, les écorces, en plus d'être plus simples à valoriser séparément du reste de l'arbre, contiennent souvent des corps étrangers comme des minéraux par exemple, dangereux pour l'intégrité de l'outillage.

1.2.1.2 L'équarrissage

La grume écorcée est ensuite généralement surfacée (Figure 1.8) à partir de fraises coniques de grand diamètre (de l'ordre de grandeur du mètre) appelées : slabber si une seule

tête de fraisage est utilisée (en anglais, « slab » désigne une dosse), ou canter si deux têtes de fraisages travaillent en opposition pour usiner deux faces de la grume en une seule passe (en anglais, « cant » signifie équerri). Il est notable pour éviter toute confusion qu'en anglais, l'usage est de parler uniquement de « canter » ou de « chipper-canter », même pour désigner un slabber. Afin de ne pas compliquer la nomenclature, le terme « canter » sera donc utilisé indépendamment du nombre de tête de fraisage, car il est le plus usité dans les métiers de la scierie.

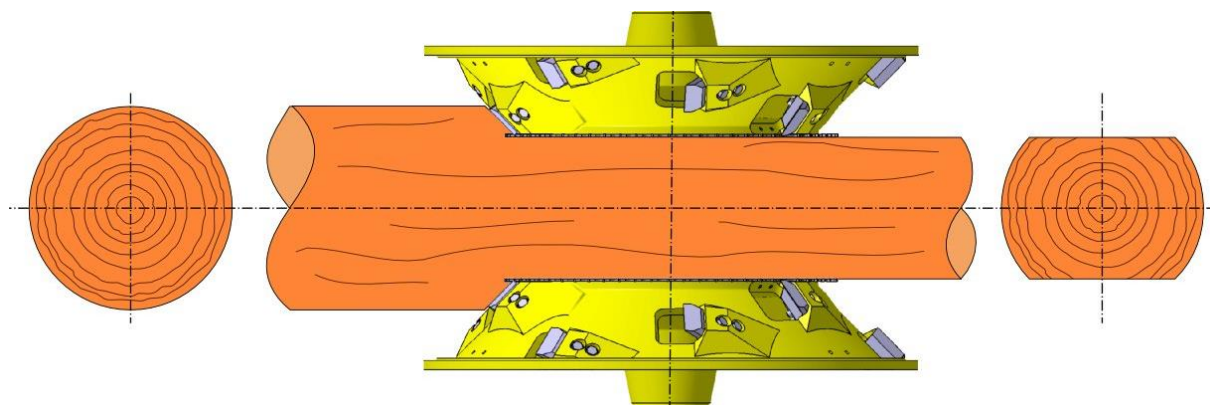


Figure 1.8 : Action d'un canter d'après LBL-Brenta-CD et (Pfeiffer, 2015).

Les outils montés sur ces fraises sont généralement de deux types. Le premier est l'outil de déchetage, la majorité du temps, ce sont des couteaux. Ils servent à l'enlèvement de matière. Le second est un outil de finition, il peut s'agir de couteaux prolongeant ceux de déchetage avec un angle différent ou d'une scie circulaire rapportée (Figures 1.9 et 1.10). Comme son nom l'indique, cet outil est présent pour assurer l'état de surface désiré sur l'équerri.

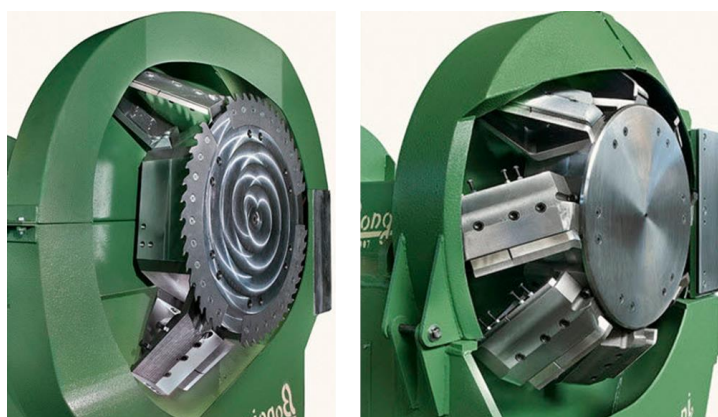


Figure 1.9 : Canter à couteaux longs. A gauche : muni d'une scie circulaire de finition ; à droite : muni de couteaux de finitions (BONGIOANNI s.r.l).

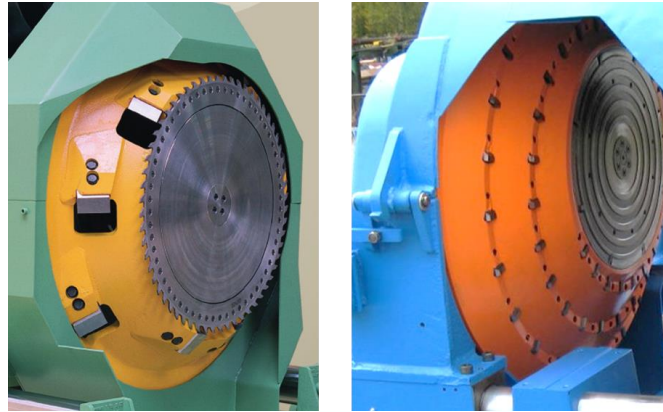


Figure 1.10 : Canter à couteaux courts. A gauche : disposés en hélice (LBL-BRENTA-CD) ; à droite : disposés en spirale (Söderhamn Eriksson AB).

Les couteaux transforment progressivement la partie extérieure de la grume en plaquettes. En effet, sous l'action de ceux-ci, le copeau se délite en fragments. Ce phénomène est illustré par la Figure 1.11.

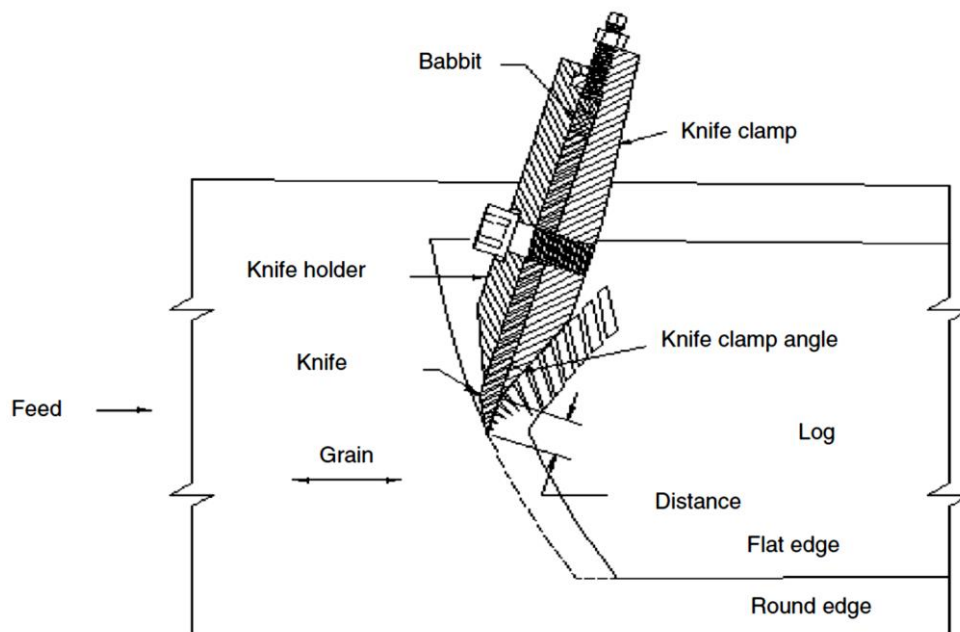


Figure 1.11 : Action d'un couteau de canter sur le billon et fragmentation du copeau en plaquettes (Hernandez & Quirion, 1995).

1.2.1.3 Le débit

Les billes ainsi équarries sont ensuite débitées par des unités de sciages de têtes puis de reprises (équipées de scies circulaires ou à ruban) pouvant être associées à d'autres canters. La Figure 1.12 représente cette étape réalisée par deux trains de scies circulaires.

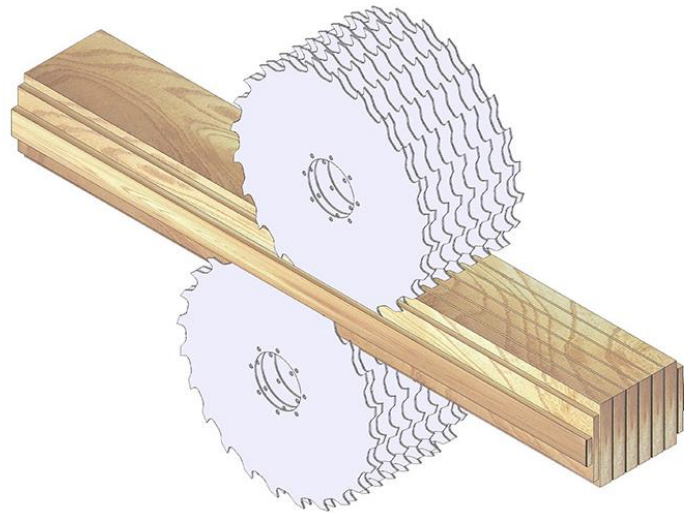


Figure 1.12 : Débit d'un équerri par deux trains de scie circulaires (LINCK Holzverarbeitungstechnik GmbH).

1.2.2 Les directions de coupe

Du fait de l'anisotropie du bois, la direction de coupe revêt une importance capitale dans les mécanismes mis en jeu lors de l'enlèvement de matière. C'est par ailleurs un des paramètres qui différencie les divers procédés de coupe liés à la première transformation du bois.

E. Kivimaa et W. McKenzie, sont les deux auteurs de référence sur l'étude des procédés de coupe du bois, et c'est la nomenclature qu'ils ont défini au milieu du siècle dernier qui est d'usage encore aujourd'hui. (Kivimaa, 1950) décrit trois principaux modes de coupe : la coupe longitudinale, la coupe radiale, et la coupe tangentielle. Le mode est régi par l'angle formé entre la direction de coupe et la direction des fibres du bois. Lorsque la direction de coupe est parallèle au fil du bois, la coupe est dite longitudinale (B). Lorsqu'elle est parallèle à la direction transverse, la coupe est dite transverse (A), et la logique est la même pour la coupe radiale (C). La Figure 1.13 représente schématiquement ces directions dans une coupe de bois, les flèches correspondent à la direction d'avance de l'arête de coupe.

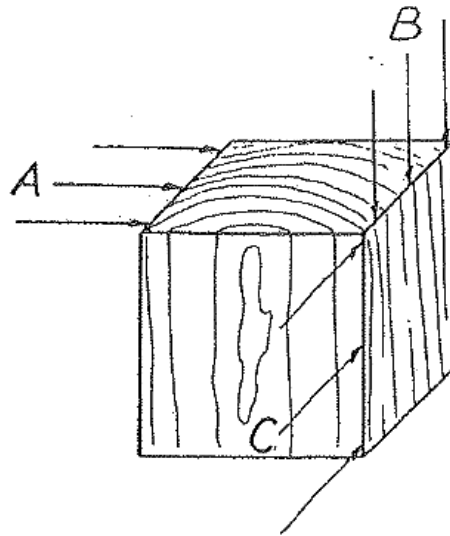


Figure 1.13 : Les différents mode de coupe (Kivimaa, 1950).

(McKenzie, 1961) a apporté un second degré de définition dans les directions de coupe en ajoutant une seconde direction indicatrice. Les modes de coupes définis sont nommés « $90^\circ - 90^\circ$ », « $90^\circ - 0^\circ$ » ou « $0^\circ - 90^\circ$ ». Le premier angle renseigné dans le nom du mode est celui formé entre l'arête de l'outil et le fil du bois tandis que le second est l'angle formé par la trajectoire de l'outil et le fil. C'est cette terminologie qui est majoritairement utilisée aujourd'hui. La Figure 1.14 ci-dessous représente la nouvelle schématisation, les traits non terminés par des flèches symbolisent l'arête de coupe.

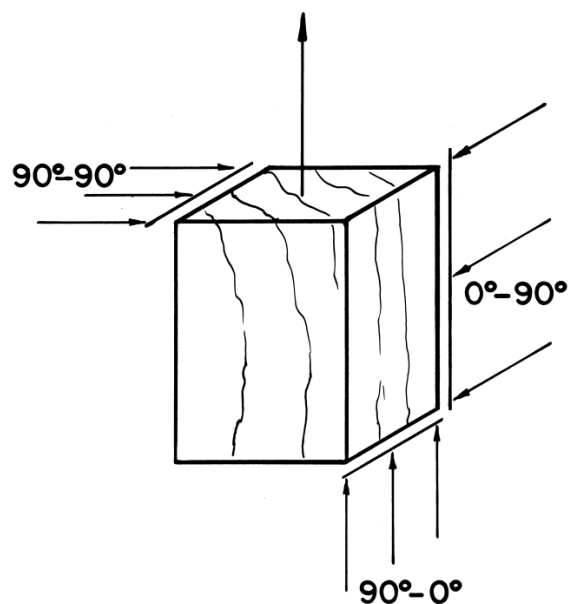


Figure 1.14 : Les différents modes de coupe (McKenzie, 1961).

L'opération d'équarrissage peut être comparée à de la coupe $90^\circ - 90^\circ$ car phénoménologiquement c'est le mode de coupe dont elle se rapproche le plus. Cependant ce n'est pas parfaitement exact. Un modèle cinématique (voir Figure 1.15) a été développé pour

illustré l'évolution des angles de coupes au cours de l'opération de surfacage (Pfeiffer et al., 2014).

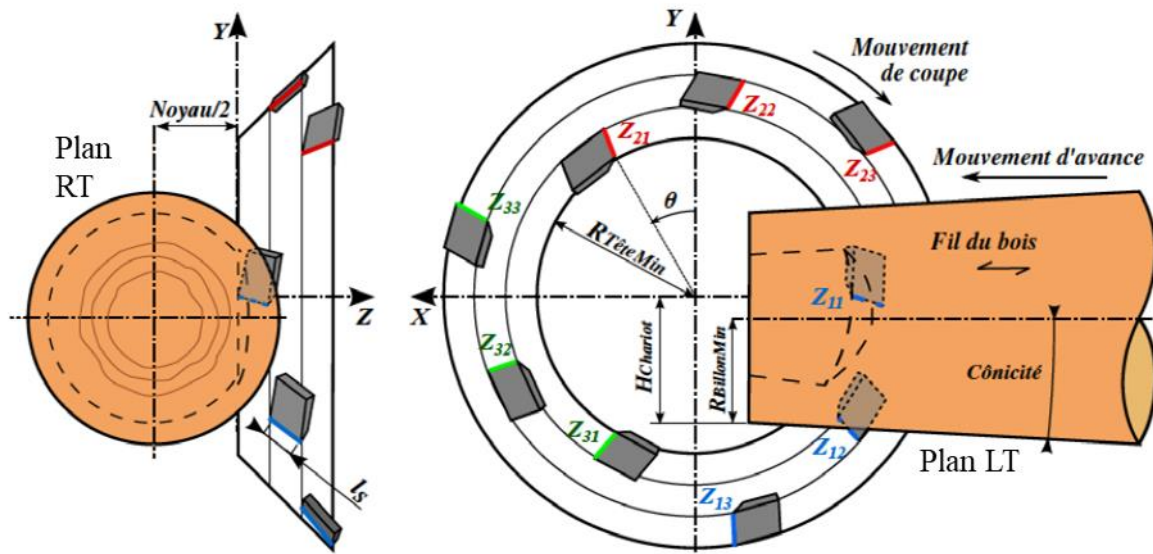


Figure 1.15 : modèle cinématique de coupe par canter d'après (Pfeiffer et al., 2014).

La coupe par canter, pour être précis, doit être exprimée comme de la coupe $\kappa^\circ - GD^\circ$, avec κ et GD deux angles variant au cours de la coupe. L'arête de coupe présente un angle de 45° par rapport au fil du bois dans le plan LR et un angle variant de façon sinusoïdale au cours du temps dans le plan LT. L'angle dans la direction de coupe évolue de la même façon que le précédent.

1.2.3 Les efforts de coupe

Les efforts de coupe générés lors du procédé d'équarrissage sont élevés pour des opérations d'usinage du fait des sections coupées (environ $30 \times 25 \text{ mm}^2$, mais elles sont très variables). Le modèle développé dans ces travaux se doit d'approcher au mieux ces efforts afin de permettre d'étudier les puissances requises par ce procédé. L'étude traite des facteurs influençant les efforts de coupe, pas uniquement dans le cas de l'équarrissage à cause du manque de données mais également dans le cas de la coupe du bois en général.

1.2.3.1 Le matériau

L'essence

Les essences de bois possèdent des propriétés si variées entre elles que le résultat d'une simple comparaison peut s'avérer complexe à analyser. En effet, l'essence est une « macropropriété » englobant des écarts de propriétés mécaniques multiples et importants d'une essence à l'autre. En mesurant au préalable les propriétés mécaniques d'échantillons de bois, il est possible d'estimer, dans une certaine mesure, les efforts de coupe lors d'une opération de fraisage en s'affranchissant du paramètre « essence » (Eyma et al., 2004).

La masse volumique

La masse volumique ρ d'un échantillon de bois est défini comme suit à une humidité H donnée :

$$\rho = \frac{m_H}{V_H}, \quad (1.2)$$

avec m_H et V_H respectivement la masse et le volume de l'échantillon à l'humidité H .

Une seconde définition, très fréquemment utilisée est l'infradensité ρ_i , c'est-à-dire le rapport entre la masse volumique de l'échantillon de bois à l'état anhydre m_0 et son volume lorsqu'il est saturé en eau V_s :

$$\rho_i = \frac{m_0}{V_s}. \quad (1.3)$$

Si l'influence linéaire de la masse volumique sur les efforts de coupe est communément admise, elle est régulièrement remise en question car la corrélation est relativement faible. Deux écoles « s'affrontent ».

D'une part, (Kivimaa, 1950) met en évidence une relation linéaire entre infradensité et efforts de coupe avec une très bonne corrélation, tout comme (Grönlund, 1988).

D'autres auteurs, notamment (Chardin, 1958) et (Koch, 1964) montrent qu'une régression linéaire est peu efficace. La tendance obtenue lors de leurs essais étant en effet linéaire mais avec une corrélation faible et un nombre de points aberrants conséquent.

Enfin, il est possible de trouver des contre-exemples forts. (Gonçalves et al., 1997) en ayant réalisé des essais de coupe sur 10 essences brésiliennes a montré que les efforts de coupe pouvaient être élevés même sur des essences à faible infradensité et plus faible sur des essences plus denses.

Cependant, les conclusions de la plupart des études citées convergent sur l'affirmation que cette relation est correcte dans le cas d'une étude concernant une seule essence de bois.

L'humidité

Etant donné que l'humidité influe sur les propriétés mécaniques du matériau de façon significative (Guitard, 1987; Kollmann & Côte, 1968; Ross, 2010), elle présente forcément des conséquences sur les efforts de coupe.

(Kivimaa, 1950) a porté son attention sur ce paramètre dans le cas de l'usinage du bouleau et a montré que pour une humidité de 10% il obtenait des efforts de coupe maximum, décroissants lentement en dessous ou au-dessus de cette humidité jusqu'à atteindre des efforts quasiment constants passé le PSF. L'humidité maximum testée était seulement de 50%. S'il paraît pertinent de supposer qu'une fois le PSF atteint, le remplissage partiel des lumens ne provoque pas de conséquences fortes sur les efforts de coupe, à très haute humidité, une fois le bois et les lumens complètement saturés d'eau, il n'est pas certain que la conclusion précédente demeure toujours applicable. Une hypothèse est avancée sur ce phénomène section 3.5.1. L'observation d'un maximum local à faible humidité est quant à elle sans doute liée à un maximum de rigidité du bois autour de cette humidité comme mesuré par (Neuhaus, 1983)

sur de l'épicéa, entraînant des efforts plus élevés qu'à d'autres humidités où sa rigidité est plus basse.

La température

Toujours dans le cadre de l'usinage du bouleau (Kivimaa, 1950) a montré que les efforts de coupe diminuent avec l'augmentation de la température quelle que soit la direction de coupe. Ceci de façon linéaire sauf autour de 0° où un palier net a lieu du fait de la transition entre eau gelée et eau liquide. Cette étude a été menée entre -15°C et 80°C . A nouveau, ce comportement semble corrélé avec l'évolution des propriétés mécaniques du matériau sur cette plage de température (Hernández et al., 2014).

Les singularités

La présence de nœuds a un impact sur les efforts de coupe. En effet les nœuds sont souvent plus denses que le reste du bois et présentent une fibre à l'orientation très différente (presque orthogonale dans la plupart des cas) de celle du bois sans défaut. Traverser un nœud lors de la coupe peut avoir des impacts différents selon les directions de coupe. Lors d'essais de coupe orthogonale, tangentielle, sur de l'épinette blanche, la présence de nœud décuple localement les efforts dans la direction de coupe (Caceres et al., 2018).

1.2.3.2 Le procédé

La largeur coupée

Il est communément admis que la largeur de coupe a une influence proportionnelle sur les efforts de coupe.

L'épaisseur (moyenne) de copeau

Dans le cadre de la coupe orthogonale, l'épaisseur de copeau est constante. Quand le problème est généralisé aux procédés traditionnels de fraisage, il est plus avisé de traiter de l'épaisseur moyenne de copeau car celle-ci évolue au fur et à mesure de la coupe, le copeau formant une « virgule ».

L'épaisseur moyenne du copeau (à ne pas confondre avec l'épaisseur des plaquettes, voir Figure 1.16) correspond en fait à la longueur des plaquettes. Elle présente aussi une influence linéaire sur les efforts de coupe (Martin & Sales, 1994) ce qui est souvent repris dans les modèles analytiques usuels de calcul des efforts de coupe.

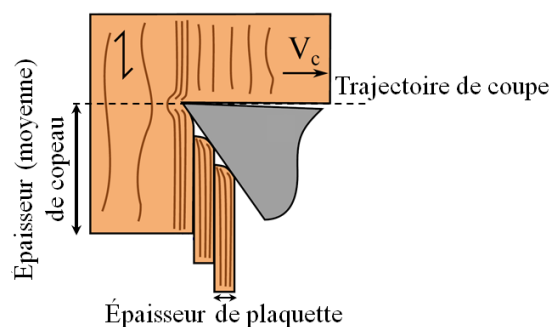


Figure 1.16 : Fragmentation du copeau en plaquettes d'après (Pfeiffer, 2015)

La direction de coupe (par rapport au fil)

La direction de coupe influe sur les efforts de coupe à cause de l'anisotropie du matériau. En employant la notation de Kivimaa, les études s'accordent et indiquent que la coupe selon le mode Transverse (A) génère des efforts plus importants que la coupe en mode Longitudinal (B) qui sont eux aussi plus importants que les efforts engendrés par la coupe en mode Radial (C) (Franz, 1958; Kivimaa, 1950; Martin & Sales, 1994).

Plus récemment, pour une application liée à l'équarrissage, cela a été réévalué avec une variation d'angle plus fine et cohérente avec ce procédé par S. Kuljich (Kuljich et al., 2013). Quatre directions ont été testées : $0^\circ - 90^\circ$, $15^\circ - 75^\circ$, $30^\circ - 60^\circ$, $45^\circ - 45^\circ$. Les conclusions de cette étude montrent que les efforts étaient maximums en direction $45^\circ - 45^\circ$, intermédiaires en coupe $0^\circ - 90^\circ$ et minimum en $15^\circ - 75^\circ$ et $30^\circ - 60^\circ$. A une échelle encore plus fine, mais des sections cependant très éloignées de celles s'apparentant à la présente étude, des essais de fraisages du bois ont été réalisés en coupe $90^\circ - GD$ avec GD variant intégralement sur 180° (Costes et al., 2004; Goli et al., 2009). Les deux études montrent que les efforts de coupe sont étroitement liés à GD , avec des forces mesurées pouvant évoluer du simple au quintuple.

La vitesse de coupe

Le matériau bois, surtout à son état « vert », étant visqueux, ses propriétés mécaniques sont dépendantes de sa cinématique de sollicitation. Donc même si la vitesse de coupe est considérée comme un paramètre non influant sur les efforts (ou plus précisément, dont la combinaison de ses influences le rend négligeable) de coupe du bois sec (Chardin, 1954; McKenzie, 1961), il est possible que des différences soient relevées lors de l'usinage du bois vert.

1.2.3.3 L'Outil

La dent de l'outil de coupe (Figure 1.17) est définie par son matériau, sa géométrie (trois angles), et son acuité d'arête. Les trois principaux angles de coupe liés à la dent sont : son angle d'attaque α (ou angle de coupe), son angle de taillant β , et son angle de dépouille γ . L'étude des angles d'outils doit respecter la règle suivante : la somme des trois angles le décrivant est toujours égale à 90° . Il est donc impossible de faire varier un angle donné sans faire varier au moins l'un des deux autres.

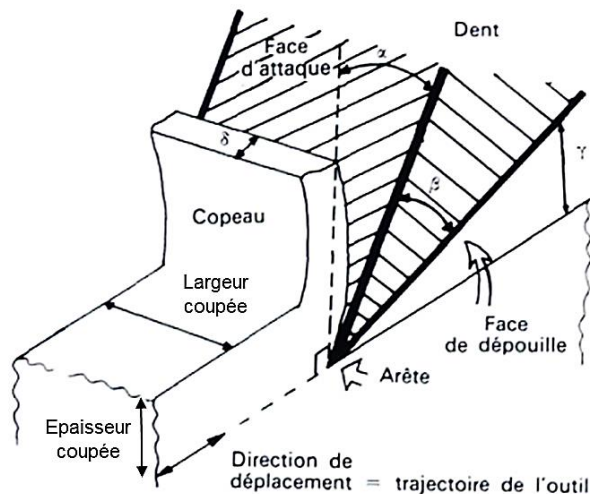


Figure 1.17 : Paramètres de coupe liés à l'outil et au copeau d'après (Sales, 1990).

Matériau et revêtement

Le matériau de l'outil et son revêtement peuvent avoir une influence sur le coefficient de frottement avec le bois usiné, de ce fait les efforts peuvent être orientés différemment dans l'espace selon le matériau choisi. Cependant on peut supposer que cet impact reste très limité par rapport à d'autres critères précédemment cités liés au matériau usiné et aux paramètres du procédé.

(Kivimaa, 1950) a testé trois différents types d'alliages, de l'acier à faible teneur en carbone, de l'acier à haute teneur en carbone et du carbure de tungstène. Des efforts initiaux différents sont mis en exergue mais Kivimaa les impute à des différences d'acuité mais ne met pas en cause les matériaux. Après 1 km de bois usiné, les efforts divergent par contre fortement du fait de l'usure beaucoup plus rapide des couteaux en acier. En faisant le parallèle entre puissance de coupe et usure de l'outil, recouvrir des inserts de nitrure de chrome a permis de diminuer l'usure dans le temps des outils (Djouadi et al., 2000). En sus, ce dépôt semblait réduire également la puissance consommée dès l'état initial et donc les efforts de coupe.

Angle d'attaque (ou de coupe)

Généralement, une augmentation de l'angle d'attaque diminue les efforts de coupe (Chardin, 1954). E. Kivimaa (Kivimaa, 1950) remarque néanmoins, qu'entre 43° et 55° selon les configurations testées, la tendance s'inverse et les efforts de coupe augmentent.

Dans le cas de l'équarrissage, l'angle de coupe peut s'avérer en effet important à maîtriser. S. Kuljich (Kuljich et al., 2013) montre une influence bien définie en accord avec les observations de A. Chardin : son augmentation diminue les efforts de coupe.

Cependant, cet angle ne peut être augmenté indéfiniment sous peine d'obtenir un outil extrêmement fragile et peu résilient.

Angle de bec (ou de taillant)

L'Angle de taillant n'a pas une influence forte sur les efforts de coupe, qui sont principalement induits par l'angle de coupe. Néanmoins, un angle de taillant trop faible

fragilise l'outil et il existe un angle limite, fonction du matériau de l'outil et de la direction de coupe, pour lequel la vitesse d'usure de l'outil augmente très fortement.

Angle de dépouille

Comme l'angle de taillant, l'angle de dépouille n'a pas d'influence notable sur les efforts de coupe mais est régi par deux limitations. D'une part, il est nécessaire pour éviter le talonnement, et nécessite d'être suffisamment grand pour faire son office. D'autre part, il ne doit pas dépasser une certaine grandeur (généralement fixée à 15°) afin que l'angle de bec et l'angle d'attaque puissent être assez grands pour assurer des conditions de coupes optimales.

Acuité de l'arête

(Chardin, 1954) en ayant affuté un outil (scie à ruban) avec deux meules différentes (grains de 30 microns ou 100 microns), obtient une décroissance nette des efforts avec la meule aux grains les plus fins. L'effet est encore plus remarquable lors des essais d'usures (Chardin, 1954; Kivimaa, 1950) où les efforts croissent fortement avec l'usure de l'outil. La difficulté lors de ces essais afin de donner des effets quantifiés est la méthode de mesure de l'acuité d'arête.

1.3 La valorisation des plaquettes

1.3.1 Les critères de qualité des plaquettes pour l'industrie papetière

L'industrie papetière définit des critères de qualité sur les dimensions des plaquettes qu'elle approvisionne (Figure 1.18). On trouve des critères normatifs, mais également plus élaborés issus de certains travaux de recherche. La norme faisant référence est la (SCAN-CM 40 01, 2001). Elle classe les plaquettes par épaisseur (voir Figure 1.19) et donne le moyen de quantifier la proportion de plaquettes d'une production donnée dans chacune des classes d'épaisseur. Le principe est celui du criblage : la production est tamisée par cinq grilles aux dimensions normées successivement. Les plaquettes retenues par une grille sont attribuées à une catégorie allant de « trop grosses » à « fines ». En fonction de leur catégorie, les plaquettes peuvent être soit refusées, soit acceptées, ou encore acceptées mais dévalorisées par le papetier.

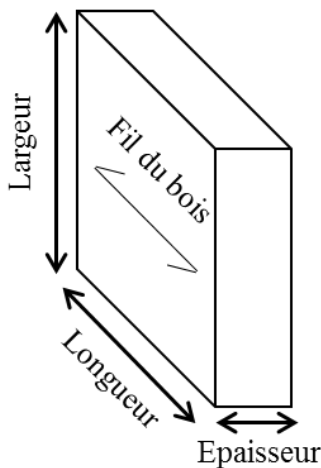


Figure 1.18 : Dimensions d'une plaquette.

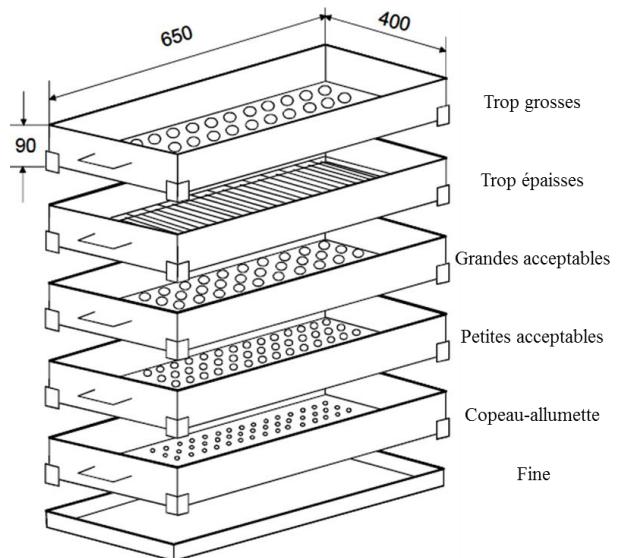


Figure 1.19 : Tamisage et classes d'après la norme (SCAN-CM 40 01, 2001).

En plus du critère de taille, l'importance est mise sur la régularité de la taille des plaquettes dans une production (Akhtaruzzaman & Virkola, 1979; Brännvall, 2017).

1.3.2 L'optimisation du procédé de fraisage

Les critères influant sur l'épaisseur des plaquettes et la régularité de cette dimension sont très nombreux. De même que pour les efforts, les propriétés affectant majoritairement les dimensions des plaquettes sont classables dans les trois mêmes catégories :

1.3.2.1 *Le matériau*

Le premier jeu de paramètres ayant un effet sur l'épaisseur des plaquettes est lié aux propriétés physiques du matériau usiné.

L'essence

R. Hernández (Hernández & Quirion, 1995) a montré que les plaquettes générées lors d'essais d'usinage par canter de deux essences résineuses différentes (le sapin baumier et l'épinette blanche) présentaient des proportions différentes selon les classes de la norme SCAN-CM 40:01. Néanmoins les différences n'étaient que de quelques pourcents voire moins d'un pourcent dans chaque classe. Finalement l'impact de l'essence de bois n'est que peu étudié car c'est une « macro-propriété » englobant beaucoup de « sous-propriétés » à la fois.

La masse volumique

Parmi ces « sous-propriétés », sans descendre à l'échelle anatomique, on peut citer la masse volumique. C. Cáceres (Cáceres et al., 2015) a étudié l'influence de ce paramètre, et plus finement de la proportion de bois d'été et de bois de printemps (donc de la variation de densité au sein de l'arbre). Cette étude montre, dans le cas de deux provenances présentant des vitesses de pousses différentes, et donc de densité, que plus la densité du bois est grande, plus les plaquettes générées ont tendances à être fines. Si la cause n'est pas identifiée précisément, les densités mesurées étaient corrélées aux propriétés mécaniques (résistance en flexion et au cisaillement quasi-statiques).

L'humidité et la température

Au-dessus de 0 °C et en dessous de 40 °C, l'humidité du bois n'affecterait pas suffisamment ses propriétés mécaniques à l'origine de la fragmentation des plaquettes pour en changer les dimensions (Hernández et al., 2014). Par contre en dessous de 0 °C, à cause des problématiques de gel de l'eau au sein du bois, cette affirmation ne serait plus vraie. Il a d'ailleurs été observé que dans des conditions de coupes similaires, les plaquettes produites étaient généralement plus fines en hiver (au Canada) qu'en été (Hernández & Boulanger, 1997).

Les singularités

L'influence de la présence de singularités (bois de réaction, bois de tension, bois de compression) n'a pas été étudiée mais peut potentiellement avoir un impact sur la fragmentation des plaquettes puisque ces zones de bois présentent des propriétés mécaniques et physiques différentes du bois sans défaut. Il en est de même pour les nœuds, les ruptures dans le bois ayant tendance à suivre le fil.

1.3.2.2 *Le procédé*

Largeur coupée

La largeur coupée est directement égale à la largeur des plaquettes. Plus cette grandeur est élevée, plus les plaquettes générées sont épaisses (Cáceres et al., 2015; Hernandez & Lessard,

1997). Néanmoins, une relation entre ces deux mesures n'est pas identifiée plus précisément car elle semble influencée par d'autres paramètres (épaisseur coupée, provenance, etc...). Les épaisseurs de plaquettes augmentent au maximum de 20% pour une largeur coupée doublant entre environ 12.5 mm et environ 25 mm.

Épaisseur coupée

L'épaisseur coupée est égale à la longueur des plaquettes lorsque la coupe est parfaitement perpendiculaire à la fibre, ou de façon plus générale, lorsque la direction de coupe forme un angle GD avec le fil du bois :

$$longueur = \frac{\text{épaisseur coupée}}{\cos(GD)} \quad (1.4)$$

La longueur des plaquettes, à un impact quasi linéaire sur l'épaisseur des plaquettes. Cela a été remarqué par (Hartler, 1963; Twaddle, 1997; Curti et al., 2017) sur des dispositifs expérimentaux différents.

Direction de coupe

Certaines lignes de sciage sont équipées d'un système permettant de régler le positionnement de l'axe de la grume par rapport à celui du canter, permettant de l'excentrer plus ou moins par rapport au centre de rotation du canter, donnant ainsi accès à des directions de coupe plus ou moins parallèles à la fibre du bois. On parle de hauteur de la bille. Ce paramètre semble très efficace pour faire varier les géométries de plaquettes générées afin de viser une production donnée. En effet, éloigner les deux axes permet de diminuer l'épaisseur des plaquettes générées (Kuljich et al., 2017; Laganière, 2004). Notons que le positionnement de la grume influe en réalité sur deux sous-paramètres : la direction de coupe et l'angle d'attaque mais qu'ils n'ont pas été traités indépendamment dans les travaux cités.

Vitesse de coupe

L'effet de la vitesse de coupe a été investigué par R. Hernandez (Hernandez & Boulanger, 1997). Seulement, les travaux ont étudié l'effet de modifications dans la vitesse de rotation des canters à vitesse d'avance constante, donc ils modifient également l'avance par dent (l'épaisseur coupée). Les résultats sont d'ailleurs similaires à ceux observés lors de l'étude de l'influence de l'épaisseur coupée : plus elle est faible, plus les plaquettes générées sont fines. A nouveau B. Laganière (Laganière, 2004) a étudié l'effet de la vitesse d'avance à vitesse de rotation constante et inversement, donc indirectement, l'épaisseur coupée est modifiée, et l'épaisseur de plaquette suit encore la même tendance que l'épaisseur coupée.

1.3.2.3 L'outil

Matériau et revêtement

Il n'existe pas d'étude portant sur l'influence du matériau du couteau et de son revêtement sur l'épaisseur des plaquettes générées. Dans le cas d'un outil neuf, il est possible de supposer que l'influence doit être très faible (bien que des angles de frottements peuvent

conduire à un chargement de la matière différent lui aussi). Néanmoins, l'usure du couteau n'est, quant à elle, pas anodine et le matériau et son revêtement influent évidemment sur la vitesse d'usure de l'outil et sa durée de vie.

Angle d'attaque

(Hernández & Quirion, 1995) ont réalisé des essais d'équarrissage en utilisant deux systèmes de fixations de couteaux sur un canter, donnant un angle d'attaque (et de dépouille en conséquence) différent à l'outil. La configuration présentant l'angle d'attaque le plus grand a généré les plaquettes les plus fines.

Angle de bec

L'influence de l'angle de bec sur l'épaisseur des plaquettes produites n'a pas été explorée lors de l'équarrissage. On peut cependant s'intéresser aux travaux de (Buchanan & Duchnicki, 1963). Les conditions expérimentales sont peu comparables à l'équarrissage car les essais sont quasi-statiques et en configuration de déchiquetage, mais les essais montrent que l'augmentation de l'angle de bec entraîne l'augmentation de l'épaisseur des plaquettes. Néanmoins, ces essais n'étant pas réalisés à angle d'attaque constant, il n'est pas possible de confirmer que cette tendance est uniquement due à la modification de l'angle de taillant.

Angle de dépouille

L'influence de l'angle de dépouille n'a pas été étudiée dans le cadre de l'équarrissage. La face de dépouille n'étant pas censée être une face active si le talonnage est correctement évité, cet angle ne doit a priori pas présenter d'influence sur l'épaisseur de plaquette.

Acuité d'arête

(Ghosh et al., 2015) n'ont pas relevé d'influence flagrante de la récession d'arête sur la granulométrie des plaquettes générées, par contre, (Nati et al., 2010) ont mis en évidence une corrélation entre l'usure des outils et une augmentation globale de l'épaisseur des plaquettes forestières générées par des broyeurs.

1.3.2.4 Synthèse

Comme évoqué dans la partie introductive, une telle multiplicité des paramètres influençant la géométrie de plaquette pousse à les investiguer à l'aide d'une approche numérique.

La multitude de paramètres ayant une influence certaine mais identifiée de façon imprécise, à la fois sur les efforts de coupe et la géométrie des plaquettes générées, rend l'estimation de ces grandeurs extrêmement difficile à partir des paramètres « d'entrée ». La section suivante va donc s'attacher à mettre en avant les différentes modélisations existantes des efforts de coupe et de géométrie de plaquette.

1.4 La modélisation de la coupe du matériau bois à l'échelle mésoscopique

Il paraît nécessaire dans un premier temps de clarifier le terme mésoscopique qui est dépendant du contexte dans lequel il est employé. Elle se situe entre le macro (échelle de l'arbre, mètre) et le micro (échelle de la fibre, dizaine de microns) se positionnant donc du millimètre jusqu'à la dizaine de centimètres. Il s'agit donc de l'échelle où sont observés et à laquelle vont être modélisés les phénomènes que nous allons chercher à reproduire pour étudier la fragmentation du bois en plaquettes lors de la coupe.

1.4.1 Mécanique des Milieux Continus (MMC) pour un milieu orthotrope

Le comportement bois, est très dépendant de la direction et du sens de sollicitation de celui-ci. Il est complexe et sa modélisation est un point notable de la problématique de la présente étude. Son comportement détaillé sera décrit dans le chapitre 3. Tant que l'on reste dans le domaine des petites déformations, ce comportement peut être considéré comme élastique orthotrope. Dans ce contexte, la loi de Hooke s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1-\nu_{RT}\nu_{TR}}{E_R E_T \Delta} & \frac{\nu_{RL}+\nu_{TL}\nu_{RT}}{E_R E_T \Delta} & \frac{\nu_{TL}+\nu_{RL}\nu_{TR}}{E_R E_T \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{LR}+\nu_{LT}\nu_{TR}}{E_T E_L \Delta} & \frac{1-\nu_{TL}\nu_{LT}}{E_T E_L \Delta} & \frac{\nu_{TR}+\nu_{TL}\nu_{LR}}{E_T E_L \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{LT}+\nu_{LR}\nu_{RT}}{E_L E_R \Delta} & \frac{\nu_{RT}+\nu_{LT}\nu_{RL}}{E_L E_R \Delta} & \frac{1-\nu_{LR}\nu_{RL}}{E_L E_R \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{RT} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{TL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{LR} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{RT} \\ \varepsilon_{TL} \\ \varepsilon_{LR} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

où

$$\Delta = \frac{1-\nu_{LR}\nu_{RL}-\nu_{RT}\nu_{TR}-\nu_{TL}\nu_{LT}-2\nu_{LR}\nu_{RT}\nu_{TL}}{E_L E_R E_T} \quad (1.6)$$

Dans cette équation on retrouve les 6 composantes du tenseur des (petites) déformations, $\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T, \varepsilon_{RT}, \varepsilon_{TL}, \varepsilon_{LR}$, et les 6 composantes du tenseur des contraintes de Cauchy, $\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T, \sigma_{RT}, \sigma_{TL}, \sigma_{LR}$, toutes exprimées dans la base définie par les directions d'orthotropie L, R et T. Par ailleurs, 12 grandeurs, qui n'ont pas encore été définies dans les sections précédentes, interviennent dans cette équation et représentent le comportement élastique du matériau. Il s'agit des trois modules d'Young E_L, E_R et, des six coefficients de poisson $\nu_{LR}, \nu_{RL}, \nu_{TL}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{TR}$ et des trois modules de cisaillement G_{LR}, G_{RT} et G_{LT} .

A partir de la matrice de rigidité (ou de souplesse) du matériau, il est possible de calculer un module d'Young dans une direction donnée par la réponse dans cette direction du matériau soumis à un chargement de traction (ou compression) dans cette même direction. Ce module peut être calculé en exprimant la matrice de rigidité dans une base comportant cette direction.

Il est par ailleurs fréquent de caractériser l'évolution de module de rigidité dans une direction donnée à partir de l'équation de Hankinson (Hankinson, 1921) qui est utilisée pour exprimer le module d'Young du bois en compression uniaxiale en dehors de ses directions principales. Soit $E(\theta)$ le module d'Young du bois dans une direction formant un angle θ avec la direction des fibres, alors, d'après l'équation d'Hankinson :

$$E(\theta) = \frac{E(0^\circ) \cdot E(90^\circ)}{E(0^\circ) \cdot \sin^n \theta + E(90^\circ) \cdot \cos^n \theta} \quad (1.7)$$

n , généralement approximé à 2, est une valeur dépendante à la fois de l'essence testée, du type de sollicitation, et de la propriété estimée (car l'équation d'Hankinson permet également de modéliser l'évolution d'autres propriétés mécaniques « hors axes »).

Cette formulation présente l'avantage de nécessiter uniquement la connaissance des modules d'Young du matériau afin d'estimer son module contrairement à la première solution qui nécessite une matrice de rigidité entièrement déterminée ; ceci tout en préservant une estimation fidèle aux modules mesurés (Radcliffe, 1965; Yoshihara, 2009).

1.4.2 Les modèles analytiques de prédiction des efforts et de la géométrie du copeau

Si les modèles analytiques de la coupe développés pour les métaux sont nombreux (Ehmann et al., 1997), dans le cas particulier du matériau bois, les hypothèses utilisées s'appliquent difficilement et les travaux sont plus rares.

(Franz, 1958) a établi un modèle exprimant l'état des contraintes au sein du bois dans le cas de la coupe $90^\circ-0^\circ$. Cette orientation correspond au déchetage mais pas à l'équarrissage. D'autres auteurs ont étudié la formation de copeau et les contraintes associées dans le bois (Huang & Hayashi, 1973; Koch, 1964; Stewart, 1971), mais uniquement (McKenzie, 1962) a exprimé un modèle de coupe $90^\circ-90^\circ$ plus proche de la configuration d'équarrissage reliant efforts de coupe et contraintes dans le bois.

Concernant précisément l'équarrissage, il n'existe pas de modèle prenant en compte l'état de la matière, ni la formation de plaquettes.

1.4.3 Les modèles de coupe Eléments Finis

Lorsque l'on parle de modélisation mécanique d'un milieu continu, la méthode usuelle employée est la Méthode des Eléments Finis (FEM par anglicisme pour Finite Element Method). Il convient donc de faire un état des lieux des atouts de la méthode pour répondre à notre problématique.

La FEM consiste à proposer une interpolation continue des champs recherchés (déplacements, températures, ...). Pour cela, le domaine est maillé, c'est-à-dire décomposé en un ensemble d'éléments de formes simples. Les champs de déplacement (ou d'autres

grandeurs physiques) aux seins des éléments sont interpolés par des lois mathématiques en fonction des données connues aux nœuds.

Les chercheurs intéressés par la mécanique du matériau bois se sont plutôt bien approprié l'outil et la littérature y faisant appel est conséquente (Mackerle, 2005).

Concernant l'usinage du bois, des auteurs ont développé un modèle FEM de la coupe du bois pour observer la déflexion des cellules et l'effet de l'acuité d'arête de l'outil de coupe utilisé sur les efforts de coupe (Caughley & King, 2003; Le-Ngoc & McCallion, 2000). Dans une approche similaire l'influence d'un biseau sur l'outil de déroulage sur les contraintes générées par le procédé dans le bois usiné par la FEM a été démontrée (Decès-Petit et al., 1995, 1999).

La localisation des fissures du bois post-usinage a également fait l'objet de travaux de la part de (Stehr & Östlund, 2005). Enfin (Uhmeier & Persson, 1997) ont réussi à modéliser la séparation d'une plaquette dans le cas du déchiquetage par la FEM. Le problème étant que les maillages sont fixes et les zones de ruptures prédéfinies. (Holmberg, 1998) à petite échelle a simulé le passage d'un couteau dans un petit échantillon de bois contenant seulement deux cernes mais a obtenu des résultats encourageant avec un comportement cohérent même si non quantitatif.

L'inconvénient principal de la FEM, lorsqu'elle est utilisée pour modéliser des phénomènes dynamiques incluant beaucoup de fragmentation du domaine, est son manque de robustesse. Même si la gestion des contacts et de la séparation des éléments est grandement simplifiée en utilisant la XFEM (Dolbow et al., 2001), une extension de la FEM permettant la prise en compte des propagations de fissures, le suivi des fractures et surtout des multiples contacts entre surfaces dans un contexte de grands déplacements reste problématique. Ce défaut la rend incompatible avec le développement d'un modèle dont un des deux objectifs premiers est de prédire l'apparition de fissures multiples et d'en suivre l'évolution. C'est afin de palier à ces obstacles que le choix est fait d'étudier l'apport d'une approche particulière.

1.4.4 Les modèles Eléments Discrets

1.4.4.1 L'histoire de la méthode

La modélisation par la DEM (pour Discrete Element Method), ou méthode discrète en français, des milieux continus est très récente et s'est démocratisée dans les années 2000. Historiquement, cette méthode a été développée en 1979 par (Cundall & Strack, 1979), appelée à ce moment Méthode des Eléments Distincts. Elle était basée sur la dynamique moléculaire dans le but de modéliser des assemblages granulaires. La méthode s'est fortement développée dans cette optique, et est aujourd'hui très utilisée pour modéliser des flux de particules de tailles variées dans des systèmes complexes (Grains alimentaires dans des silos, pilules médicinales, sols). Les premières approches d'un matériau « continu » ont lieu dans les années 2000 afin de représenter des céramiques ou des agrégats rocheux. Ainsi est né le second principal domaine d'application de la DEM : l'étude des roches et des bétons. Bien que modélisables comme des milieux continus, ces matériaux n'en demeurent pas moins des

agrégats de particules. Le troisième champ d'applications, est plus rare mais, est celui dans lequel s'inscrivent les présents travaux : il s'agit de la modélisation de matériaux purement continus en les discrétisant numériquement. La littérature sur ce sujet est beaucoup plus restreinte. La méthode est très flexible et peut aussi bien être appliquée à l'usinage de matériaux métalliques (Eberhard & Gaugele, 2012) que composites (Iliescu et al., 2010; Le et al., 2016; Maheo et al., 2015). Elle a également été utilisée pour simuler le procédé de soudage par friction malaxage (Terreros, 2013), nécessitant un couplage thermomécanique fort. (Gras, 2011; Roux, 2016) ont quant à eux employé la méthode afin de simuler la réponse de matériaux organiques à des sollicitations mécaniques telles que les systèmes musculo-tendineux.

1.4.4.2 La modélisation de la coupe du bois

La modélisation de la coupe du bois par la DEM a été investiguée très tôt dans le développement de cette méthode (Ohta & Kawasaki, 1995; Sawada & Ohta, 1995, 1997). Les auteurs parlaient plutôt d'EDEM pour « Extended Disctinct Element Method », car ils alignaient les éléments discrets sur une grille régulière orientée selon les mêmes directions que le bois. Ces études menées uniquement en 2D étaient appliquées au déroulage. Elles ont démontré la faisabilité d'application de cette méthode aux problématiques de coupe et de fissuration du bois. Cependant, faute de calibration précise, les efforts calculés par le modèle étaient loin de ceux observés expérimentalement.

(Pfeiffer, 2015) a initié des travaux dans ce sens en élaborant un modèle DEM cette fois-ci tridimensionnel visant à la simulation de la coupe du bois vert en fraisage et déroulage. Tout comme les études citées plus haut, les résultats se sont montrés encourageants, notamment dans les faciès de ruptures obtenues et la fragmentation multiple du matériau (Figure 1.20), mais les grandeurs physiques n'ayant pas été calibrées, aucune donnée n'a pu être calculée grâce au modèle.

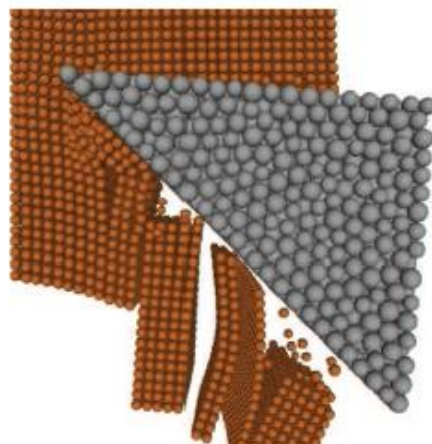


Figure 1.20: Simulation de la coupe par la DEM (Pfeiffer et al., 2015).