

*Caractérisation du
comportement dynamique du
hêtre vert*

3.1 Introduction

3.1.1 Démarche de modélisation

Afin d'être capable de modéliser le matériau bois par la Méthode des Eléments Discrets (DEM), il est nécessaire au préalable d'identifier les phénomènes clés pilotant la coupe du bois. Il est notamment proposé de déduire des observations et mesures réalisées lors de la coupe du bois vert ou lors d'essais unidirectionnels des modèles de comportements simples avec une estimation quantitative de leurs paramètres.

Ce chapitre a ainsi pour but de présenter un modèle « bois » qui servira de référence pour les simulations de coupe avec la DEM. Dans un premier temps, une identification des types de sollicitations subies par le matériau bois lors de sa coupe est proposée. Pour chaque type de sollicitation, le comportement et la réponse mécanique du matériau sont étudiés. Ces études permettent donc l'établissement d'une liste de propriétés mécaniques et physiques dites « cibles » devant être respectées par le modèle numérique.

Etat du matériau et sollicitations imposées

Préalablement à l'étude des propriétés mécaniques du bois, rappelons le contexte de l'étude expérimentale. L'humidité des éprouvettes testées varie, majoritairement, entre 50% et 90% (Chapitre 2). Les humidités sont très probablement encore supérieures lors de l'équarrissage puisque les plots dont sont issus les échantillons n'ont pas été humidifiés à nouveau après leur débit en scierie. Or, comme vu au cours du premier chapitre, le bois est un matériau à caractère hygroscopique (ses propriétés sont dépendantes du taux d'humidité interne du matériau). L'humidité doit donc faire partie des paramètres expérimentaux et devra, le cas échéant, être un des paramètres du modèle de comportement mécanique du bois.

De plus, le bois est un matériau qui présente un comportement mécanique dépendant de la vitesse de la sollicitation imposée. La valeur du taux de déformation dans le bois revêt donc elle aussi une importance et doit également faire partie des paramètres à prendre en compte. Cela implique qu'il est nécessaire de déterminer quels types de déformations et quels niveaux et taux de déformations sont susceptibles d'être atteints au cours des essais de coupe.

Les sollicitations engendrées par la coupe orthogonale du bois

Un bref retour sur la littérature est réalisé afin de déterminer quelles sont les sollicitations induites par le procédé de la coupe orthogonale du bois. W. McKenzie a publié des travaux détaillés sur les phénomènes présents (McKenzie, 1960b), son analyse se base sur une campagne expérimentale de coupe orthogonale $90^\circ - 90^\circ$. Des clichés lui ont permis de mettre en évidence plusieurs zones de sollicitations dans l'échantillon (Figure 3.1a) et un modèle de rupture (Figure 3.1b).

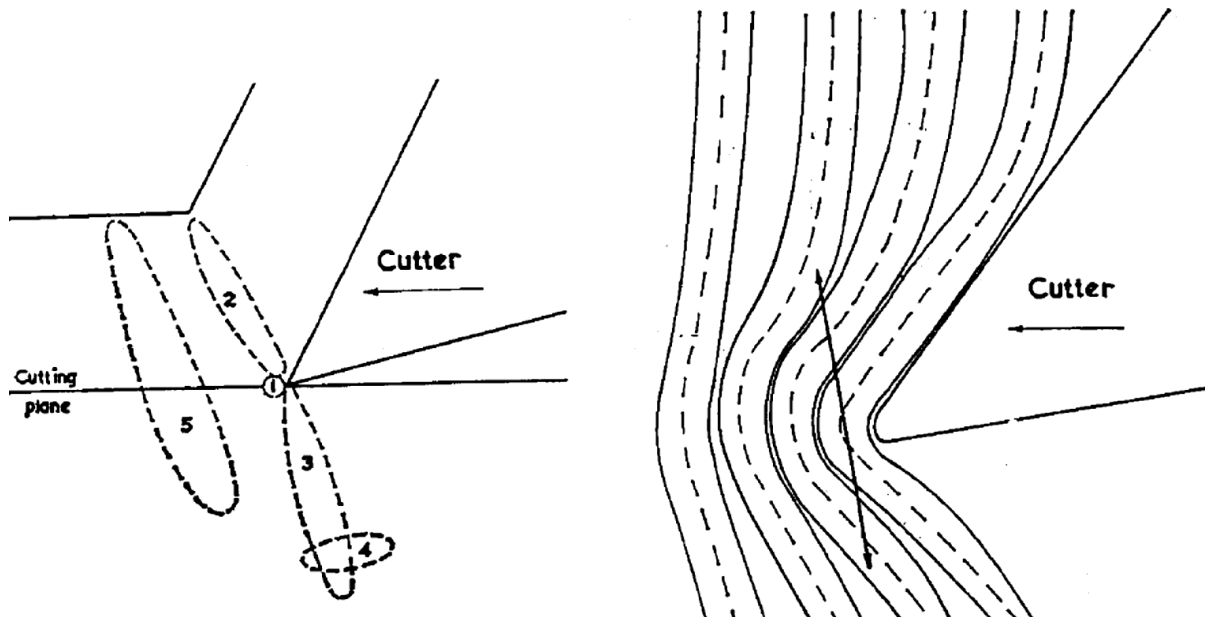


Figure 3.1 : (a) Zones de ruptures potentielles. (b) Postulat de la théorie de la « double » poutre en zone 1 indiquant que la rupture se fait par tension de la fibre (McKenzie, 1962).

Toujours d'après W. McKenzie (McKenzie, 1962), les ruptures potentielles dans le bois sont liées aux types de sollicitations présentes dans les zones identifiées de 1 à 5 dans la Figure 3.1a :

- 1 : Traction longitudinale (le long des fibres),
- 2 + 3 : Cisaillement dans le plan longitudinal tangentiel,
- 4 : Flexion des fibres côté retenu de la matière,
- 5 : Flexion des fibres en avant de l'outil.

Ses conclusions permettent de préciser les sollicitations du bois à investiguer. Il est cependant à noter que les essais de McKenzie ont été réalisés pour des épaisseurs coupées variant de 0,010 pouces à 0,030 pouces (soit 0,254 mm à 0,762 mm). Ces dernières sont éloignées de celles qui nous intéressent et qui sont plutôt de l'ordre du centimètre.

Renaud Pfeiffer, (Pfeiffer, 2015), dans le même cadre d'essais de coupe orthogonale $90^\circ - 90^\circ$, mais cette fois sur pendule équipé de mesures dynamométriques, et pour une épaisseur coupée de 15 mm, a réalisé à l'aide d'imagerie rapide des films de la coupe. A l'aide d'un traitement par corrélation d'images, il a pu mesurer en début de coupe les champs de déplacements à la surface de ses éprouvettes coupées. Ces champs de déplacements, dérivés spatialement, ont permis de déterminer les champs de déformation de l'échantillon (Figure

3.2). Il a ainsi mis en évidence en zones 1 et 5 une forte compression des fibres (dans la direction tangentielle), ainsi que de la traction tangentielle (ϵ_y ici) en zone 3 et du cisaillement (ϵ_{yz} ici). Dans le cadre d'essais présentant des épaisseurs coupées plus élevées comme ceux réalisés au cours de la présente étude, les sollicitations sont plus extrêmes, notamment en termes de valeurs de déformations, et, si ces chargements ne sont pas forcément à l'origine de la rupture du copeau ou des plaquettes, la réponse du bois à ceux-ci n'en demeure pas moins fondamentale à modéliser dans le but d'obtenir des efforts de coupe et une déformation du milieu fidèles à l'expérience.

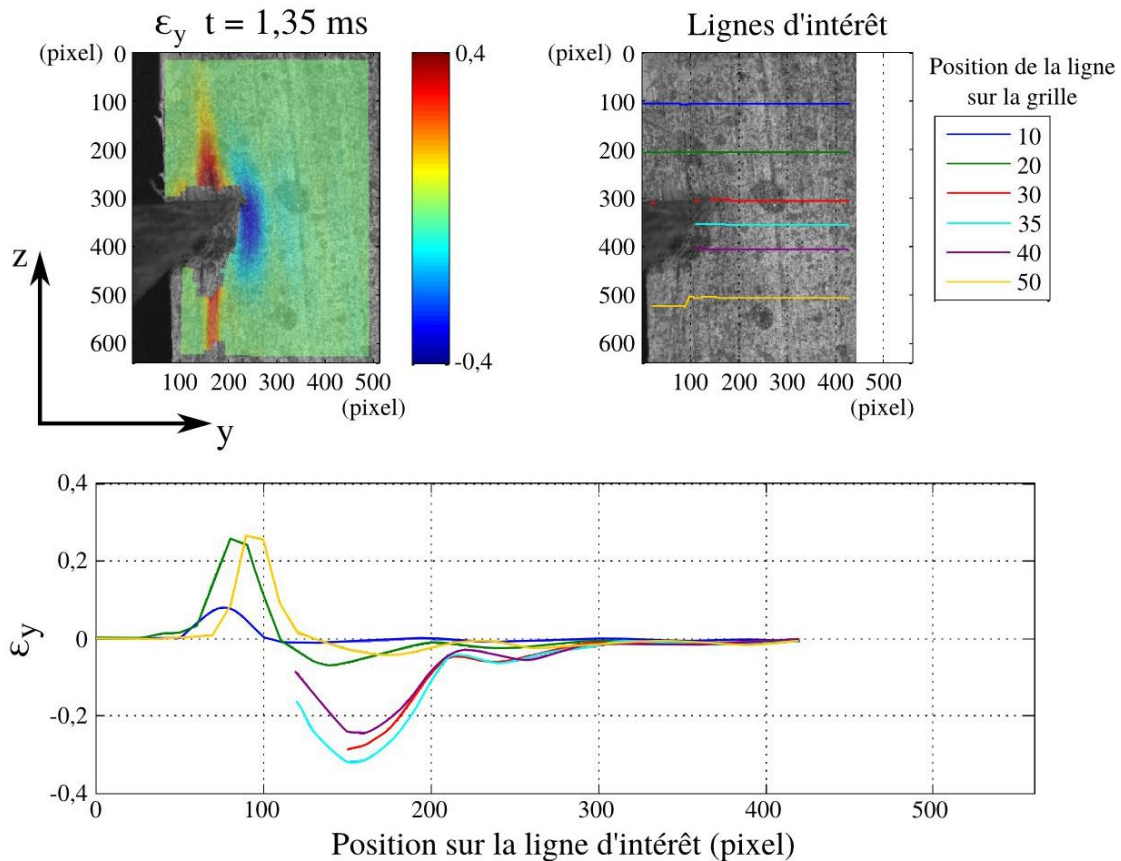


Figure 3.2 : Résultats de mesures de champs pour un essai de coupe orthogonale par (Pfeiffer, 2015), à titre indicatif : $V_c \approx 6$ m/s, $H\% = 60\%$, $h = 15$ mm et $b = 10$ mm.

En plus d'identifier des zones déformées, la corrélation d'images permet d'estimer les niveaux de déformations dans une image donnée. En divisant l'incrément de déformation par l'incrément de temps entre deux images, il est également possible d'estimer les taux de déformations dans l'éprouvette lors de l'essai. Les résultats types obtenus par R. Pfeiffer, pour un essai donné, sont présentés dans le Tableau 3.1 ci-après.

Tableau 3.1 : Niveaux et taux de déformation maximum mesurés lors d'un essai de coupe orthogonale d'après (Pfeiffer, 2015).

Direction	Niveaux de déformation		Taux de déformation	
	Sous la face de coupe	Au dessus de la face de dépouille	Sous la face de coupe	Au dessus de la face de dépouille
Tangentielle	-30 à -40 %	-20 %	1000 à 2000 s ⁻¹	1000 à 2000 s ⁻¹
Longitudinale	-10 %	5 %	500 s ⁻¹	500 s ⁻¹
Cisaillement LT	10 %	10 à 20 %	1000 s ⁻¹	1000 s ⁻¹

Les déformations négatives dans le tableau précédent correspondent à des déformations (selon la définition ingénieur) de compression. Les déformations positives correspondent à de la traction. On notera que les déformations, en particulier en compression, atteignent des niveaux élevés (jusqu'à 40%) tout en sachant que dans le voisinage immédiat de la pointe de l'outil (lieu où elles sont très certainement les plus importantes) la corrélation d'images n'a pas pu être appliquée (variation trop importante de la luminosité engendrée par l'ombre du couteau couplée à des déformations hors plan de la matière). Sur la Figure 3.2, les zones apparaissant comme très fortement en traction sont erronées car dues à la présence de fissures faussant le traitement par corrélation d'images.

Phénoménologiquement, on ne retrouve pas de différences fondamentales entre les résultats des essais effectués au cours de ces travaux de thèse et les conclusions de R. Pfeiffer et W. McKenzie. Ils permettent en revanche d'étendre le domaine d'étude.

Un paramètre important identifié au chapitre 2 est l'orientation des fibres vis-à-vis de la vitesse de coupe (pente du fil). Ainsi, lorsque que la coupe étudiée n'est plus de la coupe 90° - 90° mais de la coupe 90° - GD, l'activation des modes de rupture évolue. Plus la coupe se fait dans le fil du bois, moins la zone 2 s'active régulièrement (résultant en la formation de plaquettes d'épaisseurs plus inégales). Par ailleurs les fissures ont plus de difficultés à se propager. Beaucoup ne débouchent plus à la surface de l'échantillon. Ceci est illustré sur la Figure 3.3.

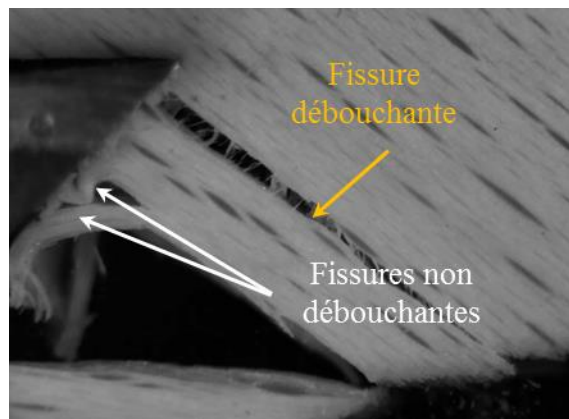


Figure 3.3 : Fissures débouchante et non-débouchantes dans le cadre d'essais de rabotage en coupe 90° - 37°.

Comportement unidirectionnel du bois (de hêtre) : étude phénoménologique

Cette section, basée sur les résultats de la littérature, a pour but de déterminer les grandeurs mécaniques représentant le comportement du bois selon un modèle de mécanique des milieux continus lorsqu'il est sollicité indépendamment par chacun des chargements recensés en section 3.2 (chargements unidirectionnels).

Dans l'ensemble du chapitre, l'hypothèse est faite que les phénomènes ayant lieu durant la coupe orthogonale sont plans. Les seules directions sollicitées sont les directions longitudinale (parallèle aux fibres) et tangentielle. Le comportement radial ne sera donc pas étudié. Cette hypothèse est valide tant que les cernes de croissance de l'arbre sont suffisamment fins par rapport à la largeur de l'échantillon et parfaitement perpendiculaires à la direction de coupe (un soin important a été apporté à la préparation des échantillons testés au chapitre 2 pour valider au mieux cette hypothèse). Cette hypothèse permet de simplifier le problème en réduisant le nombre de paramètres d'étude. Cela permet également d'éviter par la suite des simulations tridimensionnelles très chronophages et qui limiteraient fortement en termes de résolution de discrétisation.

Cette section consiste en l'observation du comportement du bois de hêtre lors de sollicitations longitudinales et tangentielles. Il est à noter que les phénomènes observés lors des sollicitations radiales ou tangentielles sont très similaires dans le cas particulier de cette essence. Les observations sur le cas tangentiel pourront donc généralement s'étendre au cas radial dans l'éventualité d'une future modélisation.

3.3.1 Sollicitations en traction/compression

Le matériau bois possède un comportement en traction et un autre en compression différenciés. Ces deux sollicitations sont donc traitées séparément.

Précisons de plus que la contrainte évoquée dans les sous-sections suivantes est définie par le rapport entre la force appliquée sur l'échantillon et sa section initiale. Il s'agit donc de la contrainte moyenne dans la direction du chargement. D'une manière générale, l'état de contrainte dans l'échantillon n'est pas nécessairement homogène.

3.3.1.1 Compression longitudinale

Dans les conditions de petites perturbations, le bois possède un comportement élastique en compression. Sa rigidité est définie par son module d'Young en sollicitation quasi-statique (voir paragraphe 1.4.1).

Cependant, lorsque qu'un certain niveau de contrainte est atteint (correspondant souvent à un niveau de déformation de quelques pourcents), un phénomène de flambage de l'éprouvette s'observe. Deux cas de figures sont à différencier, le flambage peut avoir lieu soit à l'échelle de la microstructure uniquement, soit à l'échelle de la structure globale de l'éprouvette. Ce dernier cas ne sera pas discuté car la géométrie des éprouvettes est étudiée pour que ce phénomène soit évité.

Selon l'élancement de l'échantillon testé, son humidité, et des paramètres anatomiques comme les dimensions des cellules et l'épaisseur de leur paroi, le flambage de la microstructure ne prend pas la même forme.

Le flambage en « coude » : Ce flambage est dû à la très forte orthotropie du matériau bois qui rend très instable sa réponse quand il est chargé dans sa direction principale (la plus rigide), et se traduit par une déformation franche en coude des fibres et de l'éprouvette dans un plan bien identifiable (voir Figure 3.5). On retrouve d'ailleurs un comportement similaire lors de la compression d'éprouvettes de matériaux composites (synthétiques) unidirectionnels (Budiansky & Fleck, 1993). Le flambement de l'échantillon se traduit par une contrainte plateau. En d'autres termes, une fois le mécanisme de flambage enclenché, l'évolution de la contrainte présente une faible variation (Figure 3.4, elle est même susceptible de décroître). Certaines études ont modélisé la contrainte limite d'apparition de flambement fonction des propriétés élastiques du matériau, notamment ses modules d'Young et modules de cisaillement (Budiansky & Fleck, 1993). Dans le cas d'éprouvettes massives (avec un rapport longueur sur section faible) le phénomène s'observe non plus par un « cou dage » de l'éprouvette mais par une déformation en tonneau (pour une éprouvette cylindrique) associée à une décohésion des fibres entre elles (Pfeiffer, 2015).

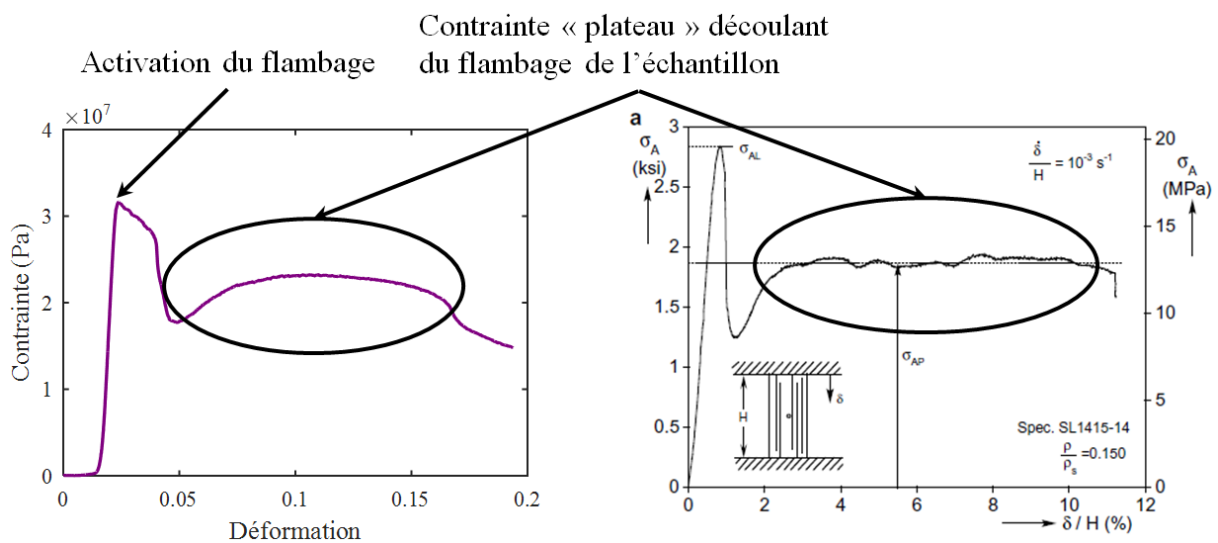


Figure 3.4 : Courbes contraintes-déformation obtenues par (Pfeiffer, 2015) et (Da Silva & Kyriakides, 2007) lors d'essais de compression longitudinales en quasi-statique.

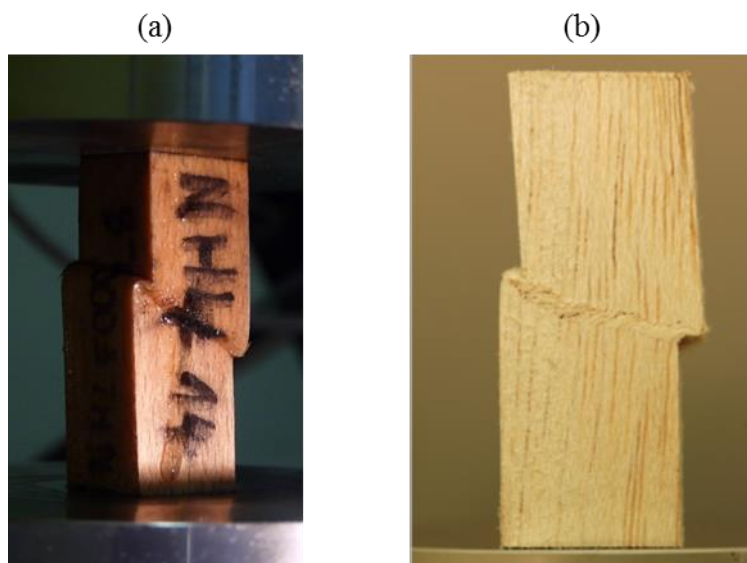


Figure 3.5 : Illustration du phénomène de cou dage observé lors de la compression longitudinale de bois vert (a) par (Pfeiffer, 2015) et (b) par (Da Silva & Kyriakides, 2007).

Dans le cas où l'épaisseur des parois cellulaires n'est pas assez grande pour résister à la compression et provoquer un flambement des fibres, ce sont elles-mêmes qui flambent au niveau microscopique, en se télescopant (Zauner, 2014). Le comportement mécanique global, traduit par l'allure des courbes de compressions, demeure proche de celui expliqué précédemment.

Pour le hêtre, qui est un matériau dense, avec des cellules à parois épaisses, le flambage en coude est celui le plus probable d'apparaître. Lors des essais de coupes, le flambage prend une forme certainement encore différente de celle observée lors des essais de compressions. Il a lieu uniquement sous l'outil, dans la future plaquette, et il est couplé à de la compression transverse. Cependant, l'observation des essais de coupe ne permet pas de conclure quant au phénomène à modéliser, si ce n'est qu'il ne peut s'agir de flambage télescopique étant donné la direction des sollicitations dans la matière, donc le flambage microscopique ne fera pas l'objet d'une modélisation particulière et ne sera pas « programmé » dans le modèle, ce qui n'exclut aucunement son apparition au cours de la modélisation à l'échelle mésoscopique.

En compression longitudinale, on ne définit finalement qu'un unique paramètre mécanique à modéliser : le module d'Young longitudinal E_L .

3.3.1.2 Traction longitudinale

Les essais de traction sur bois vert sont plus rares dans la littérature que les essais de compression. On peut retrouver néanmoins quelques études, notamment (Bonin, 2006) qui a quantifié les modules d'Young en traction quasi-statique du hêtre vert afin de réaliser un modèle analytique de déroulage utilisant ce paramètre. (Pfeiffer, 2015) a également réalisé des essais de traction quasi-statiques sur des éprouvettes de hêtre vert (voir Figure 3.6) pour comparer différentes méthodes de mesure du module d'Young.

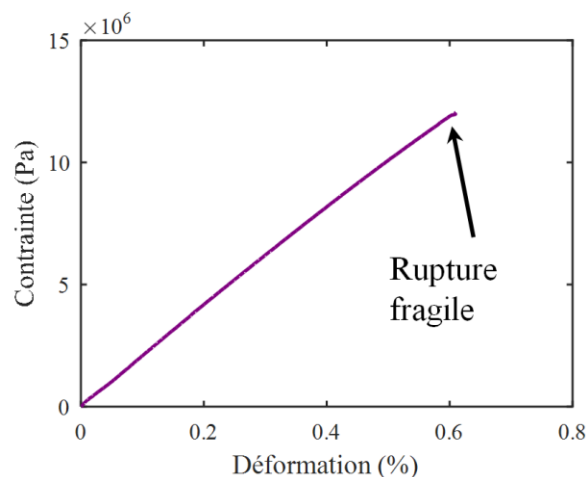


Figure 3.6 : Allure typique de la relation contrainte-déformation obtenue lors des essais de traction quasi-statique longitudinale sur hêtre vert menés par (Pfeiffer, 2015).

Généralement, il est admis que le bois (vert ou sec) présente un comportement élastique fragile en traction, ce qui est confirmé par les deux études sus-citées. Le seul nouveau paramètre est donc la limite à la rupture en traction σ_L^{maxi} .

En conséquence seulement deux paramètres sont à définir : le module d'Young en traction/compression E_L et la limite à la rupture en traction σ_L^{maxi} . Le comportement général retenu, selon les hypothèses fixées, est représenté Figure 3.7.

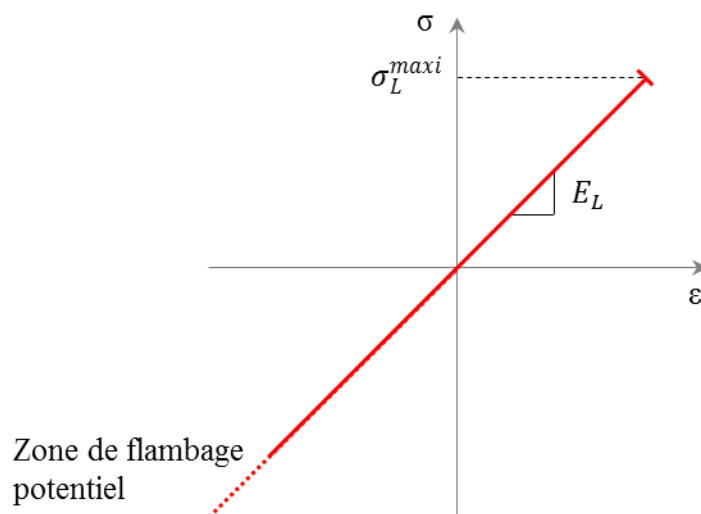


Figure 3.7 : Modèle de comportement simplifié du bois en traction-compression longitudinale.

3.3.1.3 Compression tangentielle

Le nombre d'études traitant de la compression (dynamique) transverse du bois est plus important, surtout concernant les bois peu denses, car ces derniers sont très intéressants dans la conception d'absorbeur de chocs. Ceci est dû aux propriétés présentées ci-après.

Le bois possède un comportement singulier en compression transverse proche de celui d'un matériau en nid d'abeille. Passé une phase de déformation élastique, les parois cellulaires

flambent et les cellules s'écrasent jusqu'à combler tout le vide en leur sein (phénomène de densification). Les cellules aux parois cellulaires les moins résistantes s'écrasent en premier, ce qui induit un plateau de compression plus ou moins long en fonction des essences. Puis, progressivement, une fois ces cellules complètement écrasées, le matériau se densifie et les contraintes liées à sa déformation augmentent plus rapidement (Figure 3.8).

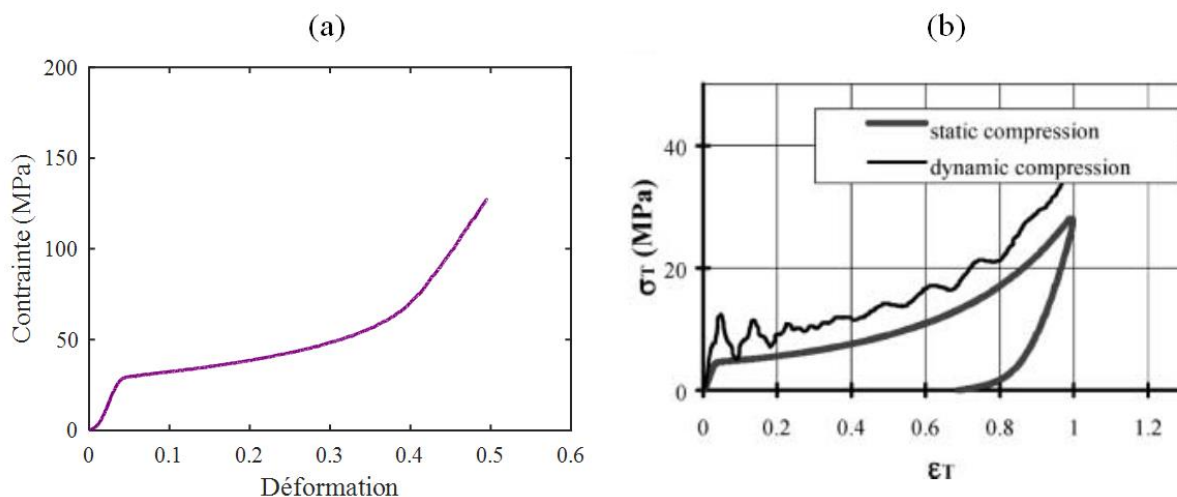


Figure 3.8 : Courbes de contrainte-déformation obtenues (a) par (Pfeiffer, 2015) et (b) par (Adalian & Morlier, 2002) lors d'essais de compression transverse.

Ce comportement a fait l'objet de nombreuses modélisations analytiques. (Adalian & Morlier, 2002) ont défini un modèle à 7 paramètres pour représenter ce comportement en compression et incluant le cas de décharge du matériau. (Nairn, 2007) a quant à lui proposé un modèle plus simple comportant 4 paramètres (voir Figure 3.9a et Figure 3.9b).

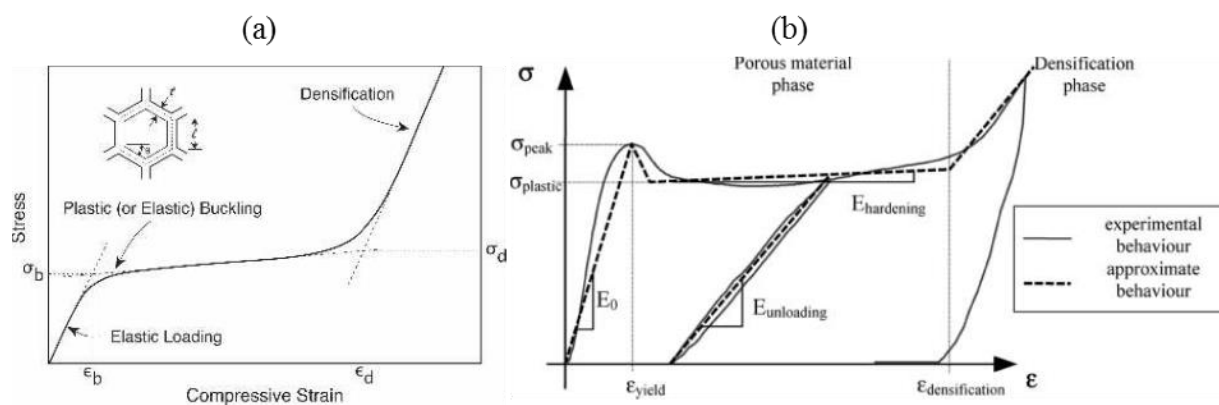


Figure 3.9 : Modèles de Nairn (a) et d'Adalian (b).

Dans une première approche, l'utilisation d'un modèle simplifié est proposée pour prendre en compte uniquement la partie élastique suivie de la partie de densification progressive du comportement en compression.

Si le bois ne subit qu'une déformation élastique, la contrainte de compression est calculée classiquement selon la loi de Hooke :

$$\sigma = E_T \varepsilon. \quad (3.1)$$

Si, en revanche, le bois subit une déformation telle que la contrainte devient supérieure à la contrainte seuil de début de densification σ_0 , alors le bois entre dans sa phase de densification exprimée par la loi suivante :

$$\sigma = \sigma_0 e^{\frac{p}{p_0}}, \quad (3.2)$$

σ_0 est le seuil initial de densification et correspond à la contrainte à partir de laquelle le flambement des parois est déclenché, p (déformation plastique) est le niveau de densification et traduit l'état actuel du flambement des cellules et p_0 est un facteur de densification (homogène à p). L'allure de la courbe contrainte/déformation résultante est présentée Figure 3.10.

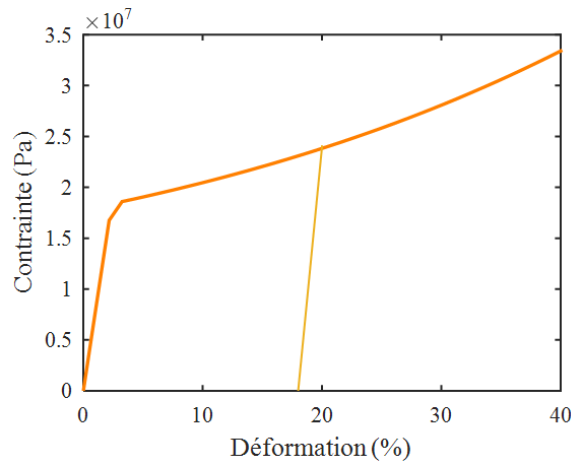


Figure 3.10 : Allure proposée du comportement en compression tangentielle du bois.

La déformation totale est exprimée comme la somme d'une déformation élastique et d'une déformation plastique :

$$\varepsilon = \varepsilon_{elast} + p.$$

Comme le modèle numérique présenté à partir du chapitre 4 est basé sur un algorithme d'intégration temporel explicite, à un incrément de calcul $i + 1$, $\varepsilon(i + 1)$ est déterminé à partir de la seule connaissance des efforts à l'incrément i . Ainsi, si à la fin d'un incrément $i + 1$ on a :

$$E_T(\varepsilon(i + 1) - p(i + 1)) > \sigma_0 e^{\frac{p(i)}{p_0}},$$

alors :

$$E_T(\varepsilon(i + 1) - p(i + 1)) = \sigma_0 e^{\frac{p(i+1)}{p_0}}.$$

Sinon :

$$p(i + 1) = p(i),$$

ce qui permet de calculer $p(i + 1)$ pour ensuite déduire :

$$\varepsilon_{elast}(i + 1) = \varepsilon(i + 1) - p(i + 1),$$

et

$$\sigma(i + 1) = E_T \varepsilon_{elast}(i + 1).$$

De la sorte, seulement 3 paramètres (E_T , σ_0 et p_0) sont nécessaires à la définition de son comportement en compression, tout en conservant une richesse correcte et une bonne fidélité à celui observé. Il s'agit donc d'un bon compromis, qui pourra être enrichi par la suite.

Notons également que la décharge/recharge est considérée comme élastique avec une rigidité égale au module d'Young. Cette hypothèse est simplificatrice car le bois, et encore plus à l'état vert, présente un comportement plutôt hyper-élastique. Dans la finalité de simuler un essai de coupe orthogonale le comportement au retour du bois ne présentera que peu d'influence sur les résultats.

3.3.1.4 Traction tangentielle

En traction tangentielle, le comportement est très proche de celui observé en traction longitudinale. Il présente un caractère élastique suivi d'une rupture fragile. Néanmoins, avant rupture, la partie élastique est légèrement non linéaire (affaiblissement de la raideur tangente), ce qui est visible par la Figure 3.11. Nous proposons cependant, dans cette première modélisation, de nous limiter à un comportement élastique linéaire fragile. Un unique paramètre définit donc son élasticité : le module d'Young E_T , et un second définit sa limite de rupture : σ_T^{maxi} .

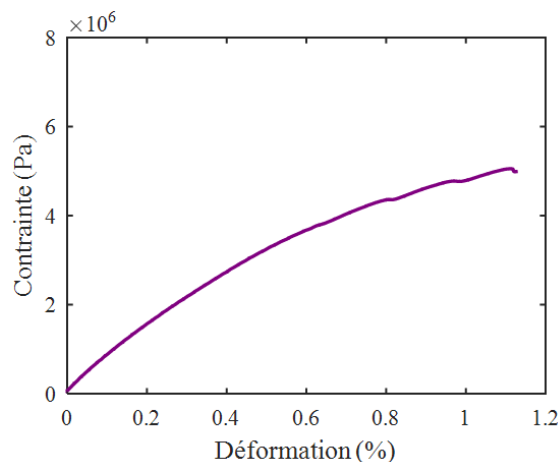


Figure 3.11 : Allure typique de la relation contrainte-déformation obtenue lors des essais de traction quasi-statique transverse sur du hêtre vert menés par (Pfeiffer, 2015).

Le comportement cible en traction-compression tangentielle est condensée Figure 3.12.

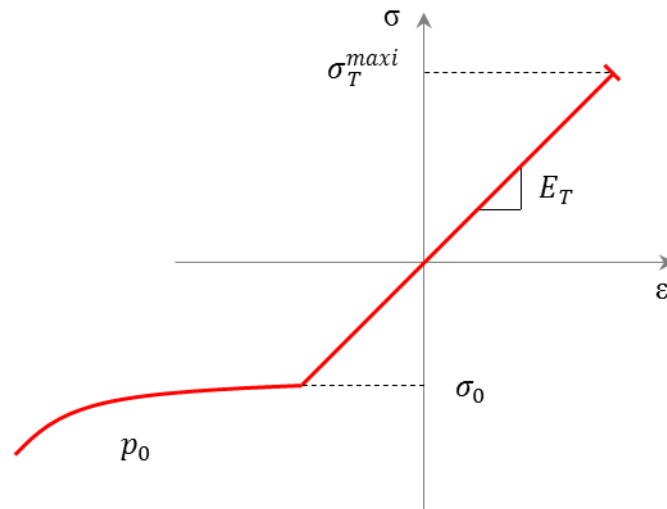


Figure 3.12 : Modèle de comportement simplifié du bois en traction-compression tangentielle.

3.3.2 Comportement en cisaillement

Si beaucoup d'ouvrages indiquent des valeurs de modules de cisaillement et de limites à la rupture en cisaillement, il est peu évident de retrouver un comportement précis en raison de la multiplicité des méthodes d'essais. Un comportement similaire à celui de la traction tangentielle, avec une partie élastique linéaire et une décroissance de la pente à l'approche de la rupture est observé par S. Ukyo (Ukyo et al., 2008) sur des éprouvettes de *Cyptomeria Japonica* (Figure 3.13).

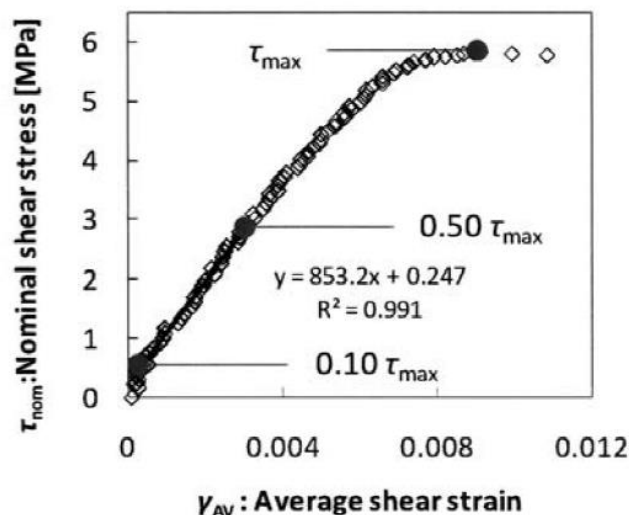


Figure 3.13 : Relation contrainte-déformation de cisaillement sur du *Cryptomeria Japonica* par (Ukyo et al., 2008).

A nouveau, la variation de la rigidité est négligée et on considèrera simplement un comportement élastique fragile, indépendant du sens de la sollicitation, dont la pente est le

module de cisaillement dans le plan (LT) G_{LT} , et dont la contrainte limite de rupture est notée σ_{LT}^{maxi} . Ce comportement est représenté Figure 3.14.

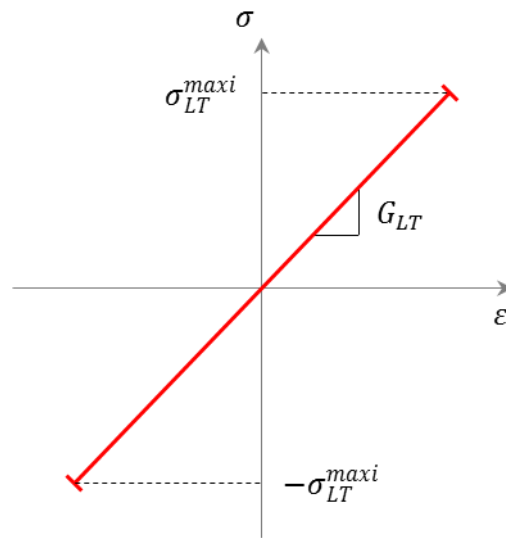


Figure 3.14 : Comportement cible en cisaillement.

3.3.3 Coefficient de Poisson

L'effet du coefficient de Poisson n'est pas modélisé. Ce choix est justifié par la valeur de ce coefficient (voir Tableau 3.2), dans le cas de la coupe du bois de hêtre. Le fait d'avoir un coefficient de poisson du bois (feuillu) ν_{TL} très faible, alors que la direction tangentielle est celle subissant la plus forte compression, conforte cette décision.

Tableau 3.2 : Valeurs usuelles des coefficients de Poisson de bois feuillus d'après (Guitard, 1987)

ν_{LR}	ν_{RL}	ν_{LT}	ν_{TL}	ν_{RT}	ν_{TR}
0,39	0,048	0,46	0,033	0,67	0,38

3.3.4 Récapitulatif

Au final, le modèle simplifié que nous proposons d'utiliser comporte 8 paramètres :

- Trois modules élastiques : E_L , E_T et G_{LT}
- Trois contraintes à la rupture : σ_L^{maxi} , σ_T^{maxi} et σ_{LT}^{maxi}
- Deux descriptifs de l'anélasticité en compression tangentielle : σ_0 et p_0 .

Ces paramètres évoluent en fonction de l'humidité du bois et du taux de déformation. Ces influences sont estimées et éventuellement quantifiées dans la section suivante.

3.4 Influence du taux de déformation et de l'humidité

Afin d'évaluer les effets du taux de déformation et de l'humidité du bois sur ses propriétés mécaniques apparentes, Widehammar (Widehammar, 2004) a réalisé une série d'essais de compression sur de l'épicéa en faisant varier ces deux paramètres pour chacune des trois directions principales : radiale, tangentielle et longitudinale (ou axiale). Ces essais, bien que réalisés sur une essence différente de celle dont traite les présents travaux, permettent d'illustrer l'importance de l'influence de ces paramètres. Trois humidités sont testées (sec, au PSF, ou complètement saturé en eau) ainsi que trois taux de déformation ($8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, marqué L pour Low, 17 s^{-1} , marqué M pour Medium, et environ 1000 s^{-1} , marqué H pour High). Chaque combinaison a été testée cinq fois et la Figure 3.15 représente les courbes caractéristiques de contrainte-déformation obtenues pour chaque combinaison.

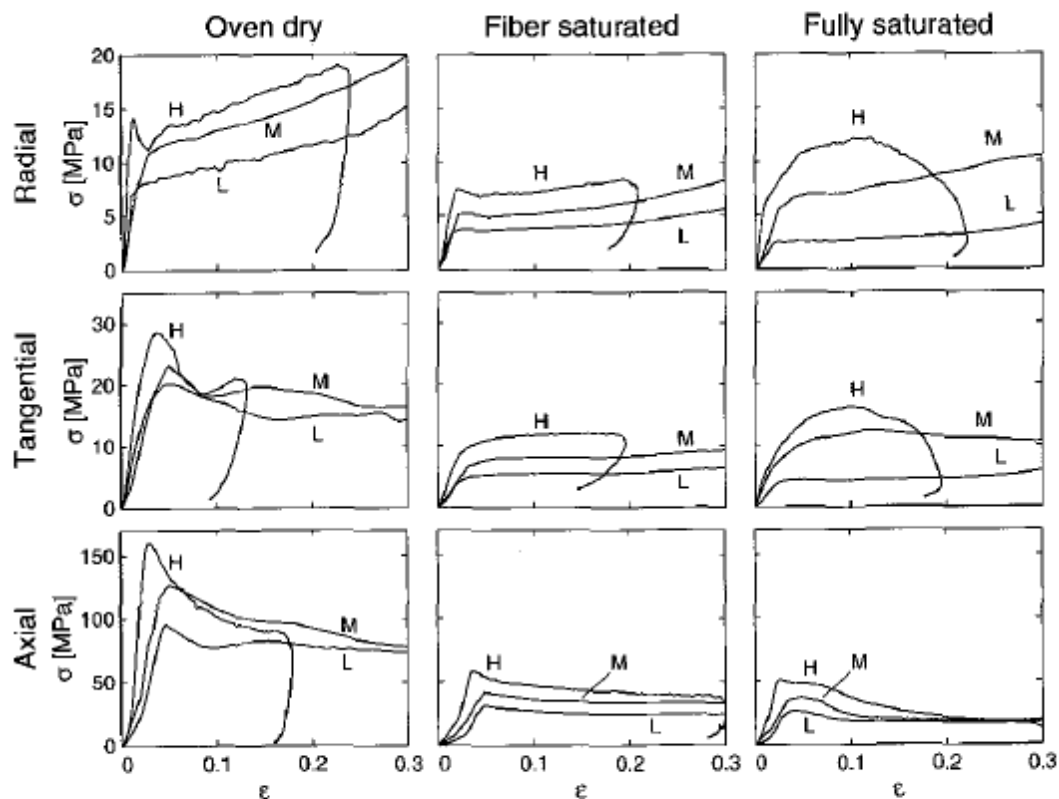


Figure 3.15 : Influence de la direction de sollicitation, de l'humidité des échantillons et du taux de déformation (Low, Medium ou High) sur la contrainte mesurée lors de la compression de l'épicéa (Widehammar, 2004).

Deux tendances principales sont identifiables :

- L'accroissement des vitesses de déformation induit une augmentation des contraintes,
- Le dépassement du PSF implique une diminution des contraintes notable, le bois sec présente un comportement sensiblement plus « raide » que le bois vert.

Ces observations sont confirmées par plusieurs autres auteurs dont F. Pierre (Pierre et al., 2012) et M. Renaud (Renaud et al., 1996). L'allure des essais à haute vitesse de déformation peut surprendre mais est caractéristique d'essais menés sur barres d'Hopkinson où l'apport d'énergie à l'échantillon n'est pas constant.

Une étude similaire réalisée par R. Pfeiffer (Pfeiffer, 2015) sur le hêtre vert pour des plages de variations différentes des paramètres. Dans ce précédent travail, les directions de sollicitations se limitent aux directions longitudinale et transverse (les éprouvettes n'étant ni parfaitement radiale ni parfaitement tangentielles), les humidités sont de 20 % 55 % et 95 % dans le cas des éprouvettes longitudinales et 9%, 51% et 95% dans le cas des éprouvettes radiales. Les taux de déformations sont quant à eux plus nombreux : $0,001 \text{ s}^{-1}$, $0,01 \text{ s}^{-1}$, $0,1 \text{ s}^{-1}$, 1 s^{-1} , 10 s^{-1} et environ 1000 s^{-1} . Les résultats (voir Figure 3.16) obtenus lors de cette étude montrent que la rigidité des éprouvettes évolue logarithmiquement en fonction du taux de déformation (ainsi que la plupart des propriétés mécaniques en compression) du bois. Pfeiffer propose d'ailleurs de modéliser l'évolution du module d'Young en fonction de l'humidité par une loi puissance de la forme :

$$E = \chi \times \varepsilon^\psi. \quad (3.3)$$

Les valeurs des coefficients χ et ψ dépendent de la direction de sollicitation et de l'humidité des éprouvettes. Il a obtenu un très bon coefficient de corrélation (autour de 0,95) variable en fonction des humidités testées, en modélisant le module d'Young de ses échantillons par cette loi.

Il est néanmoins nécessaire de noter que les modules d'Young calculés dans l'étude menée par R. Pfeiffer semblent très fortement sous-estimés par rapport aux valeurs usuelles du matériau testé (environ trois fois plus faibles). L'auteur a par ailleurs montré que ses résultats étaient dépendants de la méthodologie de test et de la morphologie des échantillons utilisés.

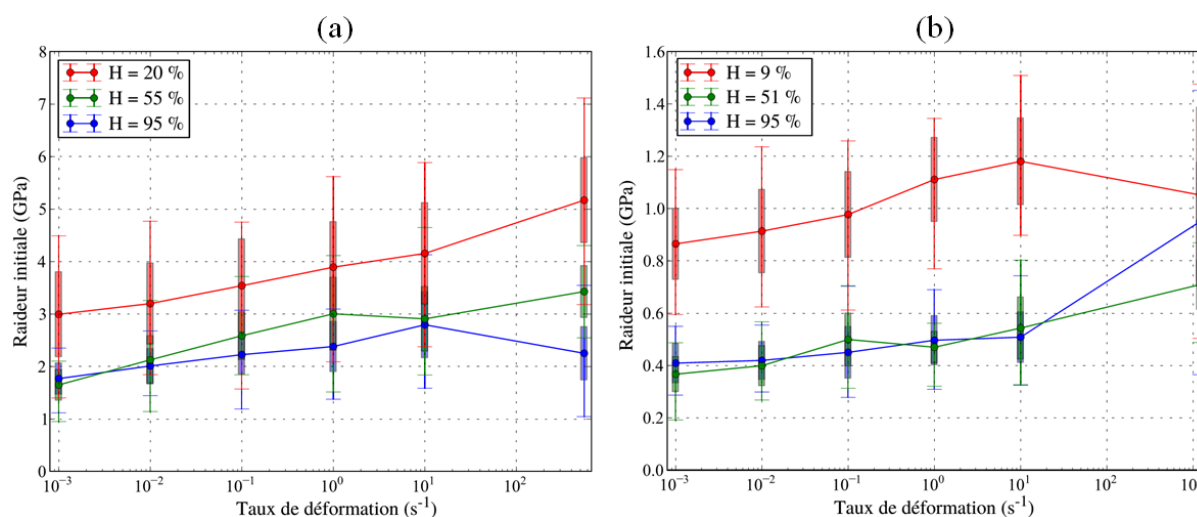


Figure 3.16 : Influence de l'humidité et du taux de déformation sur le module d'Young apparent d'éprouvette de hêtre verts en (a) compression longitudinale et (b) compression radiale.

L'effet de l'humidité est également bien marqué au travers de cette campagne. Si passé un certain seuil, l'impact de l'humidité sur le module d'Young du matériau semble faible, l'effet entre bois sec et bois vert est considérable. La diminution du module d'Young est de l'ordre de 30% entre ces deux états.

Etant donné l'incompressibilité de l'eau, le couplage entre les effets de l'humidité et du taux de déformation semble intuitif, cette dernière ne pouvait s'écouler aisément dans le bois à fort taux de déformation. R. Pfeiffer a d'ailleurs mené des études statistiques sur ses résultats renvoyant un résultat mitigé. Le rapport de variance de l'interaction entre les deux facteurs précédents (11), obtenu par analyse de la variance, est significatif mais très faible devant celui de l'humidité (57) et du taux de déformation (259). L'interaction entre effet de l'humidité et effet du taux de déformation sera donc considérée comme négligeable et les deux effets traités indépendamment l'un de l'autre.

3.5 Expression des données quantitatives

3.5.1 Le comportement élastique cible

Malgré l'existence de nombreux travaux donnant des résultats qualitatifs sur le comportement du bois, on ne trouve pas de résultats quantitatifs des paramètres de comportement à haute humidité et haut taux de déformations. Nous proposons de déduire ces valeurs à partir de résultats quantitatifs en sollicitations quasi-statiques (QS) du bois sec et corrigés par les influences de l'humidité et de la vitesse.

Pour la partie élastique, 6 grandeurs sont à définir dans le cas tridimensionnel, trois pour une modélisation bidimensionnelle : E_L , E_T et G_{LT} . En y intégrant l'effet de l'humidité et du taux de déformation, ces trois grandeurs deviennent variables : $E_L(H\%, \dot{\epsilon})$, $E_T(H\%, \dot{\epsilon})$, $G_{LT}(H\%, \dot{\epsilon})$.

En partant de l'hypothèse que le taux d'humidité d'un échantillon usiné est constant au cours de l'usinage et homogène au sein de l'échantillon, il suffit de connaître à priori la rigidité de l'échantillon à modéliser à cette humidité. C'est la solution qui est retenue lors de cette étude. La donnée humidité n'est donc pas présente directement dans le modèle. Dans le cas où cette hypothèse ne serait pas satisfaisante, un couplage hygro-mécanique des simulations est envisageable, mais trop ambitieux dans une première approche pour un paramètre impactant à priori peu les propriétés mécaniques au-dessus du PSF.

Le point de départ du calcul des propriétés élastiques est celui donné dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Propriétés élastiques du hêtre sec estimées en sollicitation quasi-statique.

Propriétés	$E_L(0\%, QS)$	$E_T(0\%, QS)$	$G_{LT}(0\%, QS)$
Valeurs (Guitard, 1987)	14 100 MPa	867 MPa	980 MPa

Ces valeurs sont corrigées en employant le rapport des rigidités trouvées par R. Pfeiffer (Pfeiffer et al., 2015) entre les modules d'Young secs $E_L^{Pf}(0\%, QS)$ et les modules d'Young humides $E_L(55\%, QS)$ en sollicitations quasi-statiques :

$$E_L(vert, QS) = \frac{E_L^{Pf}(0\%, QS)}{E_L^{Pf}(55\%, QS)} \times E_L(0\%, QS), \quad (3.4)$$

$$E_T(vert, QS) = \frac{E_T^{Pf}(0\%, QS)}{E_T^{Pf}(55\%, QS)} \times E_T(0\%, QS). \quad (3.5)$$

Le premier ratio, $\frac{E_L^{Pf}(0\%, QS)}{E_L^{Pf}(55\%, QS)}$, d'après les données mesurées par R. Pfeiffer est égal à 0,55, tandis que le second, $\frac{E_T^{Pf}(0\%, QS)}{E_T^{Pf}(55\%, QS)}$, est égal à 0,59. Quant à l'évolution du module de cisaillement, en l'absence de donnée, il sera considéré, arbitrairement, qu'il suit une évolution

similaire. La moyenne de deux ratios précédents sera utilisée comme ratio entre le module de cisaillement du bois sec et celui du bois vert. Les nouvelles valeurs des propriétés élastiques du hêtre vert ainsi déduites sont données dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Propriétés élastiques du hêtre vert estimée en sollicitation quasi-statique.

Propriétés	$E_L(\text{vert}, \text{QS})$	$E_T(\text{vert}, \text{QS})$	$G_{LT}(\text{vert}, \text{QS})$
Valeurs	7 755 MPa	511 MPa	559 MPa

Il reste ensuite à corriger ces valeurs en prenant en compte le taux de déformation de traction-compression $\dot{\epsilon}$. Pfeiffer (Pfeiffer, 2015) a montré que les contraintes de compressions évoluent de manière linéaire par rapport au logarithme du taux de déformation, donc que les grandeurs telles que le module d'Young peuvent s'exprimer, dans la plage $\dot{\epsilon} \in [10^{-3} \text{ s}^{-1}; 10^3 \text{ s}^{-1}]$, comme une loi puissance de $|\dot{\epsilon}|$ de la forme :

$$E = \chi \times |\dot{\epsilon}|^\psi. \quad (3.6)$$

Une nouvelle fois, les coefficients χ et ψ obtenus par Pfeiffer vont être utilisés pour déterminer l'influence du paramètre $|\dot{\epsilon}|$, ceci afin de corriger les rigidités calculées précédemment et indiquées dans le Tableau 3.4.

On exprimera finalement les modules d'Young de la façon suivante :

$$E_L(\text{vert}, \dot{\epsilon}) = \chi_L \times |\dot{\epsilon}|^{\psi_L} + E_L(\text{vert}, 10^{-3}) - \chi_L \times 10^{-3\psi_L}, \quad (3.7)$$

$$E_T(\text{vert}, \dot{\epsilon}) = \chi_T \times |\dot{\epsilon}|^{\psi_T} + E_T(\text{vert}, 10^{-3}) - \chi_T \times 10^{-3\psi_T}, \quad (3.8)$$

où $\chi_L = 2660 \text{ MPa} \times \left(\frac{\text{s}}{\text{m}}\right)^{\psi_L}$, $\psi_L = 0,052$ (sans unité) et $\chi_T = 504 \text{ MPa} \times \left(\frac{\text{s}}{\text{m}}\right)^{\psi_T}$, $\psi_T = 0,045$ (sans unité).

$E(\text{vert}, 10^{-3}) - \chi \cdot 10^{-3\psi}$ représente l'écart entre les modules relevés dans la littérature et ceux estimés par Pfeiffer car les derniers présentaient un écart anormal par rapport aux rigidités usuelles mesurées sur du hêtre.

Sachant que la définition des essais en quasi-statique selon (Guitard, 1987) sont des essais « pour lesquels les vitesses de mise sous contraintes sont supposées suffisamment lentes pour ne pas induire des effets d'inertie ou de comportement différé ». Le taux de déformation dans les éprouvettes n'est pas précisé, il est donc supposé inférieur ou égal à 10^{-3} s^{-1} .

Le taux de déformation n'est pas homogène dans l'échantillon. Il est très dépendant de la proximité de l'outil par rapport à la zone observée comme visible (en dérivant les niveaux de déformation en fonction de la distance) dans les résultats des mesures de champ par corrélation d'image montrés en Figure 3.2. Les gradients de taux de déformation sont

importants dans la matière, donc une modélisation complète de la coupe demanderait une prise en compte précise de ce taux de déformation. Cependant dans le cadre d'une première approche, nous ne prenons pas en compte son influence et prenons les valeurs de modules d'Young calculée pour une vitesse de déformation égale à 10^3 s^{-1} d'après les équations (3.7) et (3.8). Cette valeur de vitesse de déformation est choisie car elle est du bon ordre de grandeurs des niveaux de vitesse de déformations observés par R. Pfeiffer dans les zones en amont du couteau (Figure 3.2). Cette hypothèse fixée est forte et potentiellement source d'erreurs dans le comportement du matériau modélisé, mais nécessaire afin de présenter un premier modèle simple qui pourra être amélioré par la suite par la prise en compte des taux de déformation locaux. Les résultats des calculs sont visibles dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Propriétés élastiques du hêtre vert estimées à fort taux de déformation.

Propriétés	$E_L(\text{vert}, 10^3)$	$E_T(\text{vert}, 10^3)$	$G_{LT}(\text{vert}, 10^3)$
Valeurs	9 470 MPa	789 MPa	772 MPa

Notons que la rigidification apportée par le taux de déformation ne compense pas l'apport de souplesse engendré par le taux d'humidité de l'éprouvette. Les rigidités calculées pour du bois vert en sollicitation dynamique restent inférieures aux rigidités observées sur du bois sec avec une sollicitation quasi-statique. De plus, la rigidité tangentielle augmente plus fortement (+22%) que la rigidité longitudinale (+54%) en fonction du taux de déformation, ce qui est potentiellement causé par la présence d'eau dans les cellules rendant le bois difficilement compressible tangentiellement, l'eau étant d'autant plus difficile à chasser que le taux de déformation est grand (l'évacuation de l'eau des cellules présentant un débit limité).

En l'absence d'informations sur l'influence du taux de déformation sur le module de cisaillement, il sera supposé que ce dernier suit une évolution semblable aux modules d'Young longitudinal et tangentiel. Remarquons que ce module devient légèrement plus faible que E_T sous cette hypothèse.

3.5.2 Comportements à rupture cible

Les limites en rupture en traction du hêtre vert ont été investiguées par R. Pfeiffer (Pfeiffer, 2015) dans les directions longitudinale et transverse sous sollicitation quasi-statique. Les résultats obtenus en traction transverse sont considérés comme de la traction tangentielle, mais les éprouvettes étaient usinées de sorte que le plan de rupture n'était pas parfaitement perpendiculaire à la direction tangentielle. Du fait de la grande complexité expérimentale engendrée par ces essais, aucune information sur l'influence du taux de déformation sur la limite à la rupture du hêtre vert n'est disponible, même s'il est probable que ce dernier paramètre soit influant. Les contraintes à la rupture moyennes obtenues au cours de cette étude sont indiquées dans le Tableau 3.6.

Il en est de même pour la limite à la rupture en cisaillement du hêtre vert à fort taux de déformation. Une première approche de cette mesure a été réalisée très récemment par (Maigre & Silvy, 2016). Ces données ne sont pas actuellement quantifiées.

Tableau 3.6 : Résistances à la rupture élastiques du hêtre vert estimées à fort taux de déformation.

Propriétés	σ_L^{maxi}	σ_T^{maxi}	σ_{LT}^{maxi}
Valeurs	100,92 MPa	5,15 MPa	indéterminé

3.5.3 Le comportement anélastique

Les deux paramètres du modèle d'anélasticité tangentielle utilisés, la limite en compression σ_0 et le facteur de densification p_0 , sont optimisés de sorte à être représentatifs du mieux possible des résultats des essais de compression tangentielle menés par R. Pfeiffer (Pfeiffer, 2015). Le module d'Young mesuré lors de ces essais est erroné, mais on suppose que les contraintes mesurées sont justes, l'erreur de calcul du module dans les essais de R. Pfeiffer provenant essentiellement de l'estimation des déformations, surtout à bas niveau de déformation. Ceci est dû à l'impossibilité d'instrumenter des éprouvettes de faibles épaisseurs avec des jauges de déformations ou de réaliser de la mesure de champs sur des faces cylindriques sans moyens de stéréocorrélation d'images.

Les contraintes moyennes sur les 30 essais les plus énergétiques réalisés sur barres d'Hopkinson (Hopkinson, 1914) par R. Pfeiffer, discrétisées tous les 0,5% de déformation jusqu'à 20% de déformation, sont comparées aux contraintes calculées pour une nappe de 100 valeurs de σ_0 entre 10 MPa et 20 MPa et 100 valeurs p_0 entre 30% et 40% aux mêmes niveaux de déformation.

Le jeu de paramètre minimisant cet indicateur l'erreur moyenne au carrée (*MSE*) entre les contraintes mesurées expérimentalement (σ) et calculées selon la loi de plasticité ($\sigma_{\text{modèle}}$) est sélectionné.

$$MSE = \frac{\sum_{\varepsilon=0,005}^{\varepsilon=0,20} (\sigma_{\text{modèle}}(\varepsilon) - \sigma(\varepsilon))^2}{40} \quad (3.9)$$

Le calcul de la contrainte de compression $\sigma_{\text{modèle}}(\varepsilon)$, selon le modèle utilisé de densification exponentielle, est explicité en section 3.3.1.3.

Les essais de R. Pfeiffer ayant été réalisés sur des éprouvettes transverses et non purement tangentielles, le modèle surestime potentiellement les contraintes par rapport à un usinage purement radial. Les valeurs de σ_0 et p_0 trouvées sont indiquées dans le Tableau 3.7 et la Figure 3.17b compare les contraintes calculées avec ce jeu de valeur et la courbe contrainte/déformation moyenne des 30 essais comparés :

Tableau 3.7 : Paramètres du modèle de plasticité utilisé.

Propriétés	σ_0	p_0
Valeurs	13,5 MPa	35,2%

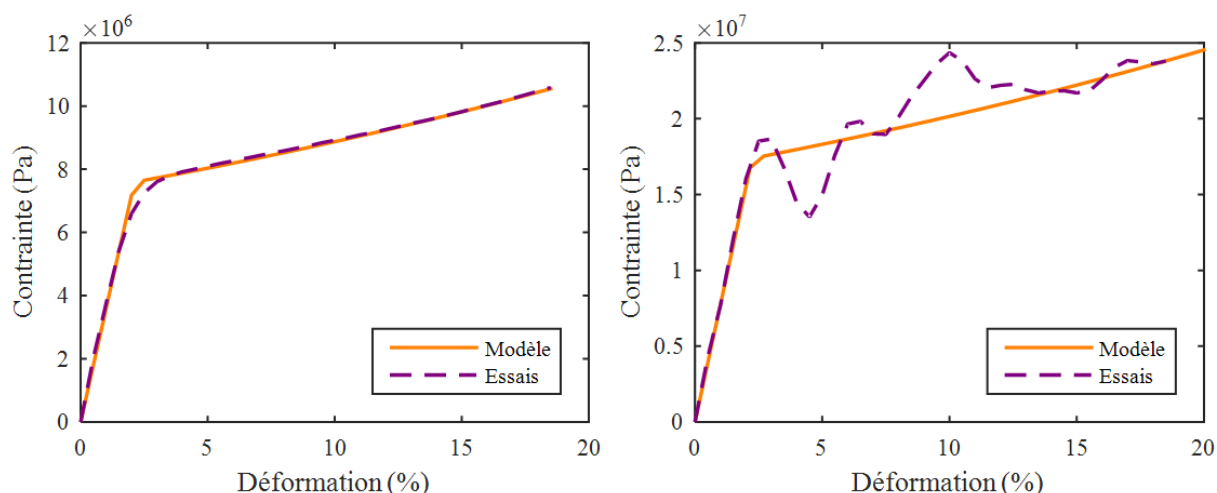


Figure 3.17 : Comparaisons entre comportement mesuré et modélisé en quasi-statique (a) et en dynamique (b) pour le bois de hêtre vert.

La Figure 3.17a montre la pertinence du modèle utilisé (en dessous de 20% de déformation) dans le cas de sollicitations quasi-statiques. Dans le cas de sollicitations dynamiques, les contraintes mesurées étant moins stables, l'écart avec le modèle est par conséquent plus important, mais il retranscrit néanmoins fidèlement la tendance générale observée.

3.5.4 Synthèse

Le Tableau 3.8 contient l'ensemble des paramètres du modèle simplifié « cibles » du modèle numérique. Ces paramètres étant fixés, l'humidité et le taux de déformation ne seront plus cités. Les modules $E_L(vert, 10^3)$, $E_T(vert, 10^3)$ et $G_{LT}(vert, 10^3)$ sont donc renommés E_L^C , E_T^C et G_{LT}^C respectivement afin d'alléger les notations.

Tableau 3.8 : récapitulatif des paramètres mécaniques cibles du hêtre vert simplifié.

Propriétés	E_L^C	E_T^C	G_{LT}^C	σ_L^{maxi}	σ_T^{maxi}	σ_{LT}^{maxi}	σ_0	p_0
Valeurs	9 470 MPa	789 MPa	772 MPa	100,92 MPa	5,15 MPa	Indet.	13,5 MPa	35,2%

Maintenant que les propriétés mécaniques cibles sont définies, le modèle numérique s'appuyant sur ces données peut être développé.

3.6 Conclusion

Que ce soit en terme phénoménologique ou sur l'estimation quantitative des paramètres identifiés, beaucoup de simplifications ont été faites afin d'initier une première modélisation simple. La mise en place de ce modèle montre également à quel point il est difficile de disposer de données sur le comportement dynamique du bois vert (quelle que soit l'essence). Le passage au modèle numérique est décrit dans les deux prochains chapitres. Il demeure important de ne pas oublier pour autant les différentes hypothèses et effets négligés, qui pourront être considérés dans une seconde approche en complexifiant pas à pas le modèle développé.

