

LES BIOCARBURANTS DE PREMIERE GENERATION

. **Description**

Il existe aujourd'hui deux grandes filières de production de biocarburants de première génération. La filière « bioethanol » dont les produits finaux sont le bioethanol et son dérivé l'éthyl-tertio-butyl-éther (ETBE) et la filière « biodiesel » dont les produits finaux sont de l'huile végétale et son dérivé le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV). Les principales étapes de production de biocarburant de ces deux grandes filières sont illustrées dans la figure I-1.

Le bioéthanol est principalement produit à partir de sucres présents dans la betterave, le blé, la canne à sucre ou encore le maïs. Il peut être directement incorporé dans les moteurs à essence actuels jusqu'à 10% en volume. Au-delà, des adaptations sont nécessaires. La technologie « flex-fuel », très développée au Brésil notamment, permet d'utiliser aussi bien de l'essence que du bioéthanol. Les mélanges contiennent alors des proportions élevées de bioéthanol, jusqu'à 85% en volume pour l'E85. L'ETBE, beaucoup plus stable, est souvent préféré au bioéthanol. Il peut être incorporé jusqu'à 15% en volume dans l'essence. Le

biodiesel est surtout produit à partir de colza, il est incorporé à hauteur de 7% en volume dans les moteurs diesel classiques.

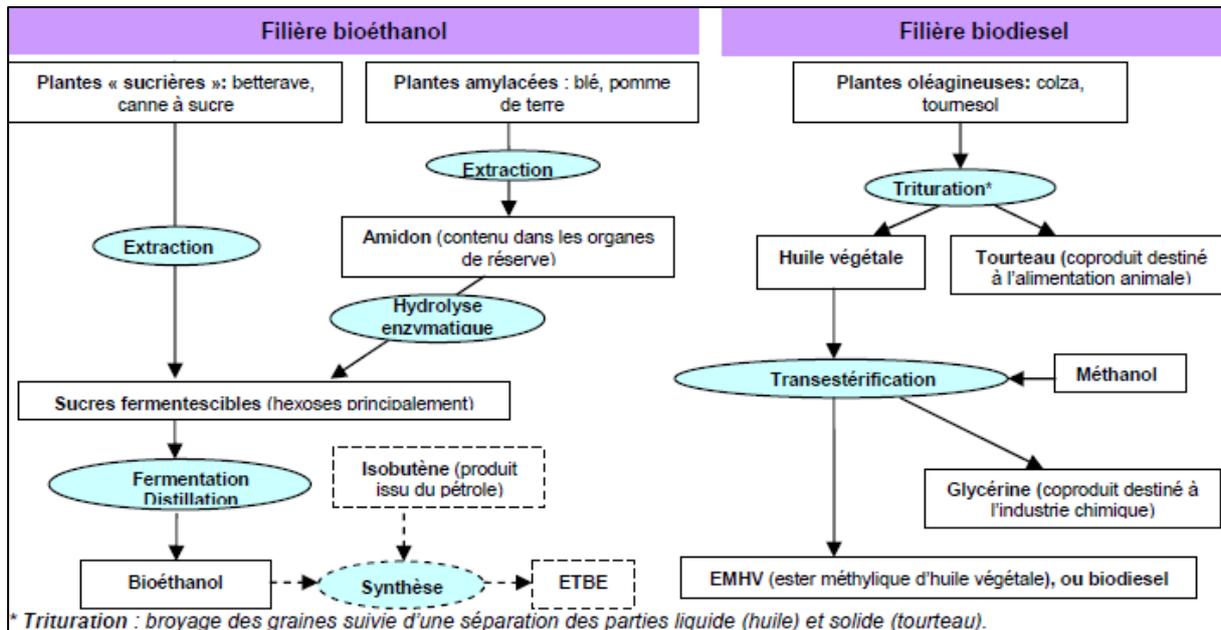


Figure I-1. Les principales étapes des filières de production de biocarburants de 1ère génération (Departe, 2010).

C'est à partir des années 70 que les biocarburants de première génération se sont développés au Brésil et aux Etats-Unis, il faudra attendre 1992 et la réforme de la politique agricole commune (PAC) pour assister au lancement des biocarburants en France et en Europe. L'objectif était alors économique et permettait d'offrir aux agriculteurs de nouveaux débouchés et de créer des emplois dans le but de redynamiser les zones rurales. Plus récemment, ce sont surtout des objectifs environnementaux et géopolitiques qui ont contribué au développement de la filière.

En France, pour atteindre ses objectifs, le gouvernement utilise deux recours économiques. Le premier est une exonération partielle de la taxe intérieure de consommation des produits pétroliers (TIC) s'appliquant sur les biocarburants. En 2008 cette taxe s'élevait à 42,84 €/hl pour le gazole et à 60,69 €/hl pour l'essence alors qu'elle était de 20,44 €/hl pour le biodiesel et à 33,69 €/hl pour le bioéthanol (Departe, 2010). En 2005, la loi de finances ajoute à cette première taxe, la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) dont l'objectif était d'inciter les distributeurs de carburants à incorporer des biocarburants dans leurs produits. En fait, ces deux recours sont complémentaires, la TGAP permet le développement de la filière et l'exonération de la TIC permet de compenser les surcoûts de la production de biocarburants.

1.2.2. Les limites des biocarburants de première génération

En 2005, un rapport-bilan de la politique de soutien aux biocarburants a montré des résultats économiques mitigés (Prévot et al., 2005). Cette étude montre en effet que depuis de nombreuses années l'exonération de la TIC compensait les producteurs bien au-delà des surcoûts de production révélant une politique bien coûteuse. A ceci s'ajoute la faible création d'emplois dans le secteur agricole qui s'apparentait en fait plus à un maintien du nombre d'emplois qu'à une création pure et simple d'emplois en zones rurales prévue initialement (Prévot et al., 2005).

Au bilan économique plus que moyen s'ajoute un bilan environnemental très controversé. De récentes études réalisées de par le monde (ADEME 2010) annoncent une réduction d'émissions de GES allant de 30 à 60% par rapport à leurs équivalents fossiles alors que les prévisions initiales tablaient sur une réduction de 60 à 80% avant 2002. Pour certaines filières il y a même des incertitudes sur l'existence d'un vrai gain environnemental. En fait aucun biocarburant n'est véritablement « vert » puisqu'ils sont tous encore mélangés à la pompe avec les carburants d'origine fossile qu'ils sont censés remplacer. C'est surtout la phase de production qui pose problème. Pour avoir des rendements suffisants, il est nécessaire d'avoir des sols fertiles et de faire de l'agriculture intensive. Ceci s'accompagne inévitablement de l'utilisation d'engrais azotés qui conduit à la formation de protoxyde d'azote 200 fois plus « réchauffant » que le CO₂ ! Ainsi, même si les gaz à effet de serre sont globalement réduits par rapport à l'utilisation de carburants fossiles, les biocarburants ne produisent au final que 1,5 à 5L de biocarburants pour 1L de pétrole fossile utilisé (Fery, 2011).

En fait, seule la production d'éthanol à partir de cannes à sucre au Brésil fait l'unanimité en présentant un bilan environnemental positif à condition bien sûr qu'elle n'engendre pas un changement d'affectation des terres. La canne à sucre, cultivée sur 1% du territoire brésilien, comblerait 50% de la consommation brésilienne de carburants. Les impacts sur la biodiversité, les sols et la ressource en eau d'une intensification des cultures énergétiques ne sont également pas négligeables (FAO, 2008).

Des limites apparaissent également au niveau géopolitique. L'objectif fixé par l'Europe d'accroître son indépendance énergétique en limitant les importations d'énergies fossiles semble délicat à atteindre. Une substitution importante de ce type d'énergie par des biocarburants de première génération nécessiterait en effet une quantité de terres largement supérieure aux surfaces disponibles (Prévot et al., 2005). D'autre part, la substitution des cultures alimentaires en cultures énergétiques implique une compétition directe entre ces deux modes de cultures possibles. Le développement et l'expansion du secteur des biocarburants contribuent alors à faire monter le prix des denrées alimentaires à

moyen terme et à accroître l'insécurité alimentaire des catégories de population les plus défavorisées des pays en développement (OCDE, 2008).

Finalement, le bilan mitigé des biocarburants de première génération a contribué à reporter tous les espoirs vers ceux de seconde génération. De meilleurs bilans environnementaux, des rendements plus élevés et surtout la non compétition entre usage alimentaire et non alimentaire des produits agricoles sont les principaux avantages attendus.

1.3. LES BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION COMME ALTERNATIVE A L'UTILISATION DES CARBURANTS D'ORIGINE FOSSILE

Deux grandes filières de production de biocarburants de seconde génération sont envisagées. La voie biochimique qui permet d'obtenir du bioéthanol selon un procédé relativement proche de celui utilisé dans la fabrication de bioéthanol de première génération et la voie thermochimique permettant d'obtenir du gazole de synthèse, du kérosène, du méthanol, de l'éthanol ou encore du diméthyl-ether (DME). Les procédés de synthèse y sont différents de ceux utilisés dans la production de biogazole de première génération.

Ces deux procédés ont l'avantage de convertir l'intégralité de la biomasse et notamment la partie ligno-cellulosique de grands nombres de végétaux.

1.3.1. Les types de biomasses envisagés et les problèmes liés

Dans le domaine énergétique, la biomasse se définit comme l'ensemble des matières d'origine végétale, animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie. Cependant, seule la biomasse végétale, parce qu'elle contient de la cellulose, est adaptée à la production de biocarburants de seconde génération. Les trois principales filières d'approvisionnement en biomasse sont la filière des déchets industriels, des résidus agricoles et sylvicoles et des cultures énergétiques dédiées. De manière à ne pas retomber sur les écueils soulevés par la production des biocarburants de première génération, cette dernière filière devra être utilisée en dernier recours. La quantité importante de la ressource et son faible coût sont des avantages indéniables au développement de ce type de carburants.

Dans la filière « déchets industriels » ce sont surtout les résidus provenant de la transformation du bois et les co-produits des industries agro-alimentaires qui peuvent être mobilisés. Cette ressource est facilement mobilisable et pour partie utilisée par d'autres

filières déjà matures comme les filières bois énergie ou papetières. La mobilisation de cette ressource pour la production de biocarburants entraînerait donc une concurrence inévitable entre les filières qui peut, à plus ou moins long terme, être préjudiciable. En fait, dans ces déchets industriels seuls les bois de rebus ne sont pas utilisés. Mais à cause de leur très grande dispersion et de leur pollution (une partie de ces bois est traitée chimiquement) cela nécessiterait la mise en place d'un système de collecte et de traitement coûteux qui n'existe pas à l'heure actuelle. Il est cependant intéressant de noter que des recherches ont lieu dans ce domaine. Girods (2008) a ainsi étudié la valorisation énergétique des déchets de panneau de particules. Grâce à un procédé multi-étagé, l'azote présent dans les colles est dans un premier temps éliminé par pyrolyse. Le produit alors formé est converti en un gaz riche en hydrogène et monoxyde de carbone utilisable dans divers procédés de valorisation énergétique.

La filière des résidus agricole et sylvicole représente une ressource disponible de 15,7 millions de tonnes de matière sèche. Globalement, les résidus agricoles sont constitués de toute la matière végétale qui est laissée sur le sol après la récolte (paille de céréales, cannes de maïs...), cela représente 6.6 millions de tonnes disponibles (Deporte, 2010). Les résidus forestiers quant à eux sont essentiellement constitués de résidus dits « hors forêt », majoritairement issus de l'élagage de haies ou d'arbres isolés, et de résidus forestiers (rémanents, bois d'éclaircie), cela représente 9,1 millions de tonnes disponibles (Deporte, 2010). Théoriquement, cette filière permettrait la production de 2,7 Mtep de biocarburant si ces résidus étaient utilisés en totalité. Mais compte tenu des objectifs en terme de biocarburants fixés pour 2020 et en faisant l'hypothèse que les quantités de biocarburants de première génération n'augmenteront pas, les gisements en résidus agricole et sylvicole ne suffiront pas. La mise en place de cultures énergétiques dédiées semble donc inévitable et nécessaire.

Différentes espèces végétales sont envisagées à ce propos. Elles présentent toutes les mêmes caractéristiques générales. Ce sont des espèces robustes à hauts rendements en matière sèche pouvant se développer sur des terres marginales avec peu d'engrais. Cela permet d'obtenir des rendements de biomasse à l'hectare important et donc des rendements énergétiques surfaciques élevés bien supérieurs à ceux obtenus grâce à la première génération de biocarburants. Actuellement, des espèces annuelles comme le sorgho fibre (*Sorghum bicolor*) ou le triticales (*Triticosecale*), des espèces fourragères comme la luzerne (*Medicago sativa*) et la fétuque (*Festuca*) ou encore des espèces pérennes herbacées comme le miscanthus ou ligneuses provenant des taillis à courte rotation (TCR) ou des taillis à très courte rotation (TtCR) sont envisagées.

Les différents types de biomasse pouvant être utilisés montrent bien que la matière première nécessaire à la fabrication des biocarburants de seconde génération est, de par sa provenance variée, très hétérogène, dispersée et énergétiquement peu concentrée. Il serait donc peu rentable aussi bien sur le plan économique que énergétique de l'utiliser

directement. Une étape de prétraitement est indispensable avant son utilisation dans les processus de fabrication de biocarburants. En fonction des voies de synthèse choisies cette étape peut prendre différentes formes. La nature de la biomasse mobilisée a une influence sur le rendement des procédés (Ballerini, 2006).

Il est pour finir intéressant de noter que des matières d'origine animale peuvent aussi être utilisées dans la production de biocarburants de seconde génération (gazeification des résidus d'élevage).

Dans ce travail, seul le bois a été étudié. Il est cependant important de noter qu'un travail similaire à celui présenté ultérieurement peut être réalisé avec d'autres types de biomasse.

1.3.2. La voie biochimique

De manière générale, la production de bioéthanol de seconde génération suit les mêmes étapes que celle de première génération (figure I-1). Cependant, de par la nature très différente de la biomasse utilisée, de nouvelles étapes de production doivent être ajoutées et d'autres, déjà existantes, doivent être modifiées. Une étape de prétraitement (mécanique, physico-chimique ou chimique) est nécessaire afin de rendre accessible les molécules de cellulose, majoritairement utilisées lors de la production de bioéthanol de seconde génération. A ce jour, l'explosion à la vapeur est le procédé de prétraitement le plus mature. Il consiste à porter le matériau à haute température (entre 160 et 270°C) par injection de vapeur saturée sous haute pression (10 à 50 bar) pendant un temps court puis à pratiquer une détente brutale jusqu'à pression atmosphérique. Il se produit alors une déstructuration de la matrice ligno-cellulosique, une hydrolyse partielle des hémicelluloses et un début de transformation de la lignine rendant finalement les molécules de cellulose bien plus accessibles (Broust et al., 2008). L'étape d'hydrolyse enzymatique doit être modifiée afin de permettre la dégradation de la cellulose en hexoses et des enzymes spécifiques doivent être utilisées. C'est également le cas lors de l'étape de fermentation des hexoses qui nécessite des levures particulières. Pour finir, le mélange obtenu en fin de procédé permet, comme dans le procédé de première génération, d'obtenir du bioéthanol. Il est cependant plus dilué ce qui rend l'étape de distillation finale bien plus énergivore.

A l'heure actuelle, ces étapes font encore l'objet de recherches principalement menées par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et l'IFP Energies nouvelles.

1.3.3. La voie thermochimique

La voie thermochimique de production de biocarburants de seconde génération est composée de deux grandes étapes : une étape de gazeification de la biomasse suivie d'une synthèse du carburant à partir du gaz obtenu. A partir du gaz obtenu deux voies de synthèse

de carburant sont possibles, elles permettent d'obtenir des carburants gazeux d'une part (DME, méthanol et éthanol) et d'autre part des carburants liquides (diesel et kérosène). Alors que les carburants gazeux ne peuvent pas encore être utilisés dans les moteurs classiques, la voie la plus prometteuse est celle de la production de gazole par la voie liquide dite BtL (Biomass to Liquids). Elle présente l'énorme avantage de produire du gazole directement compatible avec les moteurs diesel actuels et de nécessiter de plus faibles investissements dans les systèmes de distribution. C'est cette voie qui est présentée dans ce travail.

La figure I-3 présente les deux grands procédés de production de biogazole de seconde génération. Globalement, ces procédés suivent les mêmes étapes. Ils ne diffèrent que par le type de prétraitement de la biomasse et par la source énergétique utilisée pour la production du dihydrogène nécessaire dans l'étape d'ajustement du ratio H_2/CO .

1.3.3.1. Le prétraitement de la biomasse

La biomasse est une ressource aux propriétés variables, dispersée et énergétiquement peu concentrée (cf. § 1.3.1). Il apparaît donc nécessaire de la transformer en un produit intermédiaire mieux adapté à sa transformation en biocarburants. Plus précisément il s'agit d'obtenir un produit homogène, dense énergétiquement, bien adapté au transport et à l'alimentation sous pression des gazéificateurs. Afin de parvenir à ces objectifs, deux types de prétraitement sont envisagés : la pyrolyse rapide et la torréfaction.

- **La pyrolyse rapide**

La biomasse qui a été préalablement séchée et broyée subit une étape de pyrolyse rapide (température de 500°C pendant quelques secondes) qui conduit à un produit intermédiaire (slurry) formé d'une biohuile, de particules de charbon en suspension et d'un mélange de gaz (CO_2 , CO , H_2 , CH_4 ...) dans des proportions moindres. Les biohuiles sont d'un aspect comparable au pétrole et contiennent des centaines de composés chimiques en proportions variables (phénols, sucres, alcools, acides organiques, composés aromatiques...). Ce sont elles qui sont directement injectées dans les gazéificateurs. Le rendement énergétique de cette réaction est d'environ 75% (His, 2007).

- **La torréfaction**

Contrairement à la pyrolyse rapide, la torréfaction n'intervient pas au même moment dans la phase de prétraitement de la biomasse et, plus généralement, dans le processus de mise au point des biocarburants de seconde génération (figure I-3). Comme cela est décrit en détail dans la partie 3 de cette revue de littérature, la torréfaction est un traitement thermique de la biomasse sous atmosphère inerte à des températures pouvant aller jusqu'à 300°C. C'est un processus moins exigeant énergétiquement que la pyrolyse rapide et qui

présente l'avantage de faciliter le broyage de la biomasse et d'obtenir de fines particules adaptées à l'injection dans les gazéificateurs. Contrairement au prétraitement par pyrolyse, la torréfaction intervient donc plutôt en amont de l'étape de broyage de la biomasse.

Le but du travail présenté dans ce mémoire est justement d'évaluer les tenants et les aboutissants de ce procédé comme moyen de prétraitement de la biomasse avant son injection dans les gazéificateurs.

1.3.3.2. La gazéification

La gazéification est la transformation thermique et chimique d'un combustible généralement solide (charbon, biomasse...) en présence d'un réactif gazeux (oxygène, vapeur d'eau, hydrogène...) (Ballerini, 2006). La première étape est toujours une réaction de pyrolyse formant du charbon suivie d'une étape de gazéification à proprement dit qui, selon l'utilisation finale du gaz formé, met en jeu différentes réactions chimiques. Dans le cas de production de biocarburants de seconde génération, le charbon de bois réagit avec la vapeur d'eau à une température de 1400°C dans le cas d'un procédé à flux entrainé et de 900°C dans le cas d'un procédé à lit fluidisé. Un gaz de synthèse (Syngas) est alors formé selon la réaction suivante (Deglise et Donnot, 2004) :



Le gaz de synthèse peut ensuite être transformé en hydrocarbure par synthèse Fischer-Tropsch. Cette réaction est décrite ultérieurement.

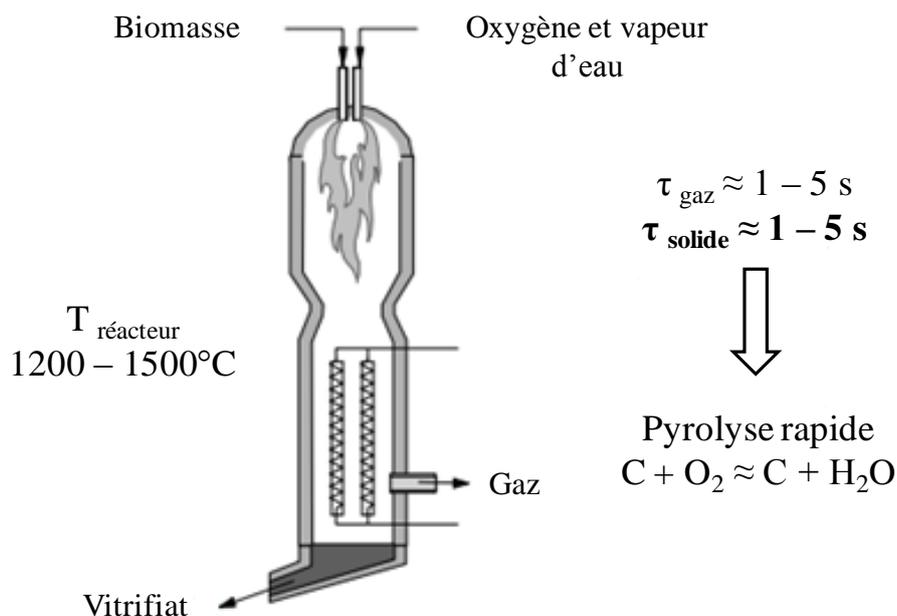


Figure I-2. Schéma de principe d'un gazéificateur à lit entraîné (Mauviel et al., 2009).

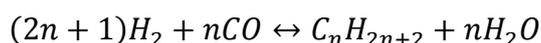
A l'échelle industrielle la technologie dite « à lit entraîné » est aujourd'hui la plus pertinente dans la fabrication de biocarburants. Malgré la quantité importante de suies produites lors des réactions de craquage des goudrons, cette technologie permet de produire un gaz de bonne qualité (Broust et al., 2008).

1.3.3.3. La purification et l'ajustement

L'étape de purification permet d'éliminer les impuretés (goudrons, particules, gaz non nécessaires...) présentes dans le mélange après l'étape de gazéification. De l'hydrogène est ensuite ajoutée afin de rendre l'étape suivante plus rentable, le rapport H_2/CO qui était jusque-là d'environ 1 va être doublé. C'est l'étape d'ajustement (étape de water-gas shift). En fonction de la source d'énergie utilisée pour la production du dihydrogène nécessaire à l'étape d'ajustement, deux types de procédés se distinguent : les procédés auto-thermiques où une partie de la biomasse est utilisée pour fabriquer ce dihydrogène ($H_2 - BIOM$) et les procédés allo-thermiques où le dihydrogène est obtenu par une source énergétique extérieure ($H_2 - ELEC$ et $H_2 - GAZ$) (Departé, 2010).

1.3.3.4. La synthèse Fischer-Tropsch et le raffinage

La réaction de synthèse Fischer-Tropsch a été découverte en 1923 par deux chercheurs allemands, Franz Fischer et Hans Tropsch. Au cours de ce procédé le monoxyde de carbone (provenant du charbon formé lors de l'étape de pyrolyse précédant la gazéification) et l'hydrogène sont catalysés en vue de former un mélange d'hydrocarbures composé d'un mélange de diesel-kérosène et de bionaphta :



Le fer, le cobalt, le ruthenium ou encore le nickel sont les principaux catalyseurs utilisés au cours de cette réaction, d'autres sont à l'étude comme le platine ou le palladium. En fonction du catalyseur choisi, la synthèse donnera du diesel ou du kérosène.

Le mélange d'hydrocarbures obtenu est ensuite distillé afin de les séparer, c'est l'étape de raffinage (Departé et al., 2006).

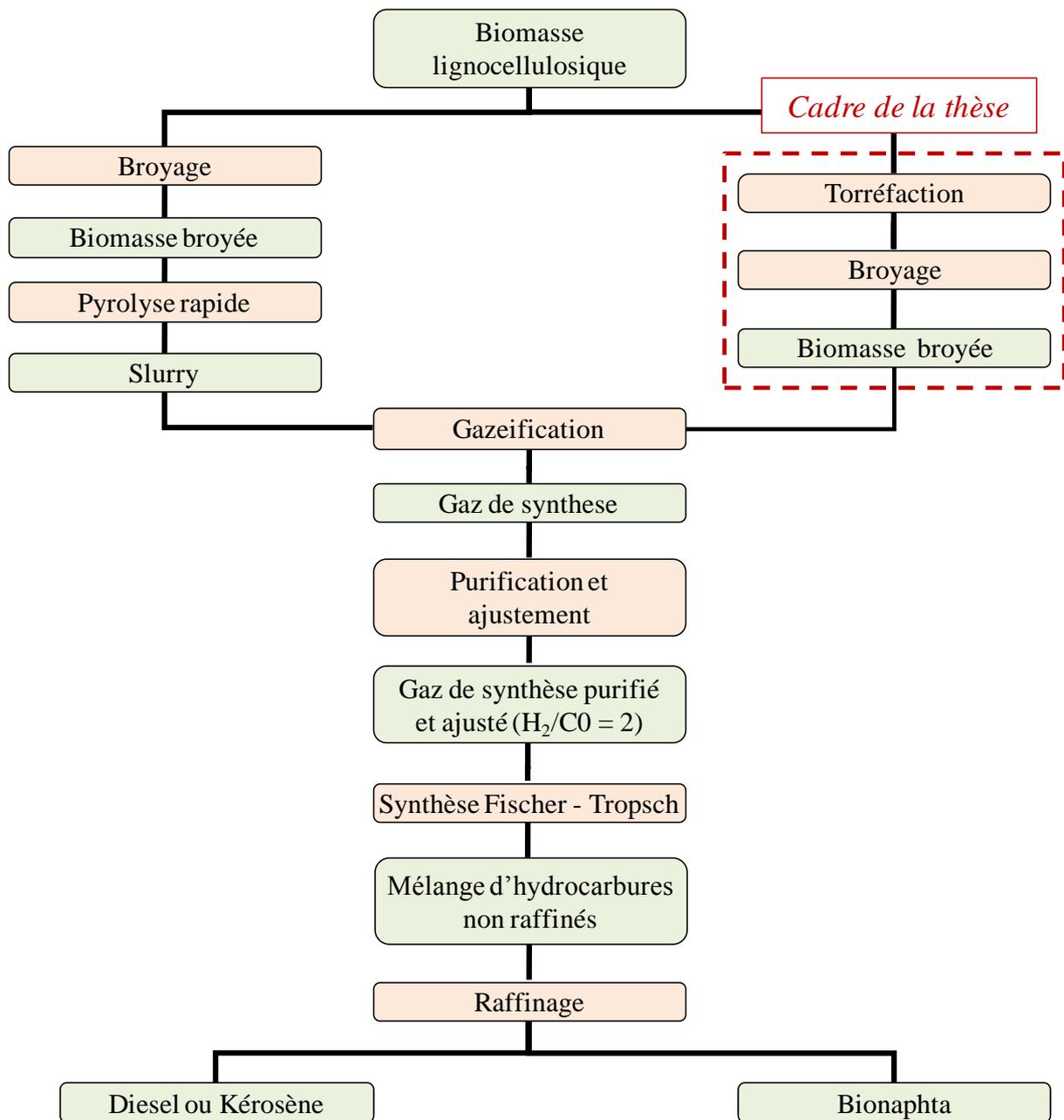


Figure I-3. Les différents procédés de production de gazole de seconde génération par voie thermochimique (d'après Departe, 2010).

1.4. LIMITES, FAISABILITE ET INCERTITUDES DES BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION

A l'heure actuelle les biocarburants de seconde génération sont encore au stade de la recherche et leur production commerciale n'est pas attendue avant l'horizon 2020. Un travail de recherche important est actuellement fourni pour lever les derniers verrous technologiques et des pilotes industriels sont en voie de construction. Cette étape est

indispensable avant une production commerciale. Lancé en 2010 le projet BioTfuel vise ainsi à développer une chaîne de production de biocarburants de 2^{ème} génération de type gazole et kérosène. Il rassemble des organismes de R&D (IFP Energies nouvelles et le CEA) et des industriels (Axens, Sofiprotéol, Total et Uhde). Un démonstrateur BtL (« Biomass to Liquid ») de production de biocarburants de 2^{ème} génération est également en développement sur le site de Bure-Saudron (Meuse). En phase d'étude depuis plusieurs années, son exploitation est annoncée sur 20 ans à partir de 2015.

Cependant, malgré un développement encore peu important, certaines études soulèvent déjà les premières limites à une utilisation massive des biocarburants de seconde génération. Les technologies, encore éloignées du stade commercial, rendent les coûts de production élevés. Associée à une concurrence accrue entre les différentes filières de valorisation de la matière ligno-cellulosique des plantes (industries papetière, industries de la trituration...), l'utilisation des biocarburants de seconde génération est peu viable à l'heure actuelle sur un plan économique. Les limites ne sont pas qu'économiques puisque, sur un plan environnemental, des doutes émergent. Même si sur un plan « bilan carbone » l'utilisation de ce type de biocarburants est a priori bonne, d'un point de vue « biodiversité » les premiers bilans semblent en revanche plutôt mitigés. En effet, une utilisation incontrôlée de ce type de carburants entraînerait des prélèvements forestiers bien trop importants qui influenceraient considérablement la typologie des sols et de la biodiversité forestière. Cacot et al. (2006) ont réalisé une étude basée sur l'analyse des chantiers bois énergie en France et proposent des techniques sylvicoles simples intégrant la récolte des rémanents destinés à la filière bois énergie et qui s'inscrivent dans le cadre d'une gestion durable de la forêt. A partir de critères simples de terrain, ces auteurs évaluent ainsi la sensibilité des sols à la récolte de rémanents et proposent des moyens techniques à mettre en œuvre lors de la récolte pour préserver la fertilité des sols.

2. Le matériau bois

Le bois est un matériau d'origine biologique, il est donc très variable et ses propriétés sont différentes selon les espèces et à l'intérieur même d'un même arbre. Globalement, le bois présente trois grandes caractéristiques. C'est un matériau orthotrope anisotrope, hygroscopique et poreux dont la structure et l'anatomie est propre à chacune des espèces. La partie qui suit entend montrer les relations pouvant exister entre ces caractéristiques. Il est notamment intéressant de s'attarder sur les relations existantes entre les différentes étapes de sa formation ainsi qu'entre sa structure finale et ses propriétés d'usage.

2.1. DE L'ARBRE A LA MOLECULE

2.1.1. Structure anatomique

Le bois est un ensemble de tissus à parois lignifiées. Sur l'arbre vivant il remplit de nombreuses fonctions allant de la conduction de la sève jusqu'au soutien mécanique en passant par le stockage, la restitution, l'élaboration et la transformation chimique de substances. Les arbres grandissent et le bois se forme par divisions et différenciation de cellules nouvelles. Les cellules dites méristématiques forment des tissus (méristème) que l'on retrouve dans l'arbre sous deux formes. Les premiers sont les méristèmes apicaux situés à l'extrémité des racines et dans les bourgeons de la tige et des rameaux. Ils sont responsables de la croissance en hauteur de l'arbre et par différenciation des cellules méristématiques, seront à l'origine de l'épiderme, du xylème primaire et du phloème primaire. Les seconds sont des méristèmes latéraux formant de minces manchons de cellules que l'on retrouve sur toute la longueur de la tige, des rameaux ou des racines. Il existe deux types de méristèmes latéraux, l'assise subéro-phellodermique située sous l'écorce responsable de la formation de tissus protecteurs (liège et phelloderme) et le cambium responsable de la formation des tissus ligneux.

Dans les régions tempérées le cambium cesse de fonctionner en hiver, il reprend son fonctionnement lors de la reprise de l'activité de végétation en mettant en place une nouvelle couche de cellules distincte de la couche précédente. Ces couches successives sont appelées « cernes annuelles ». Pendant la même année, les saisons influencent l'activité cambiale de telle sorte qu'il est possible de distinguer plus ou moins nettement le bois formé au printemps (bois initial) de celui formé pendant l'été (bois final). La largeur de cerne n'est pas constante dans un même arbre, elle varie en fonction des conditions de croissance d'une année à l'autre, de la nature des sols, de l'espèce, de la position dans l'arbre... Pour les conifères par exemple, plus les largeurs de cernes sont faibles, plus le bois est dense.

Après quelques années de fonctionnement, le parenchyme mis en place par le cambium meurt. Le bois se transforme pour former le duramen, c'est le processus de duraminisation. Lorsque celui-ci est coloré il se distingue parfaitement du bois encore vivant appelé aubier, on parle alors de duramen. Si la distinction n'est pas évidente on parle de bois parfait. Cependant, la dénomination duramen est très souvent utilisée dans les deux cas.

Le bois est un matériau orthotrope, ses propriétés sont communément étudiées sur trois plans perpendiculaires les uns aux autres, appelés plans ligneux. Ils correspondent aux trois directions d'anisotropie (figure I-4) :

- la direction longitudinale (L) parallèle au sens des fibres,
- la direction tangentielle (T) tangente aux cernes,
- la direction radiale (R) orientée de la moelle à l'écorce et qui suit le sens des rayons ligneux.

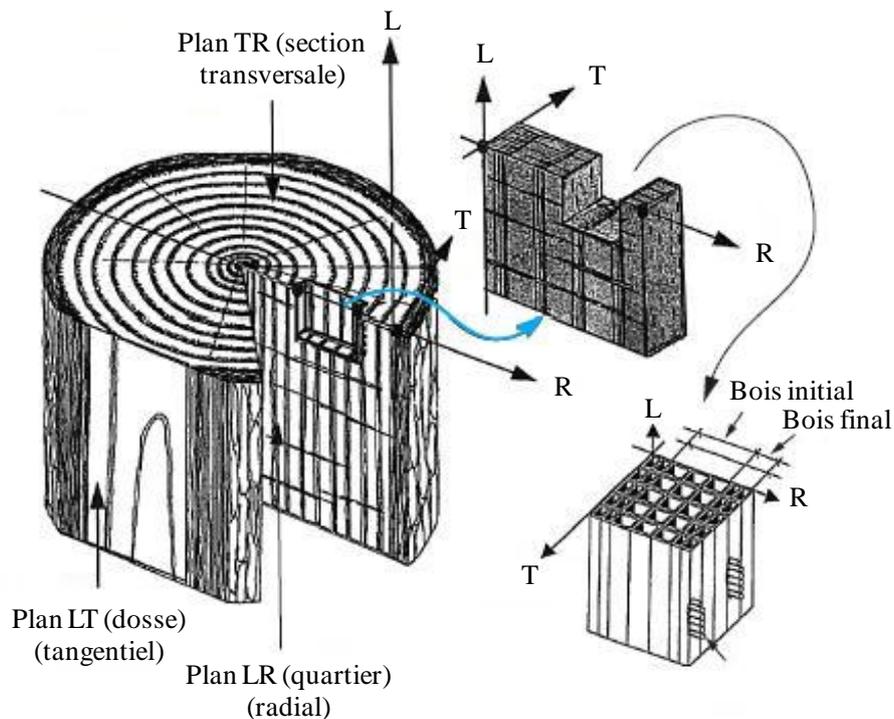


Figure I-4. Les trois plans d'orthotropie du matériau bois à différentes échelles (d'après Trouy-Triboulot et Triboulot, 2001).

L'anatomie des gymnospermes (appelé ici communément conifères) est différente de celle des angiospermes dicotylédones (feuillus). Elle est plus complexe pour ces derniers car les feuillus sont des espèces botaniques plus évoluées aux cellules plus spécialisées.

2.1.1.1. Les conifères

Les conifères présentent une organisation simple, uniforme et régulière. Le bois est composé de trachéides et de rayons ligneux, on retrouve également parfois des trachéides axiales, des canaux résinifères et du parenchyme axial.

- **Les trachéides axiales et radiales**

Les trachéides axiales (ou longitudinales) constituent environ 90% de la masse ligneuse et forment les tissus conducteurs de sève brute et ceux de soutien. Ce sont des cellules fusiformes, longues et fines de section carrée ou rectangulaire. Elles sont disposées en files et raccordées les unes aux autres par leurs extrémités effilées. Les trachéides communiquent entre elles par des ponctuations aréolées et avec les rayons ligneux par des ponctuations semi-aréolées (ponctuation de champ de croisement).

Les trachéides formées au printemps ont un aspect différent de celles formées pendant l'été. Le printemps est le début de la saison de végétation de l'arbre associé notamment à une grande circulation de sève. Les trachéides alors formées présentent une grande cavité (lumen) et des parois minces. En fin de saison de végétation les trachéides deviennent plus adaptées au rôle de soutien, les cellules ont alors une section plus petite et des parois plus épaisses. Le bois des conifères sont donc hétérogènes et présentent une limite de cerne nette.

Chez certaines espèces comme le mélèze (*Larix decidua*), l'épicéa commun (*Picea abies*) ou encore le pin maritime (*Pinus pinaster*) il est possible de trouver des trachéides radiales (ou transversales). Elles permettent le transport des substances nutritives dans le sens radial et communiquent avec les trachéides axiales par des ponctuations aréolées.

- **Les rayons ligneux**

Les rayons ligneux sont composés de cellules parenchymateuses allongées dans le sens radial sur une hauteur de un ou plusieurs étages de cellules. Si les rayons ligneux contiennent en plus des trachéides radiales ou des canaux résinifères radiaux, ils sont dits hétérogènes. Ils ont un rôle de conduction radiale et d'accumulation de réserves.

- **Les canaux résinifères**

Les canaux résinifères sont constitués de cellules sécrétrices. Leur organisation en cercle délimite le canal dans lequel s'écoule la résine produite. Les canaux résinifères ne sont pas présents chez tous les conifères mais leur présence est souvent le premier critère de reconnaissance des bois de conifère. C'est le cas chez les *Pinus*, *Larix* ou encore *Pseudotsuga*. Des canaux résinifères peuvent être également mis en place par l'arbre en réponse à un traumatisme, on parle alors de canaux résinifères traumatiques.

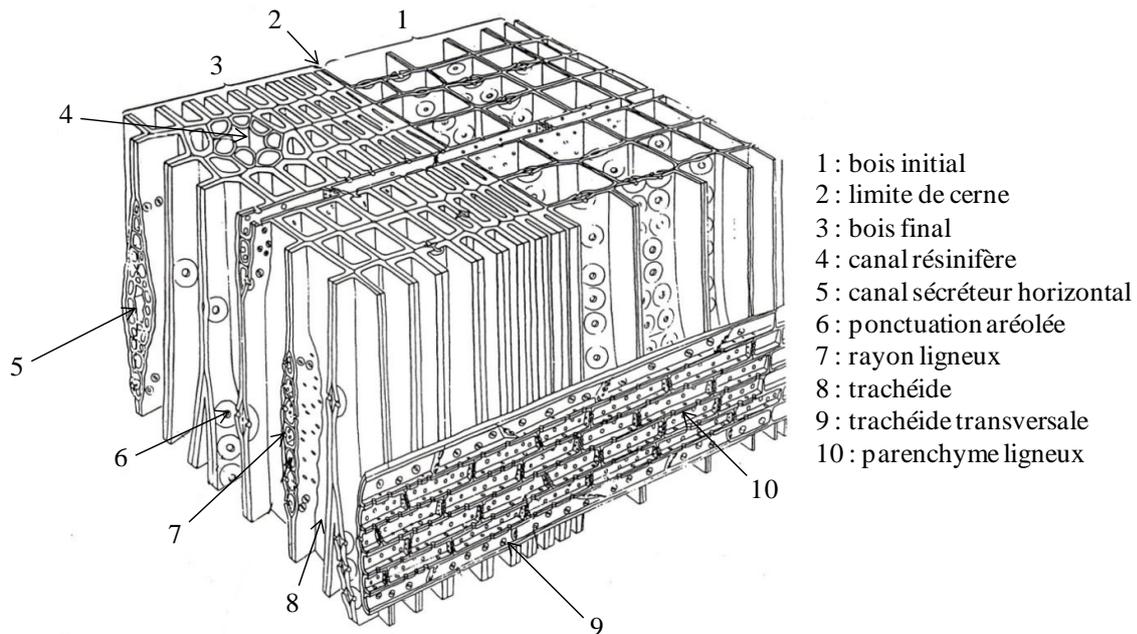


Figure I-5. Exemple d'organisation cellulaire d'un bois de conifère (Triboulot, 2005).

2.1.1.2. Les feuillus

La structure du bois des feuillus est plus complexe et plus évoluée que chez les conifères. Alors que chez ces derniers les trachéides remplissent la double fonction de soutien et de conduction, chez les feuillus ce sont des cellules différentes qui remplissent ces deux fonctions : les fibres ligneuses et les vaisseaux. A ces éléments s'ajoutent les rayons ligneux et le parenchyme. Il est aussi possible de trouver des fibres trachéides, des trachéides vasculaires, juxtavasculaires ou vasicentriques.

- **Les vaisseaux**

Les vaisseaux sont de longues files de cellules reliées bout à bout qui permettent la conduction de la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles. Celle-ci circule d'une cellule à l'autre à travers des perforations simples ou multiples, elle peut également circuler vers le parenchyme et les vaisseaux voisins via des ponctuations semi-aréolées ou aréolées. En section transversale, la disposition, le regroupement et la taille des vaisseaux constituent les premiers critères importants de reconnaissance des espèces.

Il est en effet possible de distinguer plusieurs typologies :

- les feuillus à zone initiale poreuse (ZIP), comme le chêne (*Quercus spp.*) par exemple, où les vaisseaux sont nombreux et gros dans le bois initial et rares et petits dans le bois final,
- les espèces homogènes (dites à pores diffus), comme le hêtre (*Fagus spp.*) par exemple, où les vaisseaux sont répartis de manière homogène dans l'ensemble du cerne,
- les espèces à zone initiale semi poreuse (ZISP), comme le merisier (*Prunus avium*), où il y a une répartition des vaisseaux intermédiaire aux deux systèmes décrits précédemment.

Chez certaines espèces, des thylles apparaissent lors du processus de duraminisation (chêne, châtaigner...). Ils peuvent altérer l'imprégnation, le collage, le séchage du bois mais sont en revanche tout à fait recherchés dans la fabrication de merrains. A la suite de traumatismes (blessure, attaque de champignons...), des thylles peuvent également apparaître chez certaines espèces qui normalement n'en présentent pas.

- **Les fibres ligneuses**

Egalement appelées fibres simpliciponctuées, les fibres ligneuses sont des éléments allongés, effilés à lumen réduit. Les cellules sont mortes et vides avec peu de ponctuations simples, elles jouent surtout un rôle de soutien et agissent sur la densité et la résistance mécanique du bois.

Les rayons ligneux sont constitués de cellules parenchymateuses vivantes dans l'aubier ayant un rôle de réserve. Ils peuvent être constitués de plusieurs cellules et visibles à l'œil nu en coupe transversale et longitudinale. On dit alors qu'ils sont plurisériés. Mais ils peuvent aussi être étroits, larges d'une seule file de cellules, ils sont alors dits unisériés.

- **Le parenchyme longitudinal**

Tout comme le parenchyme radial (rayons ligneux), le parenchyme longitudinal a pour rôle d'emmagasiner, de restituer et de transformer des réserves. Il peut être disposé indépendamment des vaisseaux, il est alors dit apotrachéal, ou associé à ces derniers, il est alors dit paratrachéal. Tout comme les rayons ligneux, il est constitué de cellules vivantes dans l'aubier.

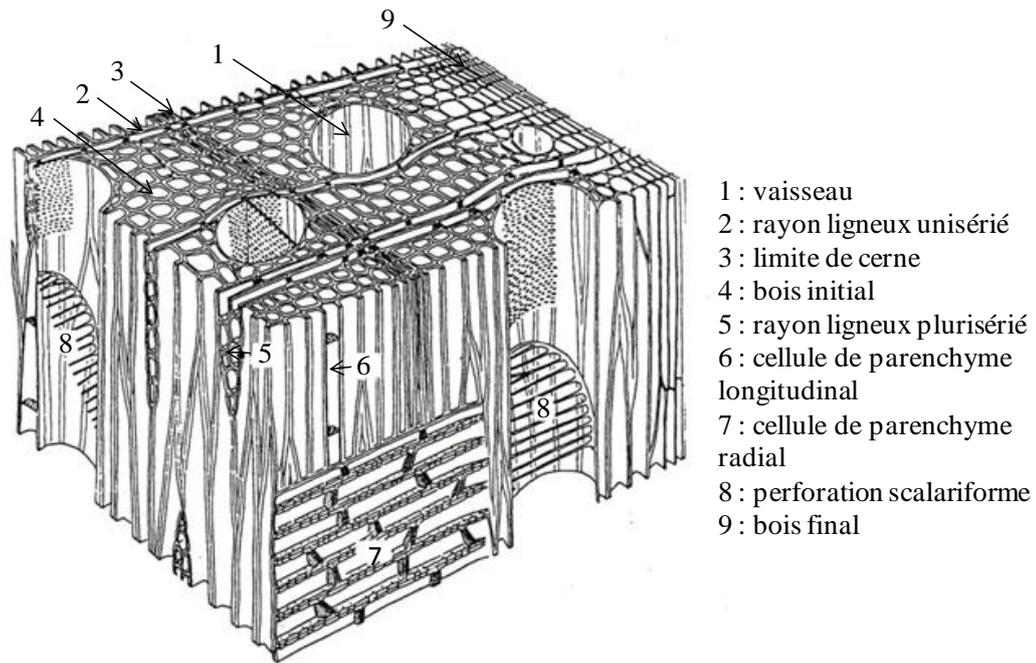


Figure I-6. Exemple d'organisation cellulaire d'un bois feuillu (Triboulot, 2005).

2.1.2. Structure de la paroi cellulaire

Les parois de cellules du bois sont constituées de trois parties qui s'appliquent les unes contre les autres. On distingue une couche intercellulaire, une paroi primaire et une paroi secondaire, elle-même divisée en trois sous-couches (figure I-7).

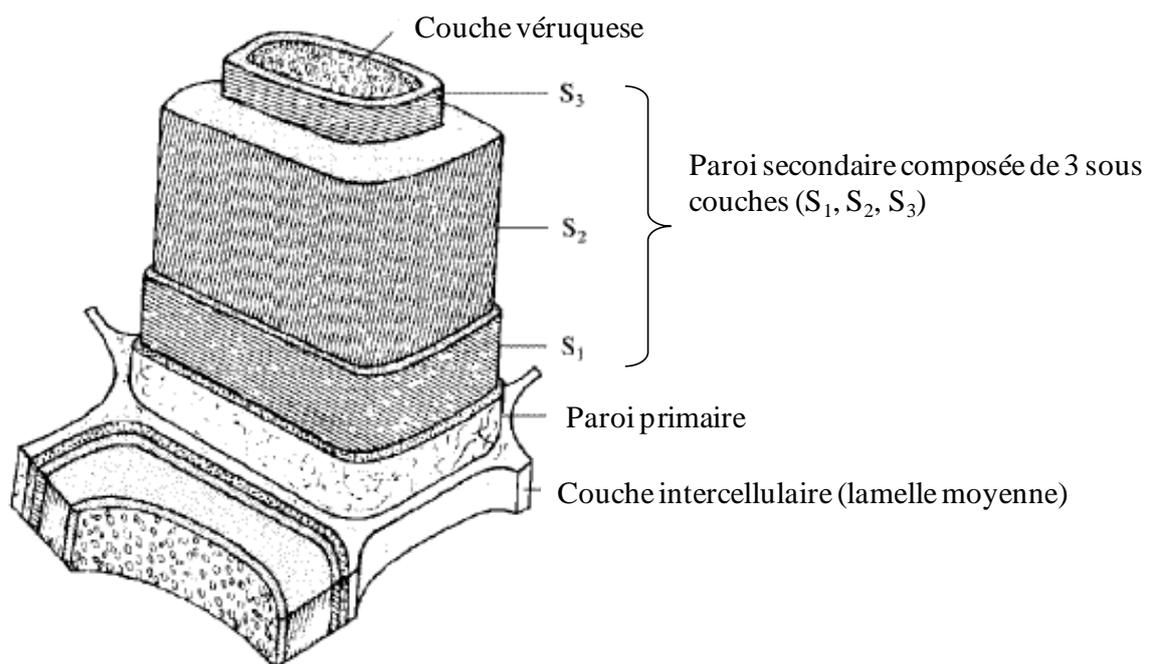


Figure I-7. Représentation des couches constituant la paroi cellulaire (Core, 1979).

2.1.2.1. La couche intercellulaire

C'est une couche qui réunit les cellules les unes aux autres donnant en microscopie électronique une image homogène des cellules. Principalement constituée de substances pectiques, son épaisseur varie entre 0,5 et 1,5 μm et semble être plus mince dans le bois initial que le bois final.

2.1.2.2. La paroi primaire

Elle est constituée de couches de microfibrilles de cellulose enchevêtrées dans lesquelles se sont déposées de la lignine, des substances pectiques et des hémicelluloses au cours de la différenciation cellulaire. Les microfibrilles sont peu concentrées et orientées de manière aléatoire. L'épaisseur de la paroi primaire est de l'ordre de 0,1 μm .

2.1.2.3. La paroi secondaire

La paroi secondaire est déposée sur la paroi primaire une fois que la cellule a atteint sa taille définitive. Composée essentiellement de microfibrilles de cellulose à l'orientation variable, sa structure dense et rigide ainsi que son volume en font la partie de la cellule la plus résistante mécaniquement. L'angle des microfibrilles de cellulose agit sur les propriétés physico-mécaniques du bois. Elle présente une structure en sous couches :

- **La couche externe S1**

Elle représente entre 5 et 10% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire. La structure générale de cette couche est lamellaire et son épaisseur varie entre 0,1 et 0,35 μm . Les microfibrilles de cellulose constituant cette couche y sont disposées en hélices d'orientation variable et alternée (type S ou Z) conférant à la couche S1 une forte résistance à la traction transversale et un retrait se faisant presque uniquement dans le sens longitudinal.

- **La couche externe S2**

C'est la partie la plus volumineuse de la paroi puisque son épaisseur varie entre 1 et 10 μm ce qui représente entre 75 et 85% de l'épaisseur totale de la paroi. Cette couche est formée d'une organisation dense de lamelles de microfibrilles de cellulose, en hélice parallèles, dont l'angle dans le bois normal par rapport à l'axe de la cellule est en moyenne de 10°. Le nombre de ces lamelles est variable et dépend de l'épaisseur de la couche et donc de la localisation de la cellule dans l'accroissement annuel.

- **La couche externe S3**

Cette couche est relativement mince puisque son épaisseur varie entre 0,5 et 1,1 μm . Elle est également constituée de microlamelles où les microfibrilles y sont moins parallèles avec un angle élevé.

2.1.3. Composition biochimique

Le bois est un composite de polymères naturels dont la formule chimique globale est $\text{CH}_{1.44}\text{O}_{0.66}$. Il est possible d'y distinguer deux grands groupes de constituants :

- les substances macromoléculaires : ce sont essentiellement les composants des parois cellulaires (cellulose, hémicellulose, et lignines). Elles représentent environ 98% du matériau,
- les substances de faibles poids moléculaires notamment constituées des extraits et substances minérales. Elles représentent environ 2% du matériau.

Ces substances varient en quantité entre un bois de feuillus et de conifère. Le bois de conifère possède davantage de lignines alors qu'il est moins riche en carbohydrates et composés extractibles.

Tableau I-1. Répartition moyenne (% massique) des composants chimiques du bois de conifère et de feuillus (Sjöström, 1993).

	Conifère	Feuillus
Cellulose	42 (+/- 2)	45 (+/- 2)
Hémicellulose	27 (+/- 2)	30 (+/- 5)
Lignines	28 (+/- 3)	20 (+/- 4)
Extractibles	3 (+/- 2)	5 (+/-4)

Les propriétés physiques et mécaniques du bois sont directement dépendantes de ses propriétés chimiques. Il apparaît donc essentiel de les évaluer afin de pouvoir analyser au mieux les modifications physico-mécaniques du bois lors notamment des processus de transformation.

2.1.3.1. La cellulose

La cellulose est le principal constituant du bois, elle représente entre 40 et 45% de sa masse anhydre. Elle est considérée comme le constituant le plus stable chimiquement et

Chapitre 1

thermiquement et joue un rôle fondamental dans la tenue mécanique des parois cellulaires des éléments anatomiques du bois.

La cellulose est un homopolymère semi-cristallin (figure I-8) dont la structure de base est le cellobiose formé de l'association par déshydratation de deux molécules de glucose (ou β -D-Glucopyranose). Les molécules de cellobiose sont reliées entre elles par des liaisons glucosidiques en 1 \rightarrow 4. Le degré de polymérisation, donné par le nombre de répétition du motif élémentaire de glucose, est de 15000 environ. Il est important de noter qu'il n'est pas constant au sein du monde végétal et peut considérablement varier d'une espèce à l'autre.

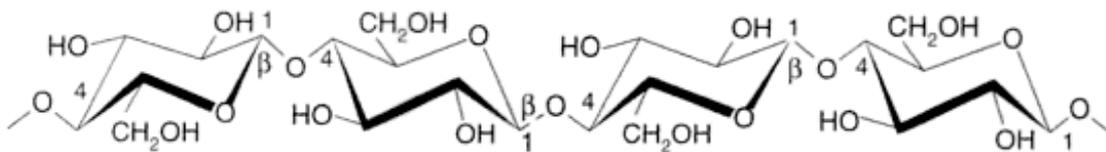


Figure I-8. Formule de la cellulose (Sjöström, 1993).

Les groupements hydroxyles présents sur la chaîne permettent la formation de liaisons hydrogènes intermoléculaires à l'origine d'une organisation de la cellulose en microfibrilles. Ces liaisons peuvent être aléatoires et irrégulières ou parfaitement ordonnées. On distingue alors des régions dites amorphes, constituées d'un empilement hélicoïdal des chaînes de cellulose, et des régions dites cristallines, rigides et hydrophobes, correspondant à un empilement des chaînes macromoléculaires orientées préférentiellement dans la direction axiale (figure I-9). De par leur faible accessibilité, les régions cristallines sont moins réactives aux molécules extérieures.

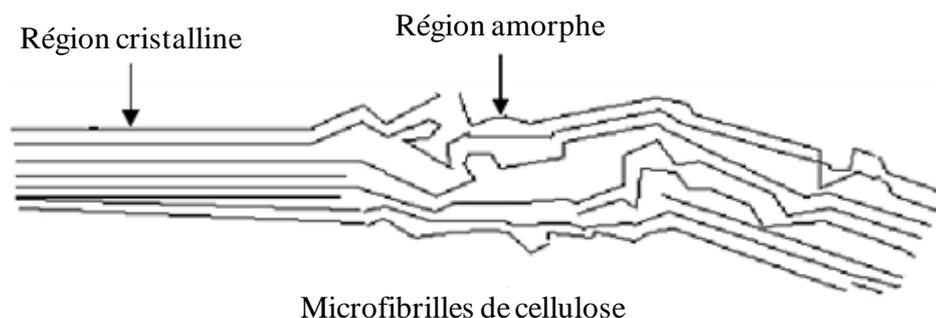


Figure I-9. Morphologie des microfibrilles constituant les fibres de cellulose (Satge, 2002).

Des liaisons hydrogène intramoléculaires sont également observables entre les molécules de cellulose et d'hémicellulose. L'association de ses deux constituants forme l'holocellulose.

En dehors de la cellulose, il existe d'autres polysaccharides contenant des unités de glucose. C'est le cas notamment de l'amidon et de la callose.

2.1.3.2. Les hémicelluloses

Etroitement liées à la cellulose, les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides présents dans la paroi cellulaire du bois. Ce sont des polymères amorphes à chaînes plus courtes que la cellulose. Le degré de polymérisation (DP) est d'environ 15000 pour la cellulose alors qu'il est seulement compris entre 50 et 300 pour les hémicelluloses. A cause notamment du grand nombre de régions amorphes au sein de ces molécules, les hémicelluloses sont des composés fortement hydrophiles les rendant en grande partie responsables des variations dimensionnelles du bois. Ils représentent entre 25 et 30% de la masse anhydre du bois.

Il existe différents groupes d'hémicelluloses : les xylanes, les mananes, les glucanes et les galactanes. La composition des hémicelluloses est différente pour les feuillus et les conifères.

- **Hémicelluloses des conifères**

Les galactoglucomananes (environ 20% en masse) sont des chaînes linéaires peu ramifiées formées par des liaisons entre le carbone 1 et 4 d'unités β -D-Glucopyranose (glucose) et d'unités β -D-Mannopyranose (manose). Des unités de α -D-Galactopyranose (galactose) sont fixées sur ces chaînes par des liaisons (1 \rightarrow 6) tandis que des groupements acétyls sont distribués également sur les atomes C₂ et C₃ des unités mannose. Le rapport des unités mannose-glucose est d'environ 3/1 et ces unités sont distribuées au hasard dans la chaîne. La proportion d'unités galactoses est quant à elle assez variable. Elle est plus importante dans les mananes extraits à l'eau que dans ceux extraits en milieu alcalin. Les galactoglucomananes pauvres en galactose sont parfois appelés glucomananes.

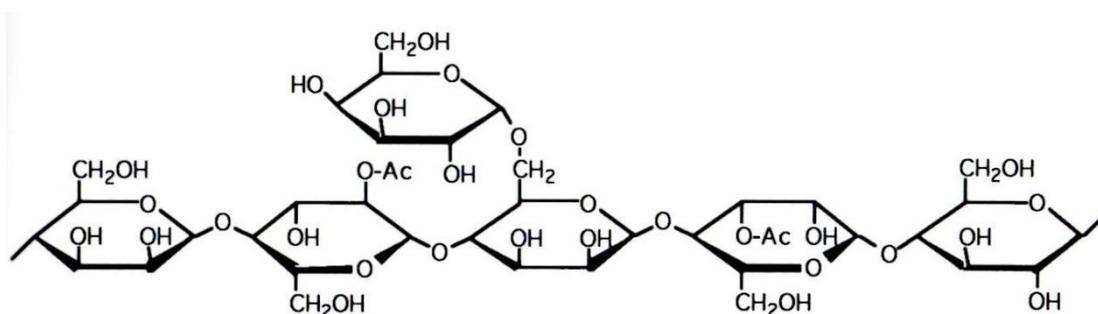


Figure I-10. Structure chimique partielle d'un galactoglucomanane de conifère (Navi et Heger, 2005).

Les arabinoglucuronoxylanes (5 à 10%) sont constitués de chaînes de (1 \rightarrow 4) β -D-Xylopyranose (xylose) dont les unités sont partiellement substituées au carbone 2 par l'acide 4-O-Méthylglucuronique. La proportion de ces unités est de l'ordre de 2 pour 10 unités xylose. Des unités d' α -L-Arabinofuranose se substituent également sur le carbone 3 des unités xyloses dans les proportions d'environ 1,3 unité pour 10 unités de xylose.

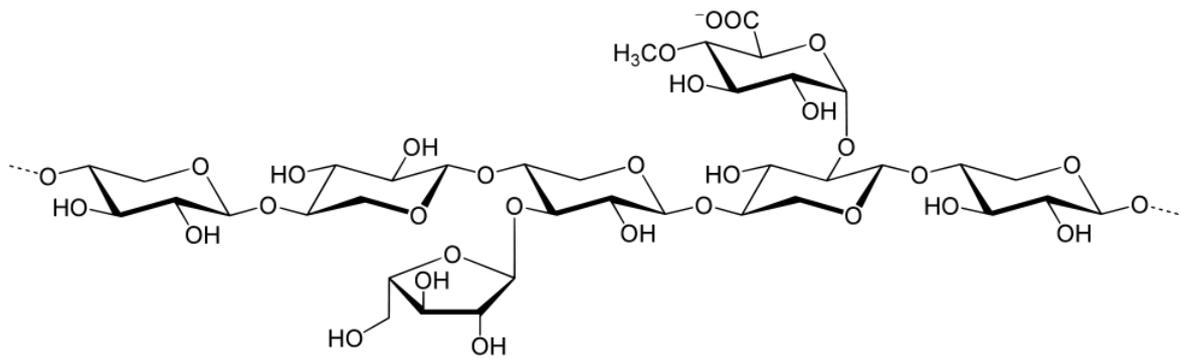


Figure I-11. Structure chimique partielle d'un arabinoglucuronoxylane chez les conifères.

Les arabinogalactanes sont des constituants mineurs puisqu'ils ne sont présents qu'en quantité variant de 0,5 à 3%. La seule exception est le mélèze (*Larix* spp.) où on les retrouve en quantité abondante (10 à 25%). Ils sont constitués de chaînes de β -D-Galactopyranose reliées entre le carbone 1 et 3, les unités étant elles-mêmes ramifiées au carbone 6 par des unités galactose, arabinose ou acide galacturonique.

- **Hémicelluloses des feuillus**

Les glucuronoxylanes (15 à 30%) sont constitués de chaînes de (1 \rightarrow 4) β -D-Xylopyranose plus longues que chez les conifères. Ces chaînes sont substituées sur le carbone 2 par de l'acide 4-O-méthylglucuronique à raison de 1 unité pour 10 de xylose tandis que des groupes O-acétyl se substituent sur les carbones 2 et 3 à raison de 7 pour 10.

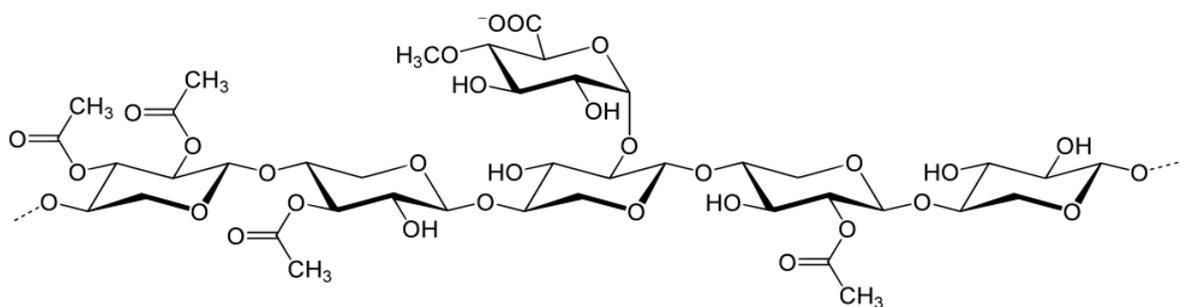


Figure I-12. Structure chimique partielle d'un glucuronoxylane chez les feuillus.

Les glucomananes sont très peu abondantes chez les feuillus. Comme pour les conifères, elles sont composées d'une chaîne principale linéaire hétérogène d'unités β -D-Glucopyranose et β -D-Mannopyranose reliées en (1 \rightarrow 4). Le rapport glucose/mannose varie de 1/2 à 1/1.

2.1.3.3. Les lignines

Les lignines sont des polymères amorphes répétitifs formant un réseau tridimensionnel constitué d'unités p-hydroxyphényles (H), guaiacyles (G) et syringyles (S), issues de la

polymérisation des alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique (figure I-13). Ces unités sont liées entre elles par des liaisons faibles β -O-4 impliquant surtout les unités S et des liaisons plus résistantes comme les liaisons biphenyles impliquant les unités G et H. Les lignines sont liées aux polysaccharides du bois par des liaisons covalentes.

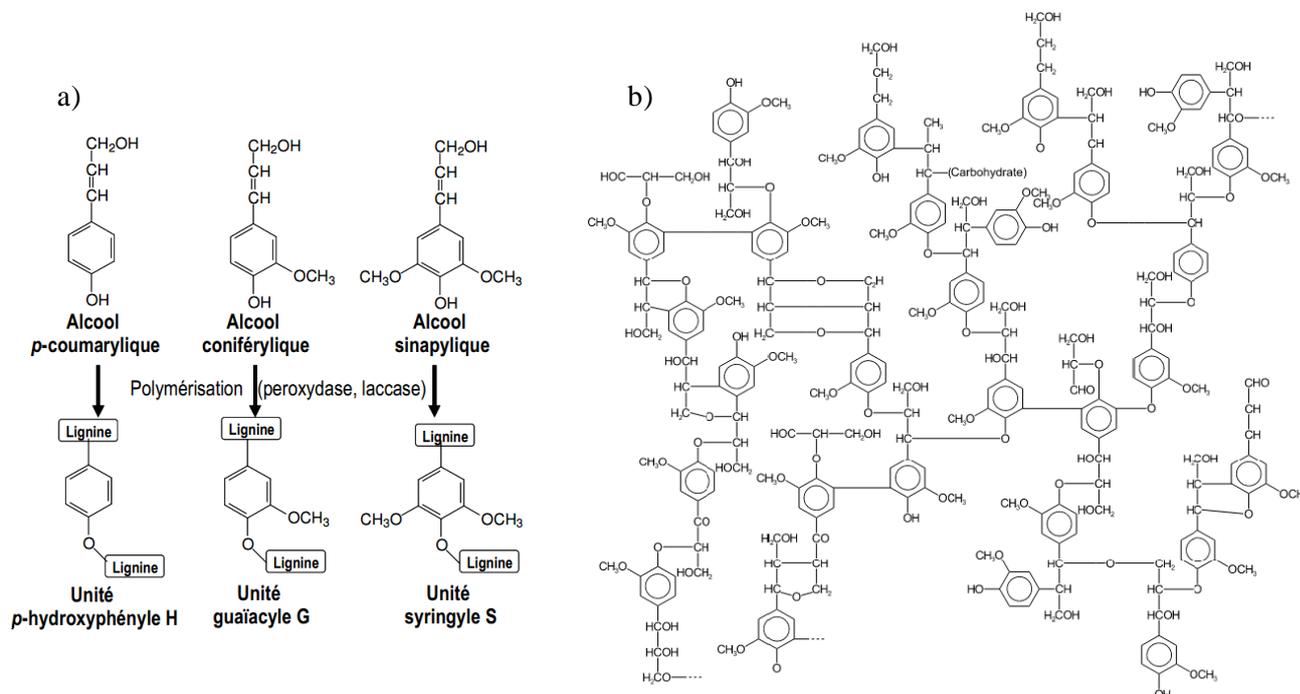


Figure I-13. Représentation simplifiée des 3 unités de base des lignines et de leurs précurseurs (a); structure possible d'une lignine (b) (d'après Lapiere, 2010).

La quantité et la nature des lignines sont très variables d'une essence à l'autre. Les feuillus en contiennent entre 18 et 25% alors que les conifères en contiennent entre 25 et 35%. Les lignines des conifères contiennent essentiellement des unités guaiacyles alors que celles des feuillus contiennent surtout des unités guaiacyles et syringyles. Au sein d'une même espèce, la quantité et la nature des lignines diffèrent également. Il est également important de noter que les unités de lignine se comportent différemment sous l'action de la chaleur (cf § 3.3.2).

La lignine, présente dans les parois, accroît la résistance mécanique du bois, sa stabilité thermique et diminue son hygroscopicité.

2.1.3.4. Les extractibles

Les extractibles regroupent différents composés pouvant être extraits du bois par divers procédés. Les extractibles sont classés en fonction du type d'extraction. Le tableau I-2 résume cette classification (Navi et Heger, 2005).

Les extractibles ne font pas partie de la paroi cellulaire et ne contribuent pas aux propriétés mécaniques. Ils peuvent par contre pigmenter le bois parfait et le protéger contre les

attaques de champignons et d'insectes. Dans certains cas ils sont toxiques, dans d'autres cas ils peuvent modifier l'hygroscopicité du bois en le rendant plus hydrophobe.

Tableau I-2. Classification des extractibles selon le type d'extraction.

Types d'extraction	Composés
Distillation à la vapeur	Terpènes, phénols, hydrocarbures, lignanes
Extraction à l'éther	Acides gras, graisses, cires, résines, acides résineux, stérols
Extraction à l'alcool	Matières colorantes, phlobaphènes, tanins, stilbènes
Extraction à l'eau	Hydrates de carbone, protéines, alcanoïdes, matières inorganiques (cations : Ca^+ , K^+ , Mg^+ , Na^+ , Fe^{2+} ; anions : NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-})

2.2. LES PROPRIETES MECANIQUES

De par ses diverses formes d'utilisation (meubles, charpente, coffrage...) le bois est soumis à de nombreuses et diverses sollicitations (traction, cisaillement, compression, flexion). Cela crée des tensions à l'intérieur du matériau qui peuvent aller jusqu'à sa rupture. De manière générale, la résistance mécanique du bois dépend de ses propriétés physiques et mécaniques mais aussi des efforts qui lui sont imposés, du dimensionnement des pièces et des conditions environnementales dans lequel la structure se trouve. Il apparaît donc nécessaire d'évaluer par des expérimentations en laboratoire les propriétés mécaniques du matériau afin d'optimiser son utilisation. Des essais peuvent alors être réalisés sur des éprouvettes, des maquettes ou même sur des structures à l'échelle 1.

A l'échelle de l'éprouvette, le matériau peut être testé en traction, flexion, cisaillement ou compression. Lors d'un essai de traction l'éprouvette est soumise à une force de traction dans la direction d'anisotropie testée. Dans ce type d'essai, lorsque la limite élastique est atteinte, il y a rupture de l'éprouvette sans passage par une phase plastique. Le comportement du bois est alors dit fragile. En flexion, l'éprouvette est positionnée horizontalement sur deux appuis et est soumise à mi-longueur à une force verticale orientée vers le bas. Sous l'effet simultané d'une compression de la partie supérieure et d'un allongement par traction des fibres de la partie inférieure l'éprouvette fléchit. Les forces de traction et compression agissant simultanément cela provoque le glissement des fibres les unes par rapport aux autres et donc des phénomènes de cisaillement. Les essais en compression (dynamique et quasi-statique) constituant le cœur de ce travail sont décrits plus en détail dans les paragraphes suivants.

2.2.1. Essais quasi-statiques

2.2.1.1. Généralités

Quel que soit le type d'effort appliqué au matériau il subit une déformation relative qui, de manière générale, évolue de la façon suivante :

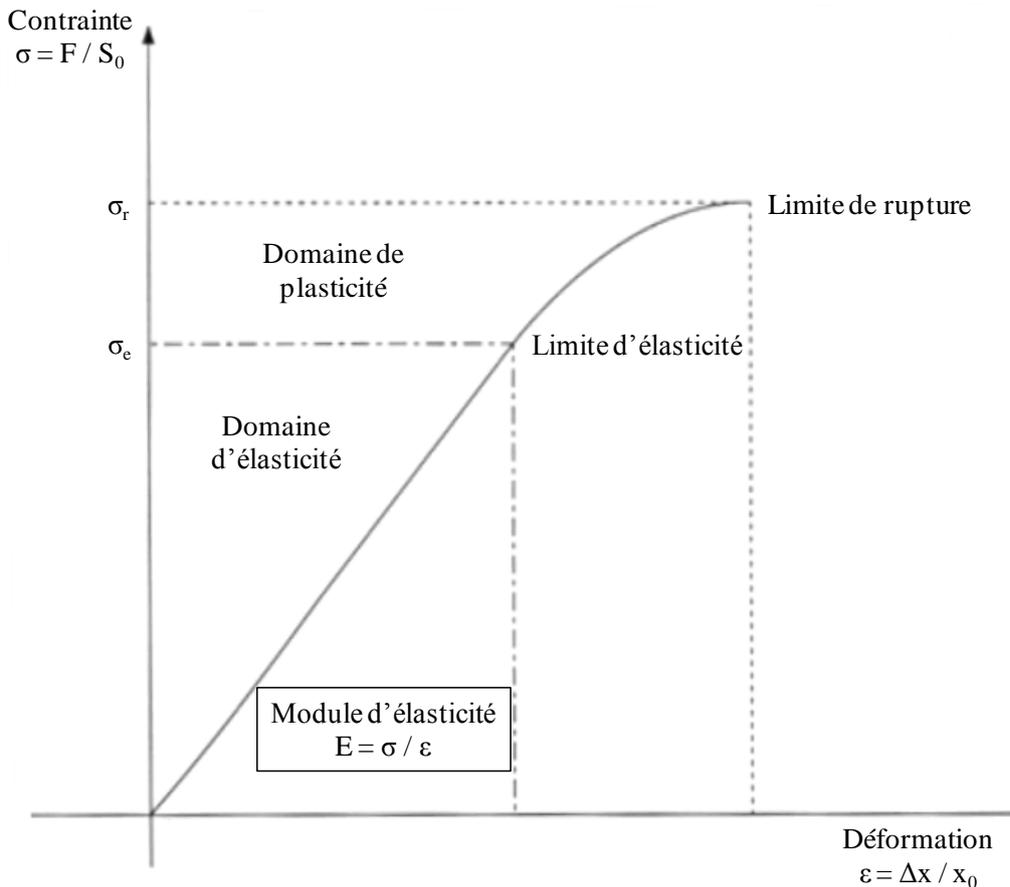


Figure I-14. Comportement des matériaux soumis à des efforts de traction, de compression ou autre : évolution de la contrainte en fonction de la déformation relative.

- **Le domaine élastique**

Jusqu'à une contrainte limite propre à chaque matériau, dite limite d'élasticité, la relation entre la déformation relative ε (en %) et la contrainte σ est linéaire et réversible : c'est la phase élastique. Il existe alors une proportionnalité entre la contrainte subie par le matériau et la déformation qui en résulte (loi de Hooke). Le rapport entre ces deux grandeurs est appelé module d'élasticité ou module d'Young (E) :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Chapitre 1

A l'inverse, le rapport entre la déformation et la contrainte est appelé complaisance élastique.

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma}$$

Le caractère anisotrope du bois implique que les propriétés élastiques sont différentes dans les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T).

La déformation ε produite par une contrainte agissant dans une certaine direction s'accompagne d'une déformation ε' dans la direction perpendiculaire à la précédente. Par exemple, une pièce mécanique qui subit un effort de compression se rétrécit dans la direction de l'effort alors qu'elle s'allonge dans la direction perpendiculaire. C'est ce qu'on appelle l'effet Poisson. De manière générale, ε est positive si ε' est négative et inversement.

$$-\varepsilon' = \nu \times \varepsilon \text{ (où } \nu \text{ est le coefficient de Poisson, adimensionnel).}$$

A partir de ce coefficient et du module d'élasticité, le module de cisaillement G est défini :

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)}$$

Il est alors possible d'exprimer les grandeurs élastique dans le référentiel (R,T,L) à partir de l'ensemble de ces constantes matérielles indépendantes :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_{LR} \\ \varepsilon_{TR} \\ \varepsilon_{TL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LR}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{TR} \\ \sigma_{TL} \end{bmatrix}$$

avec E_L , E_R et E_T les modules d'Young dans les directions longitudinale, radiale et tangentielle ; ν_{RT} , ν_{TR} , ν_{TL} , ν_{LT} , ν_{LR} et ν_{RL} les coefficients de Poisson et G_{TR} , G_{TL} et G_{LR} les modules de cisaillement.

Il apparait alors les rapports d'anisotropie caractéristiques du matériau bois :

- $E_L \gg E_R$ (dans un rapport 10)
- $E_R > E_T$ (dans un rapport 2)
- $\nu_{RT} > \nu_{LT} > \nu_{LR} \approx \nu_{TR} \gg \nu_{RL} > \nu_{TL}$

et enfin pour les contraintes en cisaillement :

- $G_{LR} > G_{LT} \gg G_{TR}$.

• Le domaine plastique

Au-delà de la contrainte limite d'élasticité et jusqu'à la contrainte limite à la rupture le phénomène cesse d'être linéaire et réversible : c'est la phase plastique. Lorsqu'il y a relâchement de la contrainte dans cette phase, la déformation ne disparaît pas totalement et il subsiste une déformation résiduelle dite permanente ou plastique.

• La rupture

Le domaine plastique est limité par la contrainte de rupture. Lorsque l'élongation à rupture est peu différente de l'élongation à la limite d'élasticité, le matériau a un comportement fragile. Il est ductile si l'élongation à rupture est grande par rapport à l'élongation à la limite d'élasticité.

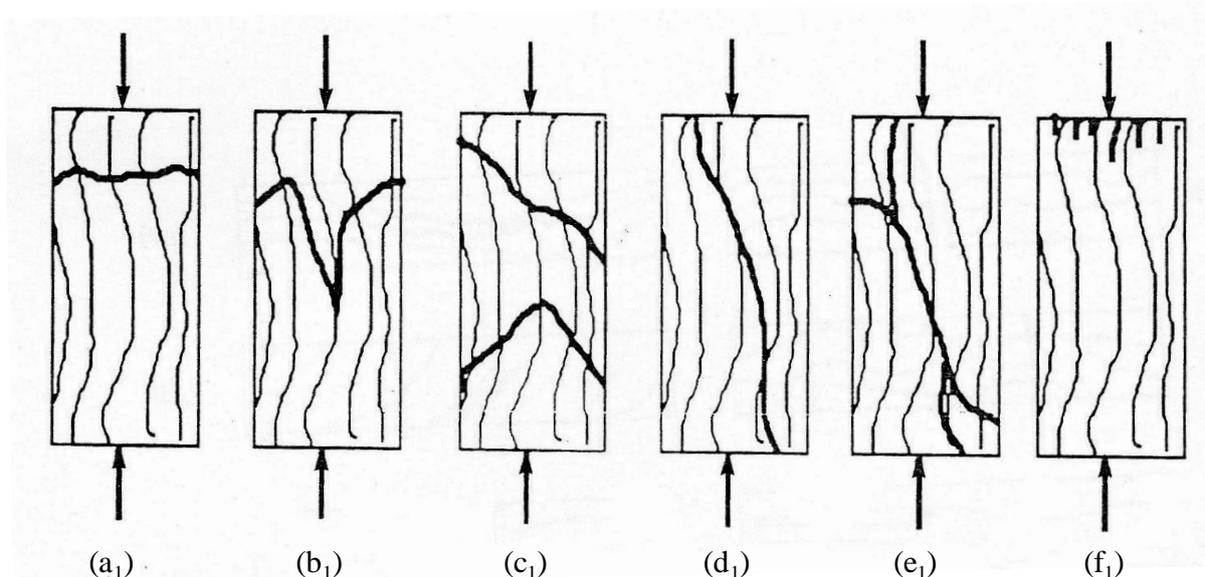


Figure I-15. Exemples de morphologie des faciès de rupture en compression du bois (Pluvinage, 1992).

En fonction du type de sollicitation et des zones de faiblesse du bois il existe différents modes de rupture de ce matériau (Pluvinage, 1992). En compression il existe ainsi la rupture

transverse par écrasement des fibres (a_1), le fendage en biseau (b_1), le fendage simple (c_1), le fendage et rupture transverse (d_1), le cisaillement associé à des plans de faiblesse (e_1) ou un simple écrasement des extrémités en raison souvent d'un taux d'humidité important (figure I-15).

Il est toutefois important de noter que la présence de faiblesses parfois localisées rend les faciès de rupture peu prévisibles et souvent complexes. Le faciès de rupture « e_1 » est ainsi un mélange des faciès de rupture « b_1 » et « d_1 ».

2.2.1.2. La compression

Dans les trois directions d'anisotropie, les courbes contrainte/déformation du bois sollicité en compression présentent la même tendance générale et se découpent en trois zones distinctes. Une zone élastique réversible (A), un plateau de densification (ou compression) (B) et une zone de densification au sens strict (C) (figure I-16). Globalement, le bois présente un comportement élasto-plastique. Cependant, l'organisation anatomique du bois, différente dans chacune des trois directions d'anisotropie, explique que les courbes contrainte / déformation présentent des caractéristiques différentes selon la direction de sollicitation (figure I-16). De manière générale, les travaux réalisés sur ce sujet montrent que le module d'élasticité longitudinal est plus important que les modules radial ou tangentiel qui sont quant à eux quasiment équivalents (Guitard, 1987). Le plateau de compression est aussi différent selon que le bois est comprimé dans le sens longitudinal d'une part ou dans le sens radial ou tangentiel d'autre part. En effet, bien qu'ayant une longueur équivalente (de 20 à 80% de déformation), les plateaux de compression tangentiels et radiaux présentent une allure bien plus lisse avec des contraintes quasiment identiques (Gibson, 1999).

En compression radiale et tangentielle, le bois se comporte globalement de la même façon. Mais la présence de rayons ligneux renforce le matériau dans la direction radiale, le bois y est plus rigide. Easterling et al. (1982) montrent que le module d'Young est doublé entre une compression tangentielle et une radiale.

En compression radiale et tangentielle, la zone élastique réversible s'explique par un fléchissement élastique des cellules autour du lumen (Toussaint, 2010). La limite élastique est rapidement atteinte. Alors qu'elle est à peu près identique en compression radiale et tangentielle, elle est 7 fois plus importante en compression longitudinale (figure I-16, partie A).

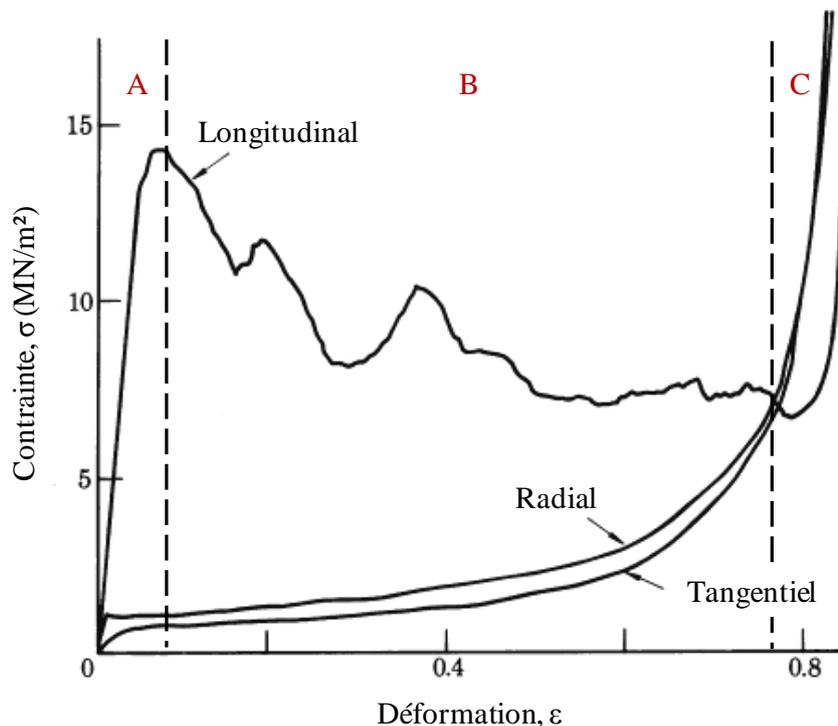


Figure I-16. Courbes contrainte / déformation du bois de balsa testé en compression suivant la direction tangentielle, radiale et longitudinale (d'après Easterling et al. 1982).

Lorsque la limite élastique est atteinte, l'application d'une force supplémentaire entraîne un écrasement des parois des cellules de la couche cellulaire la plus faible. Cet écrasement entraîne une densification des cellules qui se prolonge jusqu'à ce que la couche puisse supporter une force suffisante capable de densifier la couche suivante la plus faible (figure I-17). Le bois initial, parce qu'il est composé de cellules à parois fines, est une couche cellulaire mécaniquement faible. Il est donc affecté en premier lieu. Blomberg (2006) montre qu'il se comprime de 30% avant que le bois final ne soit affecté.

A la fin du plateau de densification toutes les cellules du bois initial sont écrasées, une force supplémentaire entraîne un écrasement des parois des cellules de bois final. C'est l'étape de densification au sens strict. Les cellules ayant des parois plus épaisses et une porosité plus faible, la contrainte augmente rapidement. Une fois que toutes les cellules sont déformées, c'est la paroi cellulaire qui est densifiée. La contrainte augmente alors de façon exponentielle (figure I-16, partie C) (Toussaint, 2010).

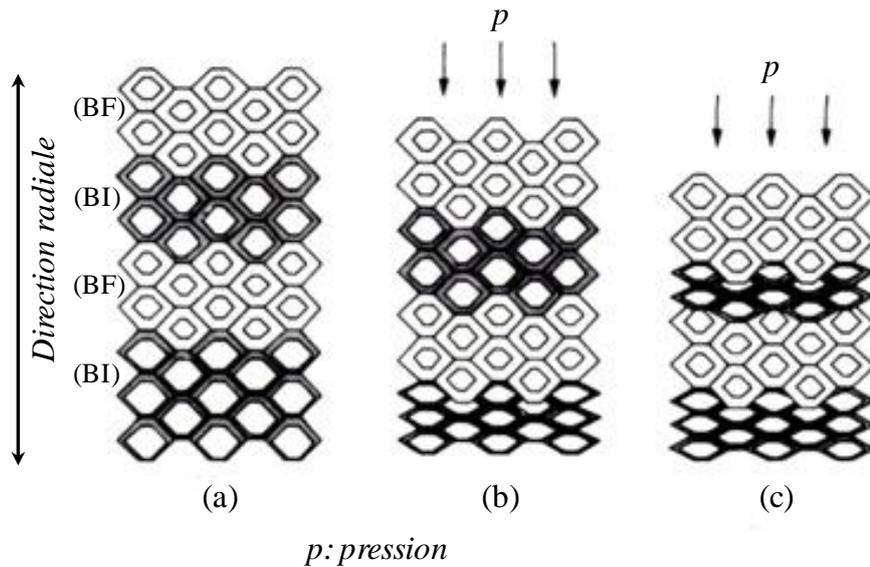


Figure I-17. Représentation schématique des mécanismes de déformation au niveau cellulaire du bois en compression radiale : bois avant sollicitation (a), concentration de déformation, écrasement des fibres dans la couche la plus faible et sa densification (b), écrasement des fibres dans la couche la plus faible suivante et densification (c) (d'après Navi et Heger, 2005). BI : Bois Initial ; BF : Bois Final.

En compression longitudinale, la limite élastique est rapidement atteinte. A température et humidité équivalentes, elle est supérieure à celle obtenue en compression radiale ou tangentielle. Dinwoodie (1981) explique que les microfibrilles de cellulose, surtout orientées dans la direction longitudinale, rendent la paroi cellulaire plus rigide dans cette direction. Easterling et al. (1982) ajoutent qu'une cellule est plus rigide dans le sens longitudinal que dans les directions transversales car dans cette direction les parois cellulaires ne peuvent être que comprimées alors que dans les directions transversales les parois se courbent ce qui nécessite une force moindre.

Dans cette direction de sollicitation le comportement du bois est différent de celui observé précédemment. Il présente d'abord un comportement adoucissant (Navi et Heger, 2005) suivi d'une densification au sens strict. Le comportement adoucissant peut s'expliquer par différents types de déformations cellulaires. Easterling et al. (1982) montrent que, pour des bois de faible densité (< 0.3), l'adoucissement est dû à l'effondrement des fibres par rupture de leurs extrémités alors que Bariska et Kucera (1982) montrent que pour des bois de densité plus importante l'adoucissement est lié au flambement local des parois des cellules entraînant la formation de bandes de cisaillement (figure I-18).

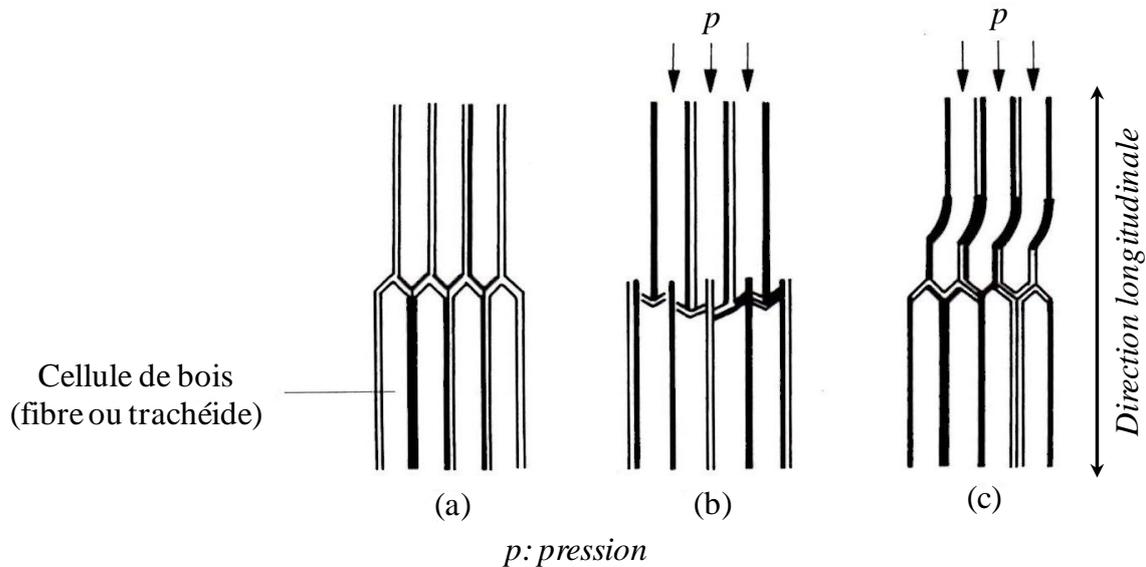


Figure I-18. Représentation schématique des mécanismes d'endommagement au niveau cellulaire du bois en compression longitudinale : bois avant sollicitation (a), effondrement des cellules : par rupture des extrémités (b) et par flambement localisé des parois (c) (Navi et Heger, 2005).

2.2.1.3. Les paramètres qui influencent les propriétés mécaniques en statique

De nombreux facteurs agissent sur la résistance mécanique du bois. Certains sont liés au bois lui-même, à son anatomie ou à ses conditions de croissance. D'autres sont liés au conditionnement de l'échantillon lors de sa mise en œuvre.

- **Les paramètres propres au matériau**

Les caractéristiques anatomiques, propres à chaque espèce de bois, sont les premiers paramètres qui influencent les propriétés mécaniques du matériau les rendant forcément différentes d'une espèce à l'autre. Ce sont en effet surtout les fibres et les trachéides qui contribuent à la résistance mécanique du bois. Plus ces éléments sont longs et nombreux et présentent des parois épaisses, plus le matériau est mécaniquement résistant (Bary-Lenger et al., 1999).

La masse volumique du bois, étroitement liée à l'épaisseur des parois des éléments anatomiques du bois comme les fibres et les trachéides, est un second paramètre, propre au matériau, qui influence ses propriétés mécaniques. Guitard (1987) a étudié l'influence de ce paramètre dans une gamme de densité étendue du balsa (*Ochroma pyramidale*) à 200kg/m^3 jusqu'à l'endranendrana (*Humbertia madagascariensis*) à 1280kg/m^3 en rassemblant de nombreuses données publiées dans la littérature. Il montre notamment que les caractéristiques élastiques du matériau sont étroitement liées à sa densité et propose une

relation relativement simple entre ces deux paramètres pour des bois standards à 12% d'humidité (tableau I-3) :

Tableau I-3. Modèle prévisionnel du comportement tridimensionnel élastique du bois (Guitard, 1987).

Feuillus	Conifère
$E_L = 14000 \times (\rho / 0.65)^{1.03} MPa$	$E_L = 13100 + 41700 \times (\rho - 0.45) MPa$
$E_R = 1810 \times (\rho / 0.65)^{1.3} MPa$	$E_R = 1000 + 2370 \times (\rho - 0.45) MPa$
$E_T = 1030 \times (\rho / 0.65)^{1.74} MPa$	$E_T = 636 + 1910 \times (\rho - 0.45) MPa$

ρ = masse volumique à 12% d'humidité d'équilibre.

À l'intérieur d'une espèce, une variabilité de la densité et donc de la rigidité entre individus est observée. Elle est la conséquence des conditions de croissance de l'arbre. Au sein d'un même arbre, il est également possible de trouver des rigidités différentes d'un point à un autre. Il est notamment possible d'observer une diminution de la masse volumique et donc de la rigidité de la souche vers le houppier.

Dans la suite de notre travail une attention particulière sera apportée à l'échantillonnage puisque tous les échantillons seront prélevés dans le même cerne du même arbre, à même hauteur (pour chaque espèce) afin de s'affranchir au maximum de l'influence de l'anatomie et de la masse volumique du bois sur ses propriétés mécaniques.

Il est d'autre part intéressant de noter que les nœuds et autres singularités du bois (déviations du fil, poches de résine...) affectent les propriétés mécaniques du bois. Quand cela est possible les singularités du bois sont éliminées lors de l'usinage et ne sont donc pas un véritable problème pour l'utilisation du matériau. La présence de nœuds est par exemple inévitable et leur effet néfaste dépend de leur état (sain, vicieux ou pourri), de leur nombre, de leur dimension ou de leur position dans la pièce. Globalement ils affectent plus la résistance en traction du matériau que sa résistance en compression.

- **Les paramètres liés au conditionnement de l'échantillon**

- *La température :*

La température affecte les propriétés mécaniques du bois. L'élasticité et la résistance mécanique diminuent lorsque la température augmente, cette diminution est d'autant plus importante que le taux d'humidité est élevé.

Comme on l'a vu précédemment, le bois est un composite de polymères naturels. En fonction de la température, le module d'élasticité du bois suit donc globalement une évolution similaire à celle d'un polymère amorphe (figure I-19).

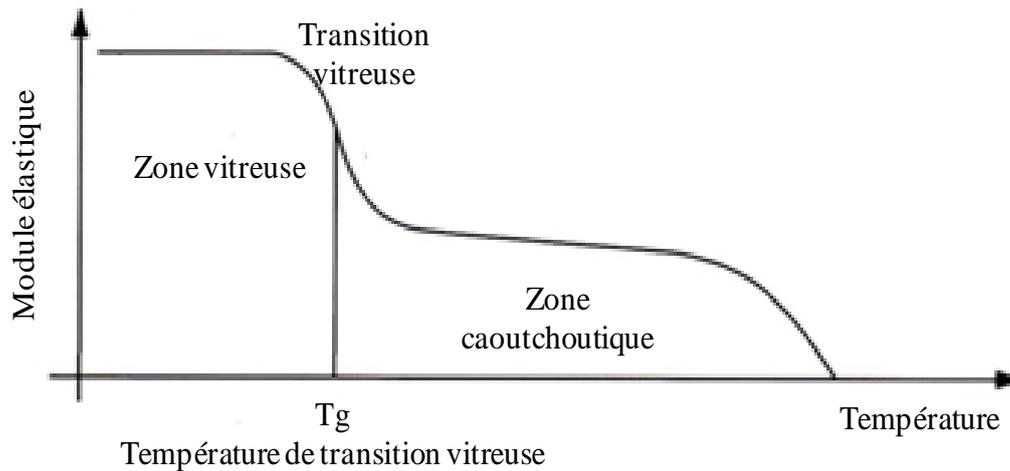


Figure I-19. Evolution du module d'élasticité d'un polymère en fonction de la température

De manière générale on y distingue deux zones. A faibles températures la valeur du module d'élasticité est élevée et varie peu, c'est le plateau vitreux. Les mouvements moléculaires y sont de faibles amplitudes. Ensuite le module d'élasticité diminue fortement, on entre alors dans la zone de transition vitreuse. La diminution du module γ est maximale pour une température bien particulière appelée température de transition vitreuse (T_g). Finalement à de hautes températures on entre dans la zone caoutchoutique, le polymère s'écoule alors comme un liquide visqueux. Le module d'élasticité γ est 3000 à 4000 fois inférieur à celui du plateau vitreux.

La température de transition vitreuse diffère d'un composant du bois à un autre et dépend fortement de la teneur en eau. Salmen (1982) reporte ainsi que la T_g de la cellulose anhydre se situe autour de 280°C, celle des hémicelluloses entre 150 et 220°C et enfin celle des lignines plutôt entre 124 et 193°C. L'ensemble de ces résultats ont été obtenus sur des composants extraits du bois. Il est important de noter que, grâce à un poids moléculaire plus important, les lignines natives ont une T_g plus importante pouvant atteindre les 210°C (Goring, 1963 et Hatakeyama et al., 1974 cités par Salmen, 1982).

La température affecte également d'autres propriétés mécaniques que le module d'élasticité. Les nombreuses études réalisées sur ce sujet montrent notamment que la résistance en flexion, en compression radiale et longitudinale, en traction ainsi que la dureté sont considérablement modifiées par la température. La partie 3.3.4.3 de cette revue traite particulièrement de ce sujet.

➤ *Le taux d'humidité :*

Entre l'état anhydre et le point de saturation des fibres (PSF), les propriétés mécaniques et notamment les caractéristiques élastiques du bois sont considérablement affectées par le taux d'humidité. Plus un bois est sec, plus il est rigide. Kollman et Krech (1960) cités par (Kollmann et Coté 1968) montrent qu'entre 0 et 5% d'humidité le module d'élasticité du

Chapitre 1

chêne (*Quercus spp.*) et de l'épicéa (*Picea spp.*) n'augmente que légèrement, il diminue ensuite linéairement jusqu'au point de saturation des fibres. Ces mêmes auteurs montrent également que l'effet de l'humidité sur les constantes élastiques varie avec la masse volumique car les bois les plus denses sont plus sensibles aux variations d'humidité.

Les changements d'humidité provoquent en effet des retraits ou gonflements dans le bois, c'est à dire la dispersion ou concentration de la substance ligneuse qui affecte les constantes élastiques (Panshin et de Zeeuw, 1980). Guitard (1987) montre qu'une augmentation du taux d'humidité diminue les interactions entre les macromolécules des polymères hydrophiles et a pour effet une plastification des constituants du bois en abaissant leur température de transition vitreuse et donc une diminution des constantes élastiques du matériau. La cellulose amorphe et les hémicelluloses sont très hydrophiles, leurs Tg sont donc fortement affectées par la teneur en eau. Lorsqu'ils sont saturés, la Tg peut être inférieure à la température ambiante. La lignine est beaucoup moins hydrophile. Une faible teneur en eau affecte considérablement la Tg de ce polymère, par exemple entre 0 et 5% elle passe de 174 à 115°C ; une addition supplémentaire d'eau n'aura par contre que peu d'effet (Sakata et Senju, 1975 cités par Salmèn, 1982). En conditions saturantes, la Tg de la lignine se stabilise à 85°C (Salmèn, 1982). De par son important réseau cristallin, la Tg de la cellulose cristalline n'est pas affectée par l'humidité (Salmèn 1982). Comme précédemment évoqué, il est cependant important de rappeler que la Tg des composants natifs ou isolés du bois diffère au sein du matériau. Afin d'être le plus précis possible Salmèn (1986) (cité par Navi et Heger, 2005) suggère de suivre l'évolution de la Tg de la matrice hémicellulose-lignine en fonction de la teneur en eau.

D'un point de vue pratique, de façon à prévoir les constantes élastiques du bois à des humidités comprises entre 12% et 30% et tenant compte des changements de densité avec l'humidité (base sèche), Gerhards (1982) propose d'appliquer les corrections suivantes :

$$E_L(\rho, H) = E_L(\rho, 12\%) \times [1 - 0.01 \times (H - 12)]$$

$$E_R(\rho, H) = E_R(\rho, 12\%) \times [1 - 0.03 \times (H - 12)]$$

$$E_T(\rho, H) = E_T(\rho, 12\%) \times [1 - 0.03 \times (H - 12)]$$

$$G_{LR}(\rho, H) = G_{LR}(\rho, 12\%) \times [1 - 0.02 \times (H - 12)]$$

$$G_{TR}(\rho, H) = E_{TR}(\rho, 12\%) \times [1 - 0.02 \times (H - 12)]$$

$$G_{LR}(\rho, H) = G_{LR}(\rho, 12\%) \times [1 - 0.02 \times (H - 12)]$$

La sensibilité des propriétés élastiques à l'humidité est influencée par l'anisotropie du bois. Le module d'Young parallèle aux fibres est ainsi le moins sensible aux changements d'humidité (Kollmann and Coté 1968), le module d'Young tangentiel est par contre le plus sensible à ces variations (Gerhards, 1982).

Les modules élastiques en compression ne sont pas les seules caractéristiques mécaniques affectées par une variation d'humidité. La résistance à la compression parallèle au fil est la propriété mécanique la plus affectée par les changements d'humidité alors que le module d'élasticité et la résistance en traction parallèle au fil par exemple sont moins sensibles (Gerhards, 1982)

L'humidité seule n'est pas l'unique paramètre qui intervient sur le comportement mécanique du bois, les cycles d'adsorption / désorption jouent également un rôle important (Goulet 1967, 1968).

➤ *Le temps, comportement viscoélastique du bois :*

Lorsqu'une contrainte ou une déformation est appliquée au matériau pendant une durée importante, le bois présente un comportement visco-élastique. La connaissance de ce comportement est indispensable pour une bonne tenue des ouvrages bois dans le temps. Le comportement viscoélastique du bois peut être mis en évidence par des essais de fluage et de relaxation.

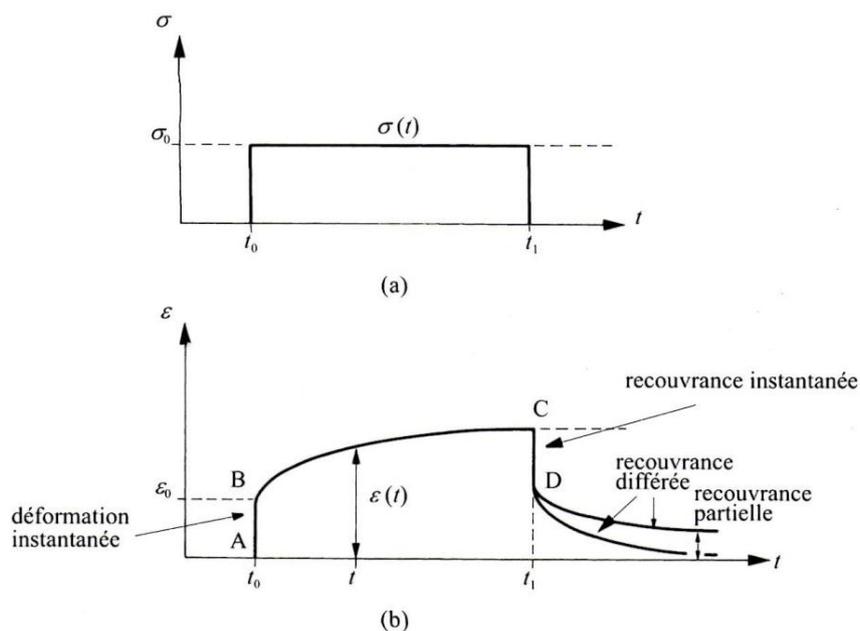


Figure I-20. Représentation idéale d'un essai de fluage : sollicitation en créneau (a), réponse typique d'un matériau viscoélastique (b) (Navi et Heger, 2001).

Si un échantillon est soumis à une contrainte constante (σ_0 dans le domaine d'élasticité linéaire), il va se déformer progressivement au cours du temps : c'est le fluage.

Au cours de ce type d'essai, la contrainte appliquée évolue sous forme de créneau et la réponse en déformation présente trois parties distinctes (figure I-20) :

- l'application de la contrainte σ_0 à l'instant t_0 produit une déformation instantanée ε_0 ;
- le maintien de la contrainte pendant un temps t provoque une déformation $\varepsilon(t)$ qui croît dans le temps et présente un effet différé, $\varepsilon(t) - \varepsilon_0$;
- la suppression de la contrainte produit une recouvrance instantanée égale à la déformation initiale pour les matériaux non vieillissant et non endommagés puis une recouvrance différée qui peut être totale ou partielle.

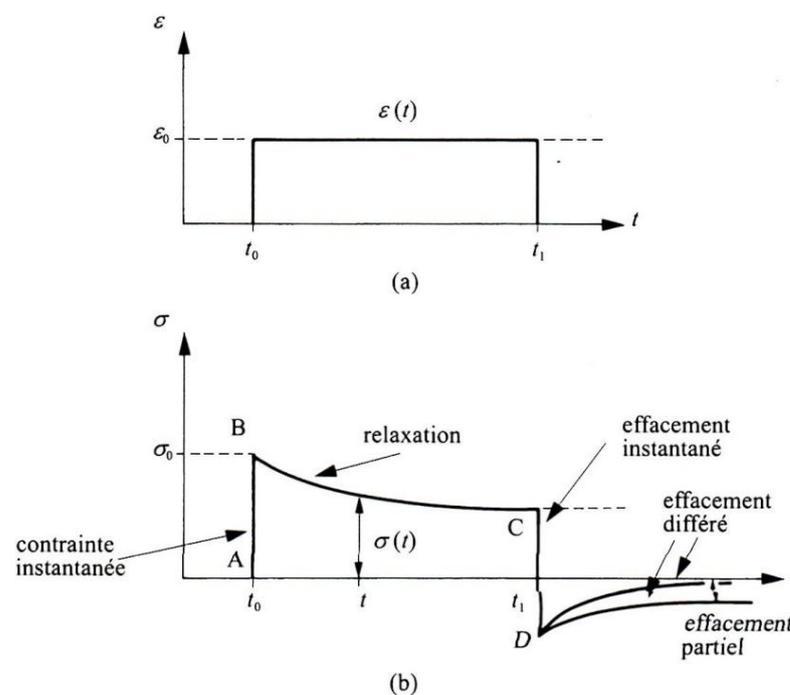


Figure I-21. Représentation idéale d'un essai de relaxation : sollicitation en créneau (a), réponse typique d'un matériau viscoélastique (b) (Navi et Heger, 2001).

Si un échantillon est soumis à une déformation donnée, les contraintes à l'intérieur du barreau diminuent avec le temps : c'est la relaxation. Dans cet essai, c'est la déformation qui évolue sous forme de créneau.

La réponse en contrainte présente là encore trois parties distinctes (figure I-21) :

- l'application d'une déformation instantanée ε_0 provoque une contrainte instantanée σ_0 ;
- le maintien de la déformation provoque la relaxation de la contrainte ;
- l'annulation instantanée de la déformation produit un effacement instantané de la contrainte suivi d'un effacement différé qui peut être partiel (phénomène de plasticité) ou total (viscoélasticité pure).

La teneur en humidité, la température, le type de bois ou encore le type d'essai influencent le comportement viscoélastique du bois. Hoffmeyer (1990) cité par Navi et Heger (2005) montre ainsi que les fluages en compression et en traction sont plus importants que le fluage en flexion et que le fluage sur poutre humide est plus important que le fluage sur poutre sèche. Dinwoodie et al. (1991) cités par Navi et Heger (2005) montrent eux qu'à conditions climatiques constantes, le fluage en flexion augmente avec la température et que cette grandeur dépend également du type de matériau. Ces auteurs montrent avec ces résultats que les courbes de fluage de panneaux et de bois massif présentent des allures différentes.

➤ *Le taux de déformation :*

La vitesse est directement liée au paramètre temps. Une augmentation de la vitesse induit des modules d'Young plus grands. La vitesse n'agit pas seulement sur les propriétés élastiques du matériau. D'importants taux de déformation entraînent des modifications de l'ensemble des propriétés mécaniques du bois d'autant plus importantes que le taux de déformation est élevé. L'influence de ce paramètre est plus particulièrement étudiée dans la partie suivante.

2.2.2. Essais dynamiques et comportement au choc

2.2.2.1. Généralités

Lalanne (1999) explique qu'un choc mécanique est une excitation vibratoire dont la durée est de l'ordre de grandeur ou inférieure à environ deux fois la période propre du système sollicité. Lorsqu'il y a choc mécanique, une force, une position, une vitesse ou une accélération se retrouve brusquement modifiée créant un régime transitoire dans le système considéré.

Il existe différents types de chocs :

- la secousse qui est un choc simple répété de nombreuses fois ;
- le choc simple (ou parfait) dont le signal peut être représenté par une description mathématique simple. Il existe notamment les chocs demi-sinusoïdal, les chocs en dent de scie à pic terminal (DSPT) (ou à pic final DSPF), les chocs rectangulaires, les chocs trapézoïdaux ou encore les chocs sinus-verse ;
- le choc amorti constitué par des périodes d'une sinusoïde amortie caractérisée par l'amplitude du premier pic, la fréquence et l'amortissement.

Dans les parties qui suivent, l'accent sera particulièrement mis sur le comportement du bois lors d'un choc amorti de type compression dynamique. Les dispositifs utilisés pour évaluer ce comportement, les mécanismes de déformation du bois et les paramètres qui influencent ce comportement sont notamment décrits.

Il est cependant important de noter que la littérature mentionne également de nombreux autres essais mécaniques dynamiques (flexion, cisaillement...) qui, compte-tenu de la thématique de ce mémoire, ne sont pas détaillés ici.

2.2.2.2. Les dispositifs utilisés en compression dynamique

La littérature mentionne trois principaux dispositifs permettant l'évaluation du comportement du bois en compression dynamique. Les plus anciens, fonctionnant sur le même principe général, sont le mouton pendule (aussi connu sous les noms de Swinging Pendulum Machine, Charpy ou Izod Machine) et les machines d'essais d'impact à « puit de chute » (aussi appelées Drop Weight Test machine). Plus récemment, le dispositif de barre de Hopkinson a été développé. Par rapport aux premiers dispositifs, il présente l'avantage de tester les matériaux à des taux de déformations bien plus élevés.

- **Le mouton-pendule**

Le premier de ces dispositifs a été développé par l'américain Russel en 1896 avant d'être amélioré par Charpy en 1901 (figure I-22). Ce dernier modifia notamment la forme des éprouvettes et proposa une méthode d'étude rigoureuse et fiable toujours utilisée de nos jours. L'objectif premier de ce dispositif était de mesurer l'énergie nécessaire à la rupture en une seule fois d'une éprouvette testée en flexion dynamique. Pour se faire, le pendule est lâché d'une hauteur connue et l'énergie absorbée par l'éprouvette, obtenue par la différence d'énergie potentielle entre le départ et la fin de l'essai, est mesurée grâce à un index fixé sur la machine qui permet de connaître précisément la hauteur initiale et la hauteur maximale obtenue après l'impact :

$$E = m \times g \times (h - h')$$

avec E l'énergie absorbée, m la masse du mouton pendule (en kg), h la hauteur du mouton-pendule au départ, h' la hauteur du mouton-pendule à l'arrivée et g l'accélération du champ de pesanteur terrestre (env. 9.81 m.s^{-1}).

L'énergie absorbée est le direct reflet du comportement du bois. Dans les versions plus modernes, un système d'enregistrement de l'énergie absorbée peut être installé rendant le calcul décrit précédemment inutile.

Ce type de machine a été modifié pour réaliser des essais de compression dynamique. L'outil existant est remplacé par un outil de type « marteau » et une plaque cible porte échantillon est fixée pour recevoir le choc. Cet équipement a été pour la première fois développé au début des années 40 aux Etats-Unis pour simuler les effets d'explosions sous-marines sur les équipements de bord des navires. Sur le même principe, Montanini (2005) a développé un système à double pendule permettant également de réaliser des essais de compression dynamique. Cet auteur explique que par rapport au dispositif d'impact à « puit de chute » qui sera décrit ultérieurement, ce dispositif permet d'avoir un meilleur guidage de l'impacteur et donc des résultats plus précis. Il assure également une surface d'impact parfaitement verticale.

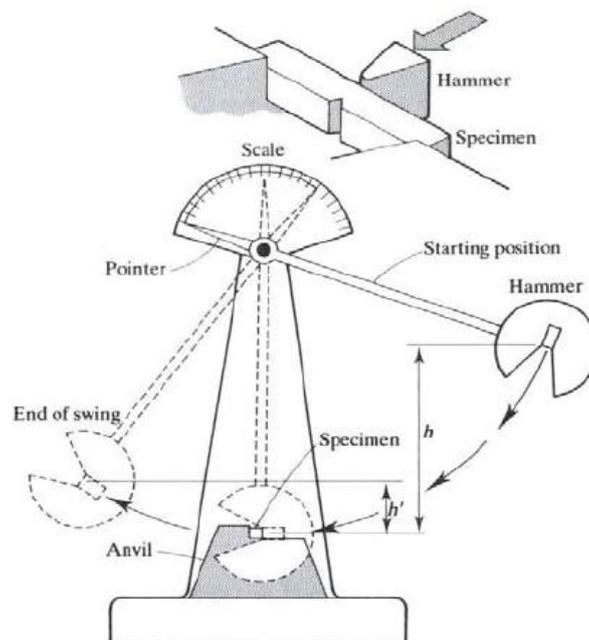


Figure I-22. Schéma de principe du dispositif Charpy.

- **Les machines d'impact à puit de chute**

Les machines d'impact à « puit de chute » fonctionnent sur le même principe général. Une masse est lâchée verticalement d'une hauteur connue et en assumant que la masse chute

Chapitre 1

sans friction, il est possible d'obtenir la vitesse et l'énergie d'impact grâce au premier principe de la thermodynamique :

$$V = \sqrt{2 \times g \times z} \text{ et } E = m \times g \times z$$

avec V la vitesse (en m.s^{-1}), g l'accélération du champ de pesanteur terrestre (env. 9.81 m.s^{-2}), z la hauteur initiale de la masse (en m), E l'énergie à l'impact et m la masse d'impact.

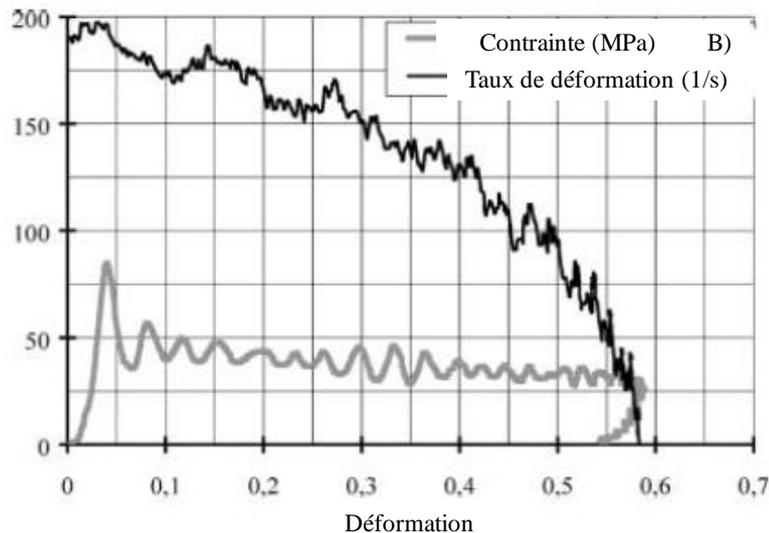
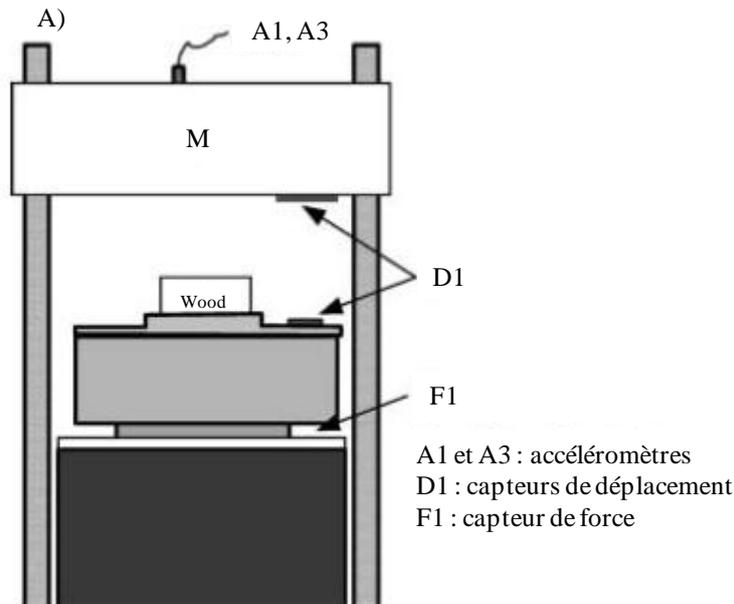


Figure I-23. A) Schéma du dispositif utilisé et B) résultats obtenus d'après Adalian et Morlier (2002).

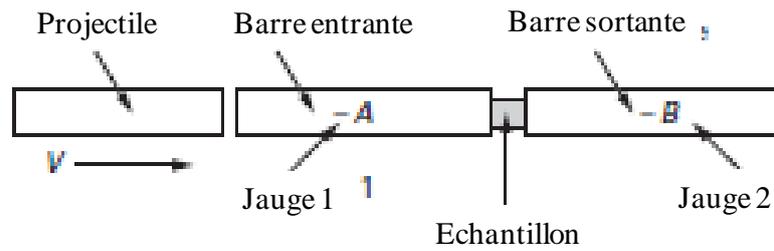
L'énergie d'impact absorbée par le matériau pouvant être supérieure ou inférieure à l'énergie nécessaire à la rupture de l'échantillon, il n'est pas possible d'obtenir de résultats rigoureux. Il est donc nécessaire d'instrumenter ces machines afin d'obtenir des

informations plus complètes sur le comportement du bois à l'impact que la seule quantité d'énergie absorbée ne peut donner. Adalian et Morlier (2002) ont ainsi ajouté des accéléromètres ainsi que des capteurs de force et de déplacement pour évaluer le comportement du bois en compression dynamique (figure I-23 A). La figure I-23 B) représente les résultats qu'ils ont obtenus.

La hauteur de chute possible, souvent limitée par la hauteur de la machine pour des raisons d'encombrement ou de problèmes de guidage, constitue la limite principale de ce type de dispositif. Afin d'augmenter la vitesse d'impact et donc le taux de déformation il est possible d'augmenter la masse d'impact (Adalian, 1998) ou d'ajouter une force supplémentaire à l'action de la pesanteur. Lalanne (1999) cite comme exemple la machine de Collins où le chariot est accéléré par un système de câbles élastiques. La force appliquée est donc due à la fois à la gravité et à l'action de ses câbles.

- **Les barres de Hopkinson**

Le dispositif de barres de Hopkinson, aussi appelé système SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) ou encore barres de Kolsky, a été développé par Davies et Kolsky en 1949. Ce dispositif est très largement utilisé dans la caractérisation des matériaux en compression dynamique mais peut également être utilisé pour tester les matériaux en traction ou en torsion dynamique. Gary (2002) donne le principe de fonctionnement du dispositif en mode compression dynamique. L'échantillon est placé entre deux barres identiques, de limite élastique élevée par rapport à celle de l'échantillon testé. Une jauge est placée sur chacune des barres. Un projectile est lancé contre l'une des barres (barre entrante) ce qui génère dans cette dernière une onde élastique longitudinale de compression. A l'intersection barre-échantillon une partie de cette onde est réfléchiée, l'autre partie est transmise dans l'échantillon jusqu'à l'intersection échantillon barre sortante où une nouvelle onde est transmise à la barre sortante. Les ondes en entrée et en sortie du dispositif sont mesurées grâce aux jauges fixées sur chacune des barres.



Dimensions typiques : diamètre 20mm, longueur de barres 3m, échantillon millimétrique

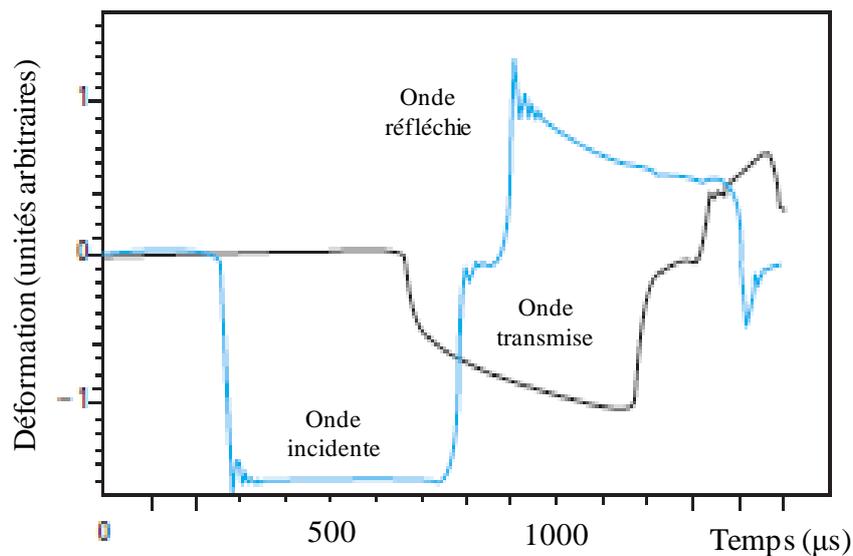


Figure I-24. A) Montage des barres de Hopkinson et B) ondes de bases lors d'un essai de compression d'un échantillon d'aluminium (d'après Gary, 2002).

A partir de ces ondes, les efforts et déplacement sont déterminés. Les déplacements sont directement déterminés par intégration des vitesses sur la face d'entrée et la face de sortie. Les vitesses en entrée et en sortie sont déterminées grâce aux équations suivantes :

$$V_e = -C \times (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t))$$

$$V_s(t) = -C \times \varepsilon_t(t)$$

Les forces en entrée et en sortie s'écrivent elles de la façon suivante :

$$F_e(t) = S_b \times E \times (\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t))$$

$$F_s(t) = S_b \times E \times \varepsilon_t(t)$$

Avec C la célérité des ondes de compression dans les barres, ε_i , ε_r , ε_t , respectivement les ondes de déformation « incidente », « réfléchie » et « transmise » enregistrées en entrée pour les deux premières et en sortie pour la troisième, E le module d'Young des barres et S_b leur section.

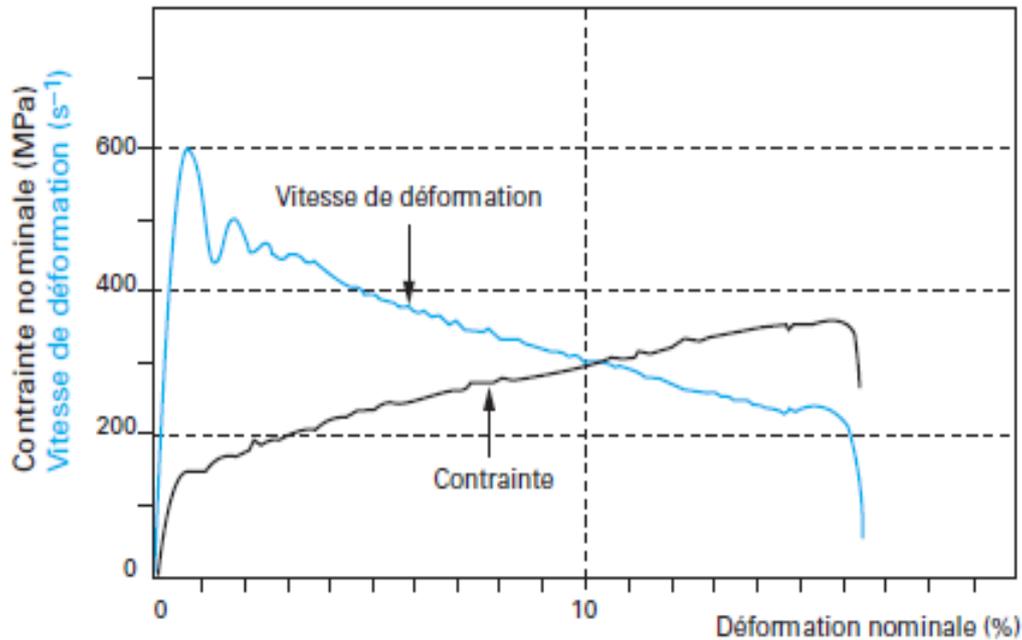


Figure I-25. Exemple de courbes obtenues (Gary, 2002).

Dans le cadre d'essais traditionnels, la quasi-égalité entre la force d'entrée et de sortie est vérifiée, il est alors admis que les contraintes et déformations sont homogènes dans l'échantillon. Cette homogénéité peut cependant être discutée puisqu'elle dépend du matériau testé, du dispositif ou encore des paramètres expérimentaux (Gary, 2002). Cela constitue les limites d'un tel dispositif.

En plus de ces trois grands types de machine d'essai dynamique largement utilisés, il existe d'autres dispositifs plus ou moins originaux. Citons notamment les machines pneumatiques, les dispositifs à plans inclinés (Vigness, 1961 cité par Lalanne, 1999) ou encore les canons où un projectile porte spécimen est propulsé par détente d'un gaz vers une cible équipée d'un programmeur (Yarnold, 1975 cité par Lalanne, 1999). Certains auteurs ont même développé des dispositifs permettant d'évaluer la résistance des matériaux à des chocs d'origine pyrotechnique (Zimmerman, 1993 cité par Lalanne, 1999).

2.2.2.3. Comportement du bois en compression dynamique

Contrairement aux essais du bois en compression quasi-statique où les publications abondent, très peu se sont intéressées au comportement du bois en compression dynamique. Les quelques publications sur ce sujet permettent néanmoins de dégager des informations sur le comportement du bois en compression dynamique.

En compression dynamique, le bois se déforme selon une onde de choc qui se propage dans l'échantillon depuis le point d'impact. Ceci contraste avec des essais de compression quasi-statique où la déformation de l'échantillon est la succession de déformations uniformément

Chapitre 1

distribuées à l'intérieur de l'échantillon (cf. § 2.2.1.2) (Reid et Peng, 1997). C'est en fait l'énergie cinétique transmise à l'échantillon qui est responsable des déformations. Une partie de cette énergie est en effet dissipée sous forme de travail de déformation dans l'échantillon alors qu'une autre est dissipée sous forme d'énergie thermique ou de travail transmis au bâti. Une dernière partie rebondit contre le support de l'échantillon entraînant de nouvelles déformations. Finalement, il apparaît difficile de comparer l'énergie cinétique transmise à l'échantillon et l'énergie réellement absorbée par l'échantillon pour se déformer.

Les mécanismes de déformations sont particulièrement décrits par Reid et Peng (1997). Le front de la bande de cellules broyées progresse selon une surface plane depuis la surface de l'échantillon où l'impact a lieu jusqu'à l'autre extrémité de l'échantillon. La longueur de la bande de cellules broyées augmente lorsque la vitesse d'impact augmente. Une bande de cellules broyées peut également apparaître directement à l'extrémité finale de l'échantillon. Elle est due à la réflexion de l'onde de choc élastique qui précède l'onde de choc principale.

Ces auteurs montrent que le bois se comporte différemment selon la direction de sollicitation. Les observations microscopiques réalisées sur les échantillons testés dans le sens des fibres montrent que les déformations sont dues à un ensemble de microflambements des cellules. Perpendiculairement au sens des fibres, les zones d'écrasement sont peu visibles au niveau macroscopique. Ceci est surtout dû à la recouvrance de l'échantillon et au fait que la déformation de l'échantillon est l'addition de multiples bandes de déformation présentes partout dans l'échantillon. Les zones de déformation sont donc moins uniformes et sont distribuées partout dans l'échantillon. Les observations microscopiques réalisées montrent que les cellules des échantillons testés perpendiculairement au sens des fibres se déforment par flexion. Les bandes de cellules broyées sont la conséquence de la propagation de l'onde de choc dans un milieu hétérogène composé de cellules de bois initial et de bois final, les cellules de bois d'été ayant un effet de rigidification. Les rayons ligneux peuvent avoir le même effet.

Les essais dynamiques réalisés dans la littérature dégagent une influence variable du taux de déformation sur certains paramètres mécaniques du bois. Quelle que soit la direction de l'essai, la résistance maximale en compression augmente lorsque le taux de déformation augmente (Renaud et al., 1996 a,b ; Widehammar, 2004). L'influence sur la rigidité est par contre moins évidente. Renaud et al. (1996 a,b) ne dégagent pas d'influence significative de la vitesse sur le module d'Young alors que Widehammar (2004) montre que quelle que soit la direction étudiée, le module d'Young augmente avec la vitesse de compression.

2.2.2.4. Les paramètres qui influencent ce comportement

Bien que de nombreuses études aient évaluées l'influence de paramètres sur le comportement du bois en compression quasi-statique (cf. § 2.2.1.2), peu ont montré

l'influence de ces paramètres en compression dynamique. C'est en fait surtout l'influence de la teneur en eau de l'échantillon qui a été évaluée.

Contrairement aux résultats obtenus en compression quasi-statique, Renaud et al. (1996) montrent que la rigidité d'échantillons de chêne, de peuplier et de hêtre testés dans les directions radiales et tangentielles en compression dynamique augmente lorsque la teneur en eau augmente. Les auteurs expliquent qu'à de forts taux de déformation l'eau présente dans les pores du bois devient incompressible et se comporte comme un solide contribuant à la rigidification du matériau. Dans le sens longitudinal, l'eau agit comme agent de ramollissement et diminue la rigidité du bois.

Renaud et al. (1996) ont également évalué l'influence de l'humidité sur la résistance du bois en compression dynamique. Quelle que soient l'essence et la direction de compression étudiée, ils ont montré qu'elle diminuait avec l'augmentation de la teneur en eau. Dans le cas d'échantillons saturés, une part de la résistance maximale de l'échantillon vient de l'eau présente dans les lumens.

2.2.3. La broyabilité du bois

Dans le contexte général de cette étude, il apparaît essentiel d'évaluer la broyabilité de la biomasse et plus particulièrement celle du bois (cf § 1.3.3). La partie qui suit entend présenter les différents types de broyeurs qu'il est possible d'utiliser dans la filière bois ainsi que les techniques d'évaluation de la broyabilité de la biomasse. Cette évaluation permet d'optimiser au maximum l'étape de broyage très gourmande en énergie. Les techniques généralement utilisées pour cette évaluation consistent à mesurer l'énergie consommée par un broyeur pour transformer une quantité de biomasse en un produit aux caractéristiques bien définies mais très peu d'études évaluent la broyabilité au niveau de l'échantillon. Considérant les déformations subies par l'échantillon dans les broyeurs, il apparaît intéressant d'étudier son comportement en compression dynamique afin d'évaluer son aptitude au broyage. C'est ce qui a été fait dans ce travail, les résultats sont présentés en détail dans la quatrième partie de ce mémoire.

2.2.3.1. Les différents types de broyeurs de bois

- **Les déchiqueteuses forestières**

Sur le marché actuel il existe différents types de déchiqueteuses forestières qui se distinguent les unes des autres par leur capacité et/ou leur système de découpe. Il existe notamment (Abdallah, 2010) :

- les déchiqueteuses à disques pour lesquelles le système de déchiquetage est constitué de couteaux montés sur un disque rotatif perpendiculaire à la direction d'aménagement. Elles acceptent des grumes de 50 cm de diamètre ;
- les déchiqueteuses à tambour pour lesquelles les couteaux sont fixés parallèlement à l'axe du tambour dont l'axe de rotation est perpendiculaire à la direction d'aménagement. Elles peuvent accepter des grumes de 120 cm de diamètre ;
- les déchiqueteuses à vis sans fin conique pour lesquelles la coupe se fait par le filetage d'une vis sans fin qui amène le bois. Les diamètres de grume acceptés sont compris entre 21 et 35 cm.

Le choix d'une déchiqueteuse est fonction du type de biomasse à broyer mais également de la quantité de matière à broyer et de la qualité du produit final souhaitée.

- **Broyeurs fins**

Le broyage fin permet la production de fines particules (inférieures à environ 5 mm) particulièrement utilisées dans les procédés de fabrication de pellets, de panneaux ou encore de biocarburants de seconde génération (Simmons, 1986 cité par Repellin, 2010). De tels broyages sont possibles grâce à des broyeurs fins tels que les défibreurs à friction, les broyeurs à chaînes, à pointes ou à marteaux (Bitra, 2009). Grâce à leur capacité à broyer finement une plus grande variété de biomasses que les autres systèmes, les broyeurs à marteaux sont particulièrement intéressants (Scholten, 1985 cité par Brita, 2009). La taille des échantillons de biomasse à broyer étant limitée dans ce type de broyeur (inférieur à environ 20 cm² de section), il est nécessaire d'effectuer un pré-broyage de la biomasse grâce à des broyeurs à couteaux par exemple (Bitra, 2009 ; Repellin, 2010).

Les broyeurs fins couramment utilisés sont des broyeurs à marteaux. Ils sont constitués d'un tambour en acier contenant un axe vertical ou horizontal sur lequel sont montés les marteaux. Un rotor tourne à vitesse élevée entraînant les marteaux qui dessinent un cercle fermé à l'intérieur du tambour. Le matériel est injecté à l'intérieur du tambour puis est frappé et réduit au fur et à mesure des allers-retours des marteaux. La multiplication des impacts permet d'amener le produit final à la granulométrie désirée.

Deux catégories de broyeurs à marteaux existent : ceux à marteaux fixes utilisés pour des débits modérés et ceux à marteaux mobiles permettant une finesse élevée des particules à condition que la biomasse soit pré-séchée (Blazy, 2007).

2.2.3.2. Les techniques d'évaluation de la broyabilité d'un matériau

Comme mentionné précédemment, la principale technique d'évaluation de la broyabilité consiste à mesurer la consommation énergétique du broyeur afin de transformer la biomasse en un produit aux caractéristiques bien définies. Bergman et al. (2005) comparent ainsi les consommations énergétiques du broyage de bois de saule anhydre ($H < 1\%$) et humide ($10\% < H < 13\%$) réalisé grâce à un broyeur à couteaux (1.5 kW) équipé d'un système de mesure de consommation d'énergie. A granulométrie équivalente, le bois anhydre consomme moins d'énergie que le bois humide (de 10 à 30 kWh.t⁻¹ pour le bois anhydre et de 20 à 65 kWh.t⁻¹ pour le bois humide). Comme attendu ces auteurs montrent également que les broyages les plus fins nécessitent des consommations énergétiques plus importantes.

Mani et al. (2004) ont étudié les consommations énergétiques liées au broyage de différents types de biomasse (paille de froment et d'orge, tiges de maïs, panic érigé). Ces auteurs insistent surtout sur l'influence de certains paramètres sur la broyabilité de la biomasse étudiée. L'humidité du matériau, la granulométrie avant et après le broyage, la masse volumique en vrac, la masse volumique des particules ou encore le type d'installation (broyeur utilisé, débit d'alimentation...) sont notamment cités comme ayant une influence particulière.

Temmerman (2011) a également recensé, parmi de nombreux autres, ces paramètres en insistant particulièrement sur l'importance de chacun d'eux sur la consommation énergétique des broyeurs (tableau I-4).

Tableau I-4. Estimation du degré d'importance des facteurs d'influence sur la consommation énergétique au broyage de la biomasse (d'après Temmerman, 2011).

Propriété	Broyage de la biomasse
L'origine / la matière	3
L'humidité	3
La masse volumique en vrac	1
La masse volumique du matériau	1
Granulométrie de l'alimentation	1
Granulométrie finale du produit	3
Résistance à la compression	1
Type de broyeur	1
Débit d'alimentation	1

0, 1, 2, 3 : score (sans unité) indiquant un degré croissant d'influence sur la consommation énergétique du broyage.

Chapitre 1

Peu d'études évaluent en revanche la broyabilité du matériau à l'échelle de l'échantillon. Bien que les matériaux dont il est question dans les études citées ci-dessous soient majoritairement d'origine minérale, il peut être envisageable de les utiliser dans l'étude de la broyabilité de la biomasse.

Lecoq et al. (1999) utilisent ainsi un jet d'air comprimé pour envoyer un échantillon pulvérulent contre une cible fixe en silicone. Les auteurs ont alors pu évaluer la relation entre l'énergie d'impact et la broyabilité de certains solides (hydrargilites et alumines) et ont réalisé un classement en fonction de ce critère. Tavares et King (1998) ont quant à eux caractérisé le comportement mécanique de particules minérales fragiles à l'impact grâce au dispositif UFLC (UltraFast Load Cell) développé en 1986 par Weichert et Herbst. Il est constitué d'une longue tige d'acier, équipée de jauges de contrainte, sur laquelle est placée la particule ou le lit de particules à étudier. Une bille d'acier est lâchée contre la barre et comprime alors le matériau produisant une onde de choc qui se propage le long de la barre. L'onde est alors détectée par les jauges de contrainte, transformée en signal électrique puis, après passage à travers des ponts de Wheatstone, est enregistrée par un oscilloscope digital. Compte-tenu des propriétés mécaniques et physiques du pont de Wheatstone, des jauges de contrainte et de la tige, il est alors possible d'obtenir la force appliquée sur la particule lors de l'impact.

Grâce à ce dispositif, ils ont surtout évalué la rigidité et la résistance des matériaux étudiés ainsi que les caractéristiques des fractures (énergie de fracture) apparaissant dans l'échantillon lors de ce type d'essai. L'effet de l'origine de la particule (quartz, cuivre, fer...), de sa forme ou de sa taille est également particulièrement observé.

2.3. LES PROPRIETES ENERGETIQUES DU BOIS

Depuis le début de l'humanité et jusqu'au début de l'exploitation du charbon fossile, le bois a été largement utilisé comme source d'énergie. Au moyen âge, il était transformé en charbon de bois par les charbonniers avant d'être utilisé dans les industries de la sidérurgie et de la verrerie. Avec le développement de l'utilisation du charbon fossile dans de nombreux pays, le charbon de bois a disparu petit à petit du domaine industriel. Le bois a connu cependant un regain d'intérêt pendant la seconde guerre mondiale où il était largement utilisé pour alimenter les véhicules gazogènes ou pour pallier le manque de charbon fossile. Aujourd'hui, grâce au prix grandissant des énergies fossiles et à la volonté des politiques de développer les énergies renouvelables, le bois énergie est particulièrement à la mode.