



Non-destructive detection and analysis of internal characteristics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) logs by means of computed tomography.

Fleur Longuetaud

► To cite this version:

Fleur Longuetaud. Non-destructive detection and analysis of internal characteristics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) logs by means of computed tomography.. Life Sciences [q-bio]. ENGREF (AgroParisTech), 2005. English. NNT: . pastel-00001796

HAL Id: pastel-00001796

<https://pastel.hal.science/pastel-00001796>

Submitted on 27 Jun 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'ENGREF

Option : Sciences Forestières et du Bois

DETECTION ET ANALYSE NON DESTRUCTIVE DE CARACTERISTIQUES INTERNES DE BILLONS D'EPICEA COMMUN (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) PAR TOMOGRAPHIE A RAYONS X

par

Fleur LONGUETAUD

Soutenue publiquement le 31 octobre 2005 devant le jury composé par :

Rapporteurs :
Robert BEAUREGARD
Owe LINDGREN

Directeur de thèse :
Jean-Michel LEBAN

Examineurs :
Christine GRAFFIGNE
Frédéric MOTHE
André ZOULALIAN



Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois
UMR INRA-ENGREF
Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois
54280 CHAMPENOUX (France)

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser des remerciements particuliers à Jean-Michel Leban (pour ses conseils avisés et son coaching efficace tout au long de ces trois années) et à Frédéric Mothe (pour son aide précieuse et ses conseils) avec lesquels j'ai travaillé le plus étroitement pendant ma thèse.

Plus généralement, je remercie toute l'équipe de la Qualité des Bois du LERFoB au sein de laquelle j'ai réalisé ce travail : les techniciens toujours prêts à rendre service (Emmanuel Cornu, Etienne Farré, Pierre Gelhay, Maryline Harroué, Claude Houssement, Thérèse Hurpeau et Alain Mercanti), ainsi que Nathalie Morel mais également Hélène Busch (LERFoB) pour la partie tracasseries administratives, les autres scientifiques de l'équipe (Thierry Constant, Gilles Le Moguédec, Gérard Nepveu et Cyrille Rathgeber) et enfin les autres thésards, stagiaires ou post-doctorants que j'ai pu croiser pendant cette période (Holger, Renaud, Adrian, Olivier, Mike, Sebastien, Adelin, Aude), tout simplement pour leur agréable présence au quotidien. Merci également à Danièle Aubert (LERFoB) pour la réalisation de ma page web (en ligne sur le site du LERFoB).

Enfin, un grand merci à tous les extérieurs qui m'ont aidée dans la réalisation de ce travail : Laurent Saint-André (CIRAD), Philippe Borianne et Yves Caraglio (UMR AMAP Montpellier), Marie-Odile Berger et Erwan Kerrien (INRIA NANCY), Tadeusz Sliwa et Yvon Voisin (Laboratoire LE2I de Bourgogne).

LISTE DES PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES REALISEES DANS LE CADRE DE LA THESE

Ce travail prend la forme d'une thèse sur articles et est basé sur quatre travaux, numérotés de I à IV (cf. liste ci-dessous), acceptés ou soumis dans des revues à comité de lecture.

Articles acceptés ou soumis dans des revues à comité de lecture

- I. **Longuetaud, F., Leban, J.-M., Mothe, F., Kerrien, E. & Berger, M. O.**, 2004. Automatic detection of pith on CT images of spruce logs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(2), 107-119.
- II. **Longuetaud, F., Mothe, F. & Leban, J.-M.**, 2006. Automatic detection of the heartwood/sapwood limit from stacks of CT images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) logs. *Submitted to Computers and Electronics in Agriculture*.
- III. **Longuetaud, F., Mothe, F., Leban, J.-M. & Mäkelä, A.**, 2006. *Picea abies* sapwood width: Variations within and between trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 21, 41-53.
- IV. **Longuetaud, F., Saint-André, L. & Leban, J.-M.**, 2005. Automatic detection of annual growth units on *Picea abies* logs using optical and x-ray techniques. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 24(1), 29-43.

Communications

- V. **Longuetaud, F., Mothe, F. & Leban, J.-M.**, 2005. Analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'Epicéa commun (*Picea abies*) par tomographie à rayons X. *Séminaire de l'Ecole Doctorale RP2E "Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits et Environnement"*, 13 janvier, Université Henri Poincaré, Faculté des Sciences, Nancy, France. (en français, poster et acte)
- Longuetaud, F.**, 2004. Analyse non-destructive de caractéristiques internes de billons d'Epicéa commun (*Picea abies*) par imagerie 3D à rayons X. *6ème Colloque Sciences et Industrie du Bois (SIB)*, 2, 3 et 4 Novembre, ENSTIB, Epinal, France. (en français, résumé)

TABLE DES MATIERES

0. INTRODUCTION	5
1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	11
1.1. LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'INVESTIGATION DES CARACTÉRISTIQUES INTERNES DE BILLONS DE BOIS	11
1.2. ETAT DE L'ART DES PROCÉDURES AUTOMATIQUES DE DÉTECTION À PARTIR D'IMAGES TOMOGRAPHIQUES DE BOIS RONDS	17
1.2.1. LA MOELLE	25
1.2.2. LES CERNES ANNUELS DE CROISSANCE	28
1.2.3. L'AUBIER ET LE DURAMEN	30
1.2.4. LES NŒUDS	33
1.2.5. LES FENTES ET LES TROUS	39
1.2.6. LES ALTÉRATIONS ET LA POURRITURE	41
1.2.7. LES POCHES DE RÉSINE OU DE GOMME	42
1.2.8. LE BOIS DE COMPRESSION	43
1.2.9. LA FIBRE TORSE	44
1.2.10. L'ÉCORCE	44
1.2.11. LE CŒUR ROUGE DU HÊTRE	45
2. MATÉRIELS	47
2.1. MATÉRIEL VÉGÉTAL	47
2.2. LE SCANNER À RAYONS X	50
2.2.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES RAYONS X	50
2.2.2. LE SCANNER	52
2.2.3. CALIBRATION POUR L'ÉTUDE DU MATÉRIAU BOIS	55
2.3. LES IMAGES TOMOGRAPHIQUES DE LA BASE DE DONNÉES	59
2.3.1. CARACTÉRISTIQUES ET STOCKAGE DES IMAGES	59
2.3.2. TRAITEMENTS PRÉLIMINAIRES SUR LES IMAGES	60
2.3.2.1. Ressources logicielles	60
2.3.2.2. Traitements préliminaires	60

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	65
3.1. LA MOELLE	65
3.1.1. DÉTECTION DE LA MOELLE	65
3.1.1.1. Exemple de mise en œuvre d’algorithmes de la littérature pour le traitement de nos images	65
3.1.1.2. Description de notre algorithme et des améliorations apportées	69
3.1.2. VARIATIONS LONGITUDINALES DU DIAMÈTRE ET DE LA DENSITÉ DE LA MOELLE	73
3.2. L’AUBIER ET LE DURAMEN	77
3.2.1. DÉTECTION DE LA LIMITE AUBIER/DURAMEN	77
3.2.2. ANALYSE DE VARIABILITÉ	80
3.3. L’ÉCORCE	83
3.4. LES BRANCHES	87
3.4.1. LOCALISATION DES VERTICILLES	87
3.4.2. DÉTECTION DES BRANCHES	88
3.4.2.1. Exemple de mise en œuvre d’un algorithme de la littérature pour le traitement de nos images	89
3.4.2.2. Description de notre procédure de détection des branches	92
3.4.2.2.1. Détection de la partie des branches incluse dans le duramen	92
3.4.2.2.2. Détection de la partie des branches incluse dans l’aubier	105
4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	109
5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	113

0. INTRODUCTION

Le mot “tomographie”, apparaissant dans le titre de la thèse, est issu du grec *tomos* voulant dire “section”. La tomographie consiste à reconstruire une vision en trois dimensions d'un objet (des billons dans notre cas), structure interne comprise, à partir d'une série d'images en deux dimensions. Le résultat est similaire à ce que l'on obtiendrait en découpant l'objet en fines lamelles puis, en radiographiant ces lamelles, d'où le nom de la technique (Anon., 2005b). Les images 2D sont le résultat d'un processus de reconstruction. Le principe mis en œuvre pour la reconstruction est que la structure interne d'un objet peut être reconstruite à partir de multiples projections de cet objet. Cette technique d'imagerie s'appuie sur le théorème de Radon (Radon, 1917) qui, dès 1917, établit la possibilité “théorique” de reconstituer un objet à partir de la totalité de ses projections (formulation explicite de l'inversion de la transformée de Radon). En anglais, l'abréviation “CT” (*Computed Tomography*) est souvent utilisée pour caractériser la tomographie par rayons X¹. Dans la suite de ce document, les images obtenues par ce procédé seront appelées images tomographiques, tomogrammes, images CT ou encore coupes CT.

L'essence étudiée dans le cadre de la thèse est l'Epicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.). Avec une surface de 730000 ha et un volume sur pied de 130 millions de m³, cette essence se classe au troisième rang des résineux en France après le Pin maritime et le Pin sylvestre (Di Placido et al., 2002). Les bois d'œuvre d'Epicéa commun sont principalement utilisés pour la construction de charpentes mais également en menuiserie lorsqu'ils sont de très bonne qualité. Son utilisation en structure est liée aux propriétés du bois de cette espèce qui allie légèreté et résistance. Cependant, malgré ses qualités, l'Epicéa commun, comme d'autres essences, est concurrencé sur le marché de la construction par d'autres matériaux comme certains métaux (acier, aluminium) ou les plastiques (PVC), ceci étant principalement dû à la forte variabilité naturelle du matériau bois (aspect visuel, propriétés mécaniques, instabilité dimensionnelle) qui rend la qualité des produits difficile à prédire. Pour une utilisation en structure, il est particulièrement important de connaître les propriétés mécaniques (résistance, élasticité) des matériaux utilisés. En raison de cette forte variabilité, et pour s'assurer des marges de sécurité, les éléments en bois doivent être surdimensionnés. Les volumes nécessaires sont donc beaucoup plus importants qu'ils ne le seraient avec un matériau homogène tel que l'acier dont les propriétés mécaniques sont définies lors de sa conception.

¹ En effet, des reconstructions tomographiques peuvent être réalisées à partir d'autres types d'ondes (ultra-sons par exemple).

Dans un contexte de forte compétition avec les autres matériaux de construction industriels, les producteurs de bois ont des difficultés à fournir les volumes et qualités spécifiés par les utilisateurs. Cela traduit un déficit de connaissances ainsi que des lacunes méthodologiques et technologiques. Par ailleurs, les Eurocodes², qui sont l'expression de la nouvelle réglementation technique en matière d'ouvrage de génie civil, seront appliqués au plus tard en 2010. Il sera alors nécessaire de garantir pour tous les sciages une classe de propriétés mécaniques. Il est donc indispensable (i) d'améliorer nos connaissances de la qualité de la ressource et (ii) de contribuer à une meilleure technicité des industries de première transformation en vue d'un meilleur contrôle des caractéristiques et de la qualité du bois produit. Afin de satisfaire aux points (i) et (ii), les méthodes non destructives, permettant une investigation directe de la qualité interne des billons, se sont développées et viennent enrichir considérablement l'information déjà disponible à partir de l'observation de leur enveloppe externe. Selon les procédés employés (micro-ondes, ultra-sons, IRM, rayons X, gamma, etc.), des caractéristiques internes telles que la présence de défauts (nœuds, fentes, poches de résine, pourriture, bois de compression), la largeur de cerne, la densité du bois, la répartition de l'eau dans le tronc deviennent alors accessibles. La tomographie par rayons X semble la plus prometteuse et est de plus en plus répandue dans les laboratoires de recherche (avec une majorité de scanners médicaux) et dans l'industrie (avec l'apparition de prototypes).

La détection des caractéristiques internes des billons couvre un large spectre d'activités allant des travaux de recherche (à des fins d'analyses scientifiques) à des problématiques industrielles (à des fins d'optimisation). En ce qui concerne les investigations scientifiques, la détection des défauts et/ou des caractéristiques du bois se fait souvent de façon manuelle sur les images (la plupart du temps un détournage des zones à étudier est réalisé). Toutefois, de plus en plus de groupes de recherche s'orientent vers le développement de traitements automatiques pour la détection (identification, localisation et mesure) afin notamment d'acquérir des volumes de données plus importants en des temps réduits. Pour l'industrie, l'intérêt d'une détection et d'une quantification automatiques des défauts du bois (ex : nœuds) ou de ses caractéristiques (ex : largeur de cerne) est clairement perceptible. Lors de l'étape de première transformation, la connaissance de la répartition des défauts dans le billon permettraient un classement des billons, une optimisation du sciage, un classement des produits en fonction de propriétés technologiques ou esthétiques. Des algorithmes doivent donc être développés pour permettre une détection précise des composantes présentes sur les images, avec pour l'industrie des contraintes fortes sur les vitesses de traitement.

L'objectif principal du travail entrepris est : la mise au point d'algorithmes robustes, précis, entièrement automatiques et validés pour la détection de caractéristiques internes de billons d'Epicea

² Les règles européennes de calcul des bâtiments sont regroupées dans 10 Eurocodes. Pour le calcul des

commun en vue de leurs analyses. La conduite d'investigations scientifiques à partir des sorties des algorithmes de détection, fait également partie des objectifs de la thèse. Les séries d'images étudiées ont été obtenues par tomographie à rayons X (dans un scanner médical) ; elles permettent d'accéder aux variations de la densité et de la teneur en eau du matériau scanné et par ce biais, à des composantes du tronc telles que le duramen, l'aubier et les nœuds (principaux objets étudiés dans la thèse).

Ce travail est à rapprocher de celui d'autres personnes en liens étroits avec notre équipe ; il s'inscrit dans la continuité de celui de Saint-André (1998) qui, dans le cadre de sa thèse, avait travaillé sur l'évaluation de caractéristiques internes des billons, à partir de mesures externes de leur forme obtenues par un scanner optique multi-points ; il fait également suite à un travail préliminaire entrepris par une équipe française du CIRAD de Montpellier sur la reconstruction 3D de tiges à partir de coupes obtenues par un scanner médical (Jaeger et al., 1999). Dans les deux cas, du matériel était commun à celui de notre étude.

Le chapitre 1 est consacré à une revue de la bibliographie. Le lecteur intéressé pourra se reporter à une première partie (§ 1.1) traitant des différents procédés d'investigation de la qualité interne des bois ronds avec : les méthodes destructives, les analyses à partir d'observations effectuées sur la surface externe des billons, et enfin, les techniques d'investigation non destructives telles que les micro-ondes, les ultra-sons, l'IRM, les scanners à rayons X ou gamma. Ces derniers font l'objet d'un développement plus détaillé, des scanners médicaux (principalement utilisés en recherche, c'est le type de scanner ayant permis d'acquérir les données de notre étude) aux prototypes industriels. La seconde partie bibliographique (§ 1.2) nous concerne plus directement puisqu'elle présente un état de l'art des algorithmes de détection des défauts et/ou caractéristiques à partir d'images tomographiques de bois ronds obtenues par rayons X.

Le matériel végétal ainsi que la base de données "images" à traiter sont décrits dans le chapitre 2. Une sous-partie est également consacrée à des généralités sur les rayons X et sur le principe de fonctionnement d'un scanner tel que celui utilisé dans notre étude.

Enfin, les résultats obtenus au cours de la thèse sont présentés et discutés dans le chapitre 3 ainsi que dans les articles (cf. annexes). Trois caractéristiques internes de nos billons ont été particulièrement étudiées : la moelle, le couple aubier/duramen et la nodosité.

Les nœuds ainsi que la limite aubier/duramen étaient des éléments majeurs présents sur nos images ; c'est pourquoi, nous avons orienté notre travail vers leur détection. Cependant, pour ce faire, la position de la moelle est rapidement apparû nécessaire. En outre, une information sur sa position permet d'accéder à des critères tels que l'excentricité des sections (et, par ce biais, à des propriétés

technologiques). La sous-section 3.1 concerne donc la moelle, sa détection (détaillée dans l'**article I**) et l'analyse de ses variations longitudinales en diamètre et en densité.

La détection de la limite aubier/duramen (présentée au § 3.2 et détaillée dans l'**article II**) était, quant à elle, nécessaire pour la mise au point de méthodes de détection distinctes des nœuds dans le duramen d'une part et dans l'aubier d'autre part. Par ailleurs, la zone d'aubier est une caractéristique physiologique importante car, détectée sur la base de sa teneur en eau, elle peut être assimilée à la zone conductrice du tronc. Une analyse de variabilité intra- et inter-arbre a été réalisée sur les quantités d'aubier et de duramen détectées dans les arbres (analyses présentée dans l'**article III**). Ce type d'analyses montre l'étendue des possibilités offertes par le scanner pour l'investigation de propriétés internes des arbres.

La section 3.3 concerne la détection de l'écorce sur les images tomographiques. Ce travail n'a été qu'initié dans le cadre de la thèse, des pistes sont données mais les travaux doivent être poursuivis ultérieurement.

Enfin, la dernière partie de ce travail (§ 3.4) est consacrée à la nodosité, avec la mise au point d'algorithmes pour la localisation des verticilles (**article IV**) et pour la détection des branches, en vue d'une reconstruction 3D et d'une analyse de leurs caractéristiques (position longitudinale, azimuth, inclinaison, diamètre, quantité). La partie concernant la détection des branches, n'ayant pas fait l'objet d'une publication, est plus détaillée que les précédentes.

Les **articles I à IV**, qui constituent la partie centrale du travail réalisé pendant la thèse, sont disponibles en annexe de ce document. La **Figure 1** illustre les connexions entre les différents articles ainsi que les analyses additionnelles réalisées. Les flèches verticales épaisses représentent la trame principale, basée sur la mise au point des algorithmes de détection. Les flèches horizontales concernent les analyses de variabilité réalisées à partir des composantes (moelle et limite aubier/duramen) détectées dans les billons.

Les résultats qui découlent de ce travail peuvent servir de base aussi bien à des investigations scientifiques (analyses de variabilité de la forme et de la distribution de caractéristiques internes (moelle, aubier, duramen, nœuds) en fonction de facteurs divers tels que les conditions de croissance ; meilleure compréhension des mécanismes de croissance des arbres et amélioration des connaissances physiologiques (zone de conductivité du tronc)), qu'à des applications industrielles (tri des billons en fonction de leurs caractéristiques, simulation et optimisation du sciage, tri des produits sciés, distribution de l'eau dans les produits sciés).

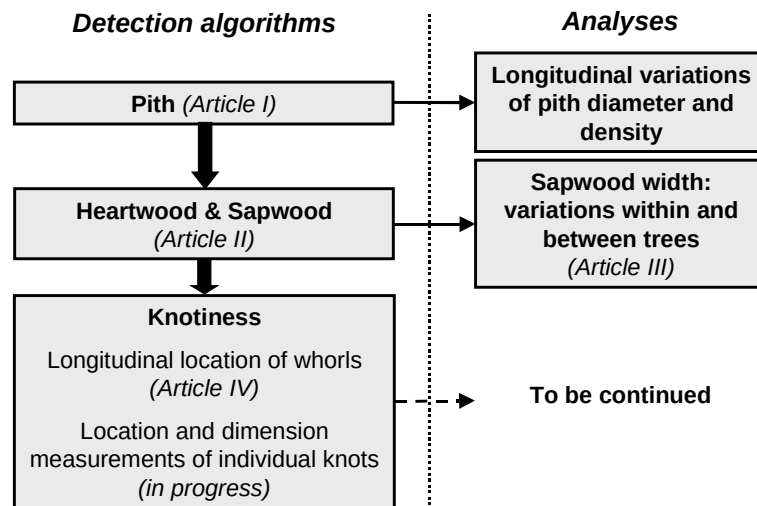


Figure 1 : Liens entre les différentes parties (articles et analyses complémentaires) constituant le corps de la thèse.

Fig. 1. Links between the different sections (papers and additional analyses) constituting the thesis body.

1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous présentons une revue bibliographique sur deux thèmes principaux concernant l'imagerie volumique des bois ronds.

Le premier (§ 1.1) concerne les différents procédés permettant d'accéder aux caractéristiques internes des billons : des méthodes purement destructives, à des méthodes non destructives telles que l'analyse de la surface externe des billons ou bien, l'investigation interne par des procédés pénétrants tels que les micro-ondes, les ultra-sons, l'IRM, les rayons X, etc. Un développement plus détaillé est consacré aux scanners à rayons X (ou gamma), qu'ils soient médicaux ou expérimentaux (le scanner ayant servi à acquérir les données de la thèse étant un dispositif médical).

Le second (§ 1.2) a pour objet les algorithmes de détection des caractéristiques internes à partir d'images tomographiques obtenues par rayons X. Cette partie concerne plus directement le sujet de la thèse qui était la mise au point de méthodes de détection automatiques en vue de l'analyse de certaines caractéristiques telles que les quantités d'aubier et de duramen ou bien les branches.

1.1. Les différents procédés d'investigation des caractéristiques internes de billons de bois

Habituellement, l'analyse des caractéristiques internes des billons implique de procéder de manière destructive. Harless et al. (1991) ont découpé leurs billons en rondelles sur lesquelles ils ont détourné les défauts, afin de simuler des sciages tenant compte de la position de ces derniers. Lemieux et al. (1997a; 1997b) ont utilisé des déroulages pour caractériser les nœuds dans des billons d'Epicéa. Pinto et al. ont analysé les nœuds (2003) et la répartition aubier/duramen (2004) dans des billons de Pin maritime à partir de l'analyse de la surface de planches. Il est également possible de travailler sur des sections transversales du billon. Cette façon de procéder, courante dans le cadre d'analyses scientifiques, est coûteuse en temps et en main d'œuvre. De plus, elle n'est pas envisageable en industrie où l'objectif est d'optimiser les débits.

La méthode non-destructive la plus répandue consiste à examiner l'enveloppe externe du billon afin d'obtenir une information sur ses caractéristiques internes. Notamment, les praticiens (acheteurs de bois ronds, scieurs) s'appuient sur un examen visuel de la surface du billon et sur des connaissances empiriques non formalisées pour prendre leurs décisions. Ce sont en général des personnes très expérimentées et formées spécifiquement pour cela. Parallèlement, les scientifiques ont mis en place des études afin d'établir des modèles reliant la forme externe des billons à leurs

caractéristiques internes, ces modèles étant destinés à la prédiction de la qualité interne à partir de mesures de la surface externe réalisées par des scanners optiques. Grace (1993), à partir d'un dispositif de type "cubeur" (mesure de deux diamètres à 90° l'un de l'autre par "ombre portée"), a relié la "rugosité" de la surface des billons à un indice de nodosité. Les scanners optiques multi-points permettent une description plus précise de la surface de la grume (souvent 36 points pour décrire une section). Saint-André et al. (1999; 2000) et Saint-André & Leban (2000; 2001) ont établi des modèles de prédiction pour la position de la moelle, la forme et le nombre des cernes à partir de la forme externe de billons d'Épicéa obtenue par un scanner optique multi-points. Lundgren (2000) a mis au point un classement des billons en fonction de leur forme et de leur nodosité, ces caractéristiques étant déterminées à partir de mesures externes : irrégularité de la surface, défilement, ellipticité des sections, rectitude du billon. Warensjö et al. (2002) ont tenté de modéliser la présence de bois de compression³ mais cela s'est révélé difficile à partir de la forme externe du billon uniquement, des arbres droits pouvant en effet contenir du bois de compression. Bien que les scanners optiques soient de plus en plus répandus dans les scieries, leur utilisation reste souvent cantonnée à des mesures simples (défilement et volume principalement). En outre, l'accès aux caractéristiques internes est limité et ne peut se faire que par l'intermédiaire de modèles.

Enfin, des procédés plus sophistiqués permettent, en plus de l'information sur la forme externe des billons, d'accéder directement à leur structure interne : scanners à rayons X ou gamma, imagerie par résonance magnétique (IRM) (cf. § ci-après), micro-ondes (Hailey & Morris, 1987; Kaestner & Baath, 2000; Johansson et al., 2003), ultrasons (Mahler & Hauffe, 2000 ; Birkeland & Han, 1991 dans Chang, 1992 ; Nicolotti et al., 2003), ondes de choc (Wang et al., 2004), résistivité (Nicolotti et al., 2003; Larsson et al., 2004). Hailey & Morris (1987) ont dressé un récapitulatif des différentes méthodes d'investigation disponibles et ont mis en avant un intérêt pour les rayons X et l'IRM. Un léger avantage est donné, dans cette étude, à l'IRM car elle fournit une information sur la composition chimique du matériau scanné tandis que les rayons X aboutissent à des cartes de densité ne dépendant pas seulement du bois mais également de sa teneur en eau. Chang (1992), dans un rapport destiné à identifier les besoins de l'industrie du bois aux États-Unis et les manières d'y répondre, a présenté une revue des différentes méthodes existant pour la détection des défauts internes dans des billons de feuillus. Une comparaison de trois procédés (ondes sonores, ondes radar et rayons X) d'évaluation des défauts internes dans des billons de résineux est donnée dans (Schad et al., 1996). Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus par la tomographie à rayons X. Mahler & Hauffe (2000) avec le même objectif se sont intéressés à la comparaison entre les rayons X et les ultrasons. Enfin, une revue

³ Il existe deux types de bois de réaction : le bois de compression chez les conifères et le bois de tension chez les feuillus. Il s'agit de bois qui présente des caractères anatomiques plus ou moins distinctifs ; il se forme typiquement dans les portions de tiges penchées ou courbées et dans les branches ; tout se passe comme si le végétal s'efforçait de reprendre une position normale en réagissant de la sorte (Métro, 1975).

complète et détaillée des techniques d'imagerie non destructives du bois citées ci-dessus se trouve dans Bucur (2003a; 2003b).

Bien que des travaux conséquents aient été consacrés à des investigations de la structure interne des bois ronds par IRM (Chang et al., 1989; Chang, 1990; Contreras et al., 2002; Morales et al., 2002; 2004), ce sont les rayons X ou gamma qui ont été choisis par la plupart des groupes travaillant sur ce thème. Les rayons X semblent en effet plus prometteurs pour l'analyse des propriétés internes du bois avec notamment un meilleur niveau de détail (Chang, 1992). Par exemple, des zones à faible humidité comme l'écorce n'apparaissent pas sur les images obtenues par IRM. Par ailleurs, une vitesse d'acquisition trop lente ne permet pour l'instant pas d'envisager une quelconque utilisation en industrie.

Un des précurseurs de l'application des rayons X à l'analyse du bois fut Polge dans les années 60 ; il a notamment étudié la densité du bois à partir de clichés radiographiques d'échantillons (Polge, 1966).

En ce qui concerne la tomographie à rayons X, les scanners médicaux ont été largement utilisés dans les laboratoires de recherche et le sont encore. Cette technologie, largement éprouvée, est transférable à l'étude du matériau bois comme plusieurs études exploratoires l'ont prouvé (Benson-Cooper et al., 1982; Lindgren, 1991a; Davis & Wells, 1992). Les images obtenues sont de haute résolution et permettent l'analyse des propriétés internes du bois et de leur distribution. L'utilisation des ces scanners convient parfaitement en recherche avec comme objectifs possibles : des analyses de la branchaison (Oja, 1996, 1997; Björklund & Petersson, 1999) et de défauts divers tels que les poches de résine, la pourriture ; des analyses de la densité du bois (Lindgren, 1991a) et de la répartition de l'eau dans le tronc (zone de conductivité) (Tognetti et al., 1996; Rust, 1999; Fromm et al., 2001). Bien qu'une utilisation industrielle de ces scanners ne soit pas envisageable, ce matériel n'étant à la base pas conçu pour cela, ils permettent néanmoins d'expérimenter une utilisation future de cette technologie en scierie.

Des études sur le plan économique, de la rentabilité d'équipements de tomographie dans les scieries, ont été menées par plusieurs groupes de recherche. De nombreuses études ont montré qu'une stratégie de sciage (orientation du billon) permettait d'augmenter significativement les gains. Un tableau récapitulatif des différents travaux réalisés est disponible dans Schmoldt et al. (2000b). Harless et al. (1991) ont notamment montré qu'une stratégie de sciage établie en fonction de la localisation des défauts dans le billon permettait d'augmenter significativement la valeur (augmentation en qualité plutôt qu'en volume) des planches produites. En ce qui concerne l'investissement, il serait rentable dans les grosses scieries même avec une augmentation modérée de la valeur des planches produites. En revanche, pour les scieries de petite taille, une augmentation de l'ordre de 30% de la valeur des planches serait nécessaire afin d'amortir l'investissement (Hodges et al., 1990).

En ce qui concerne la faisabilité sur le plan technique, les scanners installés en scieries doivent être rapides (vitesses de traitement de l'ordre de 2 à 3m/s) et adaptés à leur environnement (poussières,

vibrations, utilisation intensive, diamètre des billons). Wagner et al. (1989) ont scanné un billon de Chêne dans un scanner médical “ultra-rapide” (Imatron C-100) pouvant acquérir 34 coupes par seconde. Les défauts étaient clairement visibles sur les images obtenues. Par ailleurs, Thawornwong et al. (2000; 2003) n’ont pas observé de réduction significative de la valeur des planches produites en simulant des réductions de résolution du scanner (pas longitudinal, épaisseur du faisceau, taille des pixels) afin d’augmenter la vitesse de traitement. Ces résultats obtenus pour la réduction de la vitesse d’acquisition ont encouragé la mise au point d’algorithmes de détection automatique en vue d’une possible utilisation industrielle. De plus, des prototypes spécialement conçus pour l’industrie ont déjà vu le jour et certains sont actuellement en test dans plusieurs scieries.

En Suède, un scanner à rayons gamma du nom de “Tina”, mis au point par la firme RemaControl à la fin des années 70, a été installé dans deux scieries. Deux sources fixes de rayons gamma sont disposées à angle droit et placées à 100° l’une de l’autre. Ce dispositif, déjà ancien, fournit un faible rapport signal sur bruit et ne permet qu’une localisation longitudinale des défauts, ceux de taille importante uniquement. De plus, il y a un risque lié aux radiations émises par les isotopes radioactifs. Des tubes à rayons X et des détecteurs de meilleure qualité existent aujourd’hui. Des études plus récentes ont été menées afin de mettre au point un scanner industriel à grume appelé “X-Ray Log Scanner” (Anon., 2000). Ce scanner devant permettre notamment une localisation plus précise des défauts avec une information sur leur position radiale et tangentielle. Les images que fournirait un tel dispositif ont été simulées à partir d’images tomographiques obtenues par un scanner médical. La conception de cette machine et les algorithmes de contrôle ont été établis sur la base des images ainsi simulées. En particulier, plusieurs études de faisabilité ont été réalisées à partir de la simulation d’un scanner industriel à deux sources de rayons X et des détecteurs en ligne pour chaque source, la plupart sont décrites dans la thèse de Grundberg (1999). Le “X-ray Log Scanner” a été construit par RemaControl et est actuellement en fonctionnement à Hasselfors en Suède. Une étude complémentaire a été conduite par Magnusson Seger & Danielsson (2003) en simulant le remplacement des détecteurs en ligne par des surfaces de détecteurs (plusieurs barrettes placées côte à côte) afin d’améliorer la détection des nœuds ; une étude de faisabilité pour la segmentation des branches est donnée dans Flood et al. (2003).

Le scanning tangentiel des billons a également été testé en vue d’augmenter les vitesses de traitement. Dans ce cas, la barrette de détecteurs ainsi que la source de rayons X en éventail sont orientées de façon à acquérir des données dans la direction longitudinale du billon. Ce dernier est en rotation tandis qu’une translation du billon (ou de la source) perpendiculairement au faisceau en éventail est effectuée. La collecte des données par scanning tangentiel peut ainsi s’apparenter à un processus de déroulage du billon. Ce dispositif permet d’acquérir de l’information sur plusieurs coupes simultanément. Il permet également d’éviter l’acquisition de données inutiles provenant de l’extérieur de billon. Un prototype a été mis au point en collaboration avec la société Omega Technology, Inc (Gupta et al., 1999; Schmoldt et al., 1999). Des optimisations sont nécessaires au niveau du matériel

(système de rotation et de translation, source et détecteurs). La limitation la plus évidente est l'absence d'un algorithme rapide et efficace pour la reconstruction des images.

Un prototype de haute résolution fonctionnant sur le même principe que les scanners médicaux a également fait son apparition dans une scierie autrichienne. Les chercheurs de l'institut Joanneum Research en Autriche travaillent à partir d'un de ces prototypes mis au point par Invision Technologies et installé chez Schaffer GmbH (<http://www.schaffer.co.at/>) (Anon., 2005a). L'acquisition est réalisée à une vitesse de 1.5m/mn.

Dans un registre légèrement différent, des dispositifs mobiles, permettant l'analyse d'arbres sur pied, ont également été utilisés. Habermehl (1982a; 1982b) s'est principalement intéressé à la détection de la pourriture au pied des arbres. D'autres expériences ont été menées pour la détection du cœur rouge du Hêtre (Schwartz-Spornberger, 1990; Seeling et al., 1999). Ce type de scanner permet aussi un suivi dans le temps de la teneur en eau des arbres sur pied (Tognetti et al., 1996).

L'analyse du bois par des dispositifs à rayons X est en pleine expansion. Des sociétés telles que l'italien Microtec ou le suédois RemaControl sont spécialisées dans les équipements de "scanning" et d'optimisation pour scieries, que se soit sur bois ronds ou sur planches. De plus, d'importantes sociétés, spécialisées dans la fabrication de scanners dédiés notamment à la sécurité des transports, ont étendu leur champ d'activité à l'industrie du bois. C'est le cas d'Invision Technologies aux Etats-Unis, avec la création en février 2000 de sa filiale WoodVision et sa fusion avec Inovec un leader dans la fabrication d'équipements lasers pour l'optimisation de la production dans la filière bois. La firme allemande Heimann Systems s'intéresse également à la filière bois, même si contrairement au scanner d'Invision il ne s'agit pas ici d'un dispositif tomographique – les rayons X sont simplement transmis à travers l'objet, il n'y a pas d'étape de reconstruction de l'image. Le prototype de scanner industriel le plus puissant actuellement semble être celui récemment installé chez Forintek au Canada. Il a été conçu par Bio-Imaging Research, l'une des rares sociétés capables de fournir des scanners industriels hautement puissants. Le **Tableau 1** donne quelques éléments supplémentaires sur les constructeurs cités ci-dessus : référence du scanner, nombre de sources de rayons X (fixes ou en rotation), résolution transversale, vitesse d'avance et site Internet de la société. Par ailleurs, un descriptif assez complet des différents types de scanners utilisés dans l'industrie du bois et de leur constructeur respectif est donné dans Hauffe (2001).

Tableau 1 : Fabricants de scanners à rayons X (autres que médicaux) ayant eu au moins une application “bois”.

Table 1. Manufacturers of X-ray scanners (other than medical) having had at least one wood application.

<i>Fabriqueur (Manufacturer)</i>	<i>Référence du scanner (Scanner reference)</i>	<i>Nombre de sources (R-X ou gamma) et de récepteurs (Number of X-ray sources and detectors)</i>	<i>Résolution transversale (mm) (Cross resolution)</i>	<i>Vitesse (Speed)</i>	<i>Site Internet (Website)</i>
Microtec	Tomolog (dédié “bois”)	1 à 3 sources fixes associées à 1 à 3 détecteurs en ligne	→ 0.8	200m/mn	http://www.microtec.org
RemaControl	TINA (dédié “bois”)	2 sources fixes de rayons gamma		120m/mn	http://www.rema.se
	RemaLog XRay (dédié “bois”)	2 sources fixes (en éventail) associées à 2 barres de détecteurs		125m/mn	
Inovec/ WoodVision (Invision Technologies)	CTX 2500	1 source et détecteurs (480) en rotation	1.55	1.5m/mn	http://www.geindustrial.com/ge-interlogix/homelandprotection/
Heimann Systems					http://www.smiths-heimann.de/
Omega International Technology, Inc.		1 source et une barrette de détecteurs orientées dans la direction du billon (rotation + translation du billon)			http://user.mc.net/omegait/index.html
Bio-Imaging Research		1 source et 1 barrette de détecteurs. Au choix : 2 ^{ème} (translation + rotation) et 3 ^{ème} (rotation) générations	≈ 0.25 (résolution + élevée avec le procédé de 2 ^{ème} génération)	20s/coupe (3 ^{ème} génération) 3 à 10mn /coupe (2 ^{de} génération)	http://www.bio-imaging.com/

Il est donc probable que dans un futur relativement proche, les scieries s'équipent en masse de scanners d'investigation non-destructive afin d'optimiser leurs débits. Comme nous l'avons vu précédemment, certaines, travaillant en collaboration avec des laboratoires de recherche, se sont déjà dotées de prototypes de ces scanners “industriels” afin d'en évaluer les possibilités. Ces dispositifs ont des vitesses d'acquisition plus rapides que les scanners médicaux mais ont en contrepartie une résolution plus faible. Les scanners doivent donc encore évoluer sur le plan technique, c'est-à-dire qu'ils doivent être capables d'acquérir l'information à des vitesses industrielles, tout en gardant une résolution suffisante et cela dans un environnement a priori assez difficile (poussières, vibrations, utilisation intensive, etc.). Parallèlement, les coûts d'achat et de maintenance des scanners doivent baisser. Des efforts doivent également être faits pour le développement d'algorithmes afin d'exploiter l'information contenue dans les images tomographiques, ces traitements devant être optimisés (robustesse, précision, temps d'exécution) et autant que possible entièrement automatiques.

1.2. Etat de l'art des procédures automatiques de détection à partir d'images tomographiques de bois ronds

Cette section est consacrée à un état de l'art des **algorithmes de détection** de caractéristiques du bois à partir d'images de **bois ronds** obtenues par **tomographie à rayons X** (ou gamma). La revue bibliographique présentée est organisée par type d'objets détectés (moelle, cernes de croissance, aubier, nœuds, etc.).

Des algorithmes de détection ont pu être développés à partir d'autres types d'images (photos numériques, images infrarouges, IRM, micro-ondes, etc.). Dans le cas où ces algorithmes seraient applicables à des images tomographiques (c'est le cas notamment en ce qui concerne la détection de la moelle et des cernes de croissance), ils pourront être mentionnés comme des pistes potentiellement intéressantes.

En introduction à cette partie bibliographique, les principales équipes travaillant sur l'analyse d'images tomographiques de bois ronds ont été répertoriées dans le **Tableau 2**. Ce tableau fournit pour chaque équipe les informations suivantes : type de scanner utilisé⁴, essences de bois traitées, état d'humidité du bois lors de son passage dans le scanner et caractéristiques étudiées et/ou détectées à partir des images (les caractéristiques ayant fait l'objet d'une détection automatique, ou d'un travail en ce sens, ont été grisées). Le **Tableau 3** donne, quant à lui, des renseignements d'ordre technique sur les scanners et les images utilisés dans les études. Les travaux réalisés à partir de scanners micrométriques ne sont pas présentés, ce type de scanners ne permettant pas le traitement de bois ronds. D'après le **Tableau 2**, il apparaît d'ores et déjà que certaines caractéristiques ont été plus étudiées que d'autres. C'est notamment le cas des nœuds qui représentent un défaut majeur en industrie et qui ont, par conséquent, fait l'objet de nombreux travaux en vue de les analyser ou de les détecter. Au contraire, des caractéristiques telles que l'angle du fil ou le bois de compression ont été très peu regardées à partir d'images tomographiques de bois ronds, sans doute parce qu'elles sont plus difficiles à détecter et à mesurer.

⁴ Toutes les équipes ne possèdent pas leur propre scanner, certaines ont travaillé en coopération avec d'autres équipes ou assez fréquemment avec des hôpitaux locaux. Dans certaines études, les images à étudier ont été reconstruites à partir d'images tomographiques obtenues par des scanners médicaux afin de simuler les sorties de scanners industriels plus rapides mais de résolution plus faible.

Tableau 2 : Principales équipes de recherche travaillant sur l'analyse ou la détection de caractéristiques du bois à partir d'images obtenues par tomographie à rayons X (ou gamma) de bois ronds.

Table 2. Main research teams working on the analysis or detection of wood characteristics using CT images of round wood.

Localisation géographique (geographic location)	Europe (Europe)			Océanie (Oceania)		Amérique du nord (North America)		Amérique du sud (South America)
	Allemagne (Germany)	Suède (Sweden)	Autriche (Austria)	Nouvelle-Zélande (New-Zealand)	Australie (Australia)	USA (USA)	Canada (Canada)	Brésil (Brazil)
Équipes^(a) (Teams)	Université de Marburg/Lahn [1] Université de Munich [2] Université de Freiburg [3]	Université de Luleå, Skellefteå [4] Université de Linköping [5] Université de Uppsala [6]	Joanneum Research [7]	[8]	Université de Monash [9]	Université de Georgia, Athens [10] Virginia Tech, Blacksburg ; USDA Forest Service ; Université du Mississippi [11]	Université Simon Fraser, Vancouver [12] Forintek [13]	Embrapa Agricultural Instrumentation, Sao Carlos-SP ; Embrapa Forest, Colombo-PR [14]
Scanners (Scanners) Type et identifiant^(b) (Type and identifier)	MCT-3, MCT-30 (scanners portables) [A] ^{[1] et [3]} Siemens Somatom Plus [B] ^[2] Siemens Somatom AR. HP [C] ^[2]	TINA RemaControl (industriel) [D] GE 9800 Quick [E] Siemens Somatom AR. T. [F]	Invision CTX 2500 (prototype industriel) [G]	Technicare Delta 2020 [H]	EMI CT1010 [I] Scanner portable à acquisition rapide [J] GE 9800 Genesis [K]	Toshiba TCT 20AX [L] ^[10] Siemens Somatom DR2 [M] ^[11]	Siemens Somatom DR2 [N] ^[12] Siemens Somatom Plus [O] ^[13] Prototype industriel haute puissance (Bio-Imaging) [P] ^[13]	Scanner portable [Q] Scanner millimétrique [R]

Localisation géographique (geographic location)	Europe (Europe)			Océanie (Oceania)		Amérique du nord (North America)		Amérique du sud (South America)
	Allemagne (Germany)	Suède (Sweden)	Autriche (Austria)	Nouvelle-Zélande (New-Zeland)	Australie (Australia)	USA (USA)	Canada (Canada)	Brésil (Brazil)
Essences traitées Français (Latin) (Species)	Epicéa (<i>Picea</i>), Tilleul (<i>Tilia</i>), Châtaignier (<i>Castanea</i>), Chêne (<i>Quercus</i>), Orme (<i>Ulmus</i>), Frêne (<i>Fraxinus</i>) etc. ^[1] Epicéa commun (<i>Picea abies</i>) et Chêne pédonculé (<i>Quercus robur</i>) ^[2] Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i> L.) ^[3]	Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i>) et Epicéa commun (<i>Picea abies</i>)	Epicéa commun (<i>Picea abies</i>)	Pin de Monterey (<i>Pinus radiata</i>), Acacia à bois dur (<i>Acacia melanoxylon</i>) Douglas (<i>Pseudotsuga</i>), Eucalyptus (<i>Eucalyptus delegatensis</i>), Faux hêtre sombre (<i>Nothofagus fusca</i>)	Pin de Monterey (<i>Pinus radiata</i>), Cyprès bleu (<i>Callitris intratropica</i>), Eucalyptus (<i>Eucalyptus regnans</i> , <i>delegatensis</i> et <i>marginata</i>) ^[4]	Frêne blanc (<i>Fraxinus americana</i>), Chêne rouge (<i>Quercus rubra</i>), Noyer noir (<i>Juglans nigra</i>) et Erable à sucre (<i>Acer saccharum</i>) ^[10]	Tsuga de l'Ouest (<i>Tsuga heterophylla</i>), Douglas (<i>Pseudotsuga</i>), Cèdre (<i>Cedrus</i>) ^[12]	Eucalyptus (<i>Eucalyptus grandis</i> et <i>saligna</i>)
Humidité du billon lors de l'examen (Moisture content when scanning)	Frais : arbres sur pied ^[1] et ^[2] Coupes scannées à l'état frais puis après séchage ^[2]	Frais	Frais	Frais	Frais	Frais ^[10] Sections de billons scannées à l'état frais ^[11]	Billons scannés avant et après séchage ^[12]	

Localisation géographique (geographic location)	Europe (Europe)			Océanie (Oceania)		Amérique du nord (North America)		Amérique du sud (South America)
	Allemagne (Germany)	Suède (Sweden)	Autriche (Austria)	Nouvelle-Zélande (New-Zealand)	Australie (Australia)	USA (USA)	Canada (Canada)	Brésil (Brazil)
Etudes préliminaires (Preliminary studies)	(Zu Castell et al., 2005) ^[2]	(Grundberg & Grönlund, 1991) ^[4] (Magnusson Seger & Danielsson, 2003) ^[5]		(Benson-Cooper et al., 1982)	(Davis & Wells, 1992)	(Zhu et al., 1991a, 1991b) ^[11]	(Alkan, 2002; Lister, 2004) ^[13]	
Principales caractéristiques analysées et/ou détectées^(e, f) (Characteristics)								
Moelle (Pith)		(Flood et al., 2003) ^[8]	(Andreu & Rinnhofer, 2001, 2002)		(Som et al., 1993; Som et al., 1995)	(Bhandarkar et al., 1996; Bhandarkar et al., 1999) ^[10]		
Cernes de croissance (Annual rings)			(Andreu & Rinnhofer, 2001, 2002)		(Wells et al., 1991; Som et al., 1993)			
Aubier, duramen (Sapwood, heartwood)	(Habermehl, 1982a, 1982b; Tognetti et al., 1996) ^[1] (Fromm et al., 2001) ^[2]	(Grundberg & Grönlund, 1992) ^[4] (Björklund, 1999) ^[6]				(Schmoldt et al., 2000a) ^{[11] (g)}		
Densité (Density)	(Fromm et al., 2001) ^[2]	(Lindgren, 1991a; Lindgren, 1991b; Lindgren et al., 1992)			(Davis & Wells, 1992)			(Macedo et al., 2002)

Localisation géographique (geographic location)	Europe (Europe)			Océanie (Oceania)		Amérique du nord (North America)		Amérique du sud (South America)
	Allemagne (Germany)	Suède (Sweden)	Autriche (Austria)	Nouvelle-Zélande (New-Zealand)	Australie (Australia)	USA (USA)	Canada (Canada)	Brésil (Brazil)
Nœuds (Knots)		(Flood et al., 2003) ^[5] (Grundberg & Grönlund, 1992; Nordmark, 2002) ^[4] (Oja, 1996) ^[4]	(Andreu & Rinnhofer, 2003a, 2003b)		(Wells et al., 1991; Som et al., 1993; Som et al., 1995)	(Bhandarkar et al., 1996; Bhandarkar et al., 1999) ^[10] (Zhu et al., 1996; Schmoldt et al., 2000a; Sarigul et al., 2003) ^[11]	(Funt, 1985; Funt & Bryant, 1987) ^[12]	
Fentes, trous (Cracks, holes)			(Andreu & Rinnhofer, 2003b)		(Wells et al., 1991; Som et al., 1995)	(Bhandarkar et al., 1996; Bhandarkar et al., 1999) ^[10] (Schmoldt et al., 2000a; Sarigul et al., 2003) ^[11]		(Cruvinel et al., 2003) ^{avec USDA Maryland}
Ecorce (Bark)						(Zhu et al., 1996; Schmoldt et al., 2000a; Sarigul et al., 2003) ^[11]		
Poches de résine, gomme (Resin or gum pockets)		(Temnerud & Oja, 1998; Oja & Temnerud, 1999) ^[4]	(Parziale & Rinnhofer, 2003)		(Som et al., 1995)			
Pourriture (decay, rot)	(Habermehl, 1982a, 1982b; Habermehl et al., 1999) ^[5]		(Petutschnigg et al., 2002)		(Som et al., 1995)	(Schmoldt et al., 2000a; Sarigul et al., 2003)	(Funt, 1985; Funt & Bryant, 1987) ^[12]	
Cœur rouge du Hêtre (Red heart of Beech)	(Schwartz-Spornberger, 1990; Seeling et al., 1999) ^[5]							

Localisation géographique (geographic location)	Europe (Europe)			Océanie (Oceania)		Amérique du nord (North America)		Amérique du sud (South America)
	Allemagne (Germany)	Suède (Sweden)	Autriche (Austria)	Nouvelle-Zélande (New-Zealand)	Australie (Australia)	USA (USA)	Canada (Canada)	Brésil (Brazil)
Angle du fil (Fiber orientation)		(Sepulveda et al., 2002; Sepulveda et al., 2003) ^a						
		(Ekevad, 2004) ^a						

^a Un numéro est attribué à chaque groupe de recherche sur la base de l'université ou du laboratoire auquel il est rattaché.

^b Une lettre est attribuée à chaque scanner utilisé par les équipes pour leur travaux. Cet identifiant permet d'accéder aux caractéristiques et réglages du scanner (Tableau 3).

^c Essences traitées dans (Zhu et al., 1991c).

^d Essences traitées dans (Schmoldt et al., 2000a).

^e La liste des références bibliographiques présentées dans ce tableau n'est pas exhaustive.

^f Nous avons cherché à mettre en évidence les travaux consacrés à de la détection automatique en grisant les cases correspondantes ; les cases non grisées pouvant concerner des études de faisabilité ou des analyses de forme ou de distribution s'appuyant sur des mesures manuelles.

^g Sur *Liriodendron tulipifera* uniquement car les limites aubier/duramen des autres essences traitées n'étaient pas visibles sur les images.

Tableau 3 : Caractéristiques et/ou réglages des scanners utilisés dans les différentes études.

Table 3. Characteristics and/or settings of scanners used in the different studies.

Identifiant du scanner ^(a) (Scanner identifier)	Equipes ^(b) (Teams)	Modèle (Reference)	Source (Source)	Energie (keV) (Energy)	Tension (kV) (Voltage)	Intensité (mA) (Intensity)	Isotope radioactif ^(c) (Radioactive isotope)	Taille des images (pixels) (Image size)	Résolution transversale (mm) (Cross resolution)	Epaisseur de coupe (mm) (Slice width)	Pas longitudinal (mm) (Longitudinal step)	Profondeur de images (bits) (Grey levels)	Diamètre des billons (mm) (aperture)
A	1, 3	MCT-3 ^(m) (translation + rotation), MCT-30 (rotation) (scanners portables)	Gamma	60 662			Am ²⁴¹ Cs ¹³⁷						
B	2	Siemens Somatom Plus	X		120	210			0.35	1		12 ^(d)	
C	2	Siemens Somatom AR. HP	X		130	200		512				12	
D	4, 5, 6	TINA RemaControl (industriel)	Gamma	300			Ir				20		
E	4, 5, 6	GE 9800 Quick	X		120	70		512	0.5	5	5	12 ^(d)	
F	4, 5, 6	Siemens Somatom AR. T.	X		110	50		512	< 1 ^(e)	5	10 ^(f)	12	
G	7	Invision CTX 2500 (prototype industriel)	X					512	1.55		20	12	
H	8	Technicare Delta 2020	X		120	40 à 200				1			
I	9	EMI CT1010	X	≈ 70	120	20 à 30			≈ 1				→ 230
J	9	Scanner portable à acquisition rapide	X		120	4		99 ou 149	1.5 à 3 ^(g)				→ 450
K	9	GE 9800 Genesis	X	120 ?	120	170		512	≈ 1	2 ou 10 ^(h)	10	12	→ 450
L	10	Toshiba TCT 20AX	X					320	0.75		5	8	
M	11	Siemens Somatom DR2	X					256 ou 512 ⁽ⁱ⁾	1 ou 2.5 ^(j)	8	25 ou 10 ^(k)	12	
N	12	Siemens Somatom DR2	X					256				11 ^(l)	
O	13	Siemens Somatom Plus	X		140								

Identifiant du scanner^(a) (Scanner identifier)	Equipes^(b) (Teams)	Modèle (Reference)	Source (Source)	Energie (keV) (Energy)	Tension (kV) (Voltage)	Intensité (mA) (Intensity)	Isotope radioactif ^(c) (Radioactiv e isotope)	Taille des images (pixels) (Image size)	Résolution transversale (mm) (Cross resolution)	Epaisseur de coupe (mm) (Slice width)	Pas longitudinal (mm) (Longitudinal step)	Profondeur de images (bits) (Grey levels)	Diamètre des billons (mm) (aperture)
P	13	Prototype industriel haute puissance (Bio-Imaging)	X	3500					≈ 0.25 ^(e)	0.5 à 5			→ 900
Q	14	Scanner portable	Gamma	662			Cs ¹³⁷		2				
R	14	Scanner millimétrique	Gamma	59.5			Am ²⁴¹		1				

^a La lettre fait référence à l'identifiant attribué à chaque scanner dans le *Tableau 2*.

^b Les numéros font référence aux équipes du *Tableau 2* ayant utilisé le scanner décrit dans la ligne.

^c Ce champ ne concerne que les scanners à rayons Gamma.

^d Conversion de 12 à 8 bits avant traitement.

^e Fonction du Ø du billon scanné.

^f 10mm partout pour les billons d'Epicéa et 10mm dans les verticilles et 40mm entre les verticilles pour les billons de Pin.

^g Respectivement 1.5 à 3mm pour des arbres de Ø 300 à 450mm.

^h 2mm dans (Wells et al., 1991) et 10mm dans (Som et al., 1995).

ⁱ 256 x 256 pour le Chêne et le Peuplier et 512 x 512 pour le Cerisier. Voir (Zhu et al., 1991c; Schmoldt et al., 2000a) pour les différents réglages.

^j 1mm pour le Cerisier et 2.5mm pour le Chêne et le Peuplier.

^k 25mm pour le Chêne et le Peuplier et 10mm pour le Cerisier.

^l Les niveaux de gris indiqués vont de 0 à 2047 soit un codage sur 11 bits.

^m Le numéro (3 ou 30) dans la référence du scanner correspond au nombre de détecteurs.

1.2.1. La moelle

La moelle est constituée des premières cellules mises en place à chaque nouvelle unité de croissance lors de la phase de croissance primaire. Lors de la même année, elle est recouverte par le premier cerne de croissance. Au cours des années, les cernes annuels vont s'empiler autour de cette structure, c'est la croissance secondaire. La moelle est donc localisée au centre de la structure des cernes annuels de croissance et, logiquement, la plupart des méthodes de détection vont s'appuyer sur cette structure pour la localiser. La moelle se situe également au point de départ des branches (l'axe des branches passe par la moelle) et des fentes de cœur. Sa détection est donc une étape préliminaire essentielle pour l'investigation de caractéristiques aussi variées que les cernes, les nœuds et les fentes.

Som et al.^[5] (1993; 1995) ont décrit un algorithme de localisation de la moelle sur des images tomographiques de *Pinus radiata*, *Callitris intratropica*, *Eucalyptus regnans* et *marginata*. D'abord, ils appliquent une détection de contours pour mettre en évidence la structure des cernes annuels (passage par zéro de la dérivée seconde ou opérations de morphologie mathématique). Puis, un comptage des tangentes horizontales et verticales aux cernes permet de situer la moelle à l'intersection des deux maximum (**Figure 13**). Pour améliorer la précision de la localisation, le comptage des tangentes peut être réitéré dans un sous-voisinage centré sur la position obtenue après la 1^{ère} itération. La méthode décrite présente l'avantage de ne pas faire d'hypothèse de circularité et de concentricité des cernes. Des résultats détaillés de la détection sont donnés pour 5 images, ce qui nous a permis de calculer une erreur moyenne (distance moyenne à la vraie position de la moelle) de 5.4 pixels, soit environ 5.4mm. Une erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée sur 32 sections est également donnée par les auteurs, elle est de 3.56 pixels en X et de 2.69 pixels en Y.

La majorité des algorithmes de détection de la moelle décrits dans la littérature mettent en œuvre des variantes d'une méthode appelée transformée de Hough (Hough, 1962; Duda & Hart, 1972). Cette méthode appartient à la famille des "algorithmes de vote". Il s'agit de détecter des formes paramétrées (droites, cercles, ellipses) dans une image à partir de points de contour détectés sur cette image. La détection s'effectue par recherche d'une accumulation dans l'espace des paramètres : (r, θ) pour une droite, (X_{centre} , Y_{centre} , R) pour un cercle, etc. Une étape de détection des contours visant à isoler des pixels appartenant aux cernes de croissance est nécessaire avant l'application d'une transformée de Hough. Ces algorithmes de Hough sont réputés robustes et ne nécessitent qu'une détection partielle et assez grossière des contours.

Bhandarkar et al.^[10] (1996; 1999) ont comptabilisé dans un tableau les paramètres (X_{centre} , Y_{centre}) de tous les cercles possibles passant par chaque pixel appartenant à un contour. Le tableau des

⁵ Les chiffre encadrés font référence au numéro de l'équipe attribué dans le *Tableau 2*.

paramètres, également appelé tableau d'accumulation, est ainsi incrémenté à chaque nouveau cercle. La localisation de la moelle correspond aux coordonnées (X_{centre} , Y_{centre}) ayant la fréquence la plus élevée dans le tableau. Les contours des cernes avaient été préalablement isolés par un opérateur de Canny. Les résultats de la détection sont données dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : Résultats de la procédure de localisation de la moelle décrite dans Bhandarkar et al. (1999).

Table 4. Results of the processing of pith localisation described in Bhandarkar et al. (1999).

Essences (Species)	Nombre d'images (Number of images)	Pourcentage d'images avec une précision pour la localisation inférieure à (Percentage of images with pith location precision within)		
		5 pixels	10 pixels	20 pixels
<i>Fraxinus americana</i>	424	74.2	93.6	96.8
<i>Quercus rubra</i>	633	60.5	83.0	98.9
<i>Juglans nigra</i>	456	83.2	97.8	100.0
<i>Acer saccharum</i>	663	54.5	77.3	99.0

Wu & Liew^[12] (2000) ont également utilisé une transformée de Hough mais l'ont appliquée à des photos (haute résolution 24-bit RGB) de sections de l'extrémité des grumes. Ils exploitent le fait que les droites orthogonales au contour d'un cercle se coupent au centre de ce cercle. Les pixels appartenant aux contours des cernes sont détectés par un opérateur de Sobel, puis ils sont sous-échantillonnés uniformément dans l'image. Pour chaque pixel restant, une droite perpendiculaire au contour (calcul de l'orientation du gradient à partir de masques 3 x 3 ou 7 x 7, l'algorithme utilisé n'est pas précisé) correspondant est "rasterisée"⁶. Les coordonnées (X, Y) les plus représentées dans le tableau d'accumulation correspondent à l'endroit où se coupent le plus grand nombre de droites et donc a priori à la position de la moelle au centre des cernes. Cependant, en raison d'une qualité peut-être trop faible des images traitées (difficile à juger à partir des photos de la publication) et d'une probable imprécision dans le calcul de l'orientation du gradient, ou bien en raison du sous-échantillonnage réalisé et d'un nombre de points de contour insuffisant, plusieurs pics d'accumulation, assez dispersés dans la zone de la moelle, sont obtenus. La position de la moelle est ensuite estimée par le calcul de la position moyenne de ces pics. La validation a été conduite à partir de 31 images de sections et est donnée sous la forme de courbes (une pour le masque 3 x 3 et une autre pour le masque 7 x 7) représentant la distribution des erreurs (distances à la vraie position de la moelle). Les résultats sont légèrement meilleurs pour le masque 7 x 7. La distribution est asymétrique avec un mode de 10 sections présentant une erreur de 1 pixel.

Andreu & Rinnhofer^[7] (2001; 2002) ont mis en œuvre une transformée de Hough mais en utilisant cette fois la propriété que la médiatrice d'une corde dans un cercle passe par le centre de ce

⁶ Le tracé d'une droite dans une image implique de la discrétiser, c'est-à-dire que la droite est représentée non plus par une équation mais par un ensemble de pixels appartenant à l'image. L'algorithme de Bresenham (1965) est un algorithme classique de rasterisation.

cercle. La méthode de détection des contours utilisée ici est un peu plus recherchée : l'image d'origine est tout d'abord découpée en sous-images, puis dans chaque sous-image une transformée de Fourier permet d'extraire des paramètres de fréquence et d'orientation des cernes, enfin, l'application d'un filtre passe-bande réglé sur ces paramètres (filtre de Gabor) permet de débruiter l'image et de détecter les contours des cernes. Des résultats de la détection de la moelle sont donnés pour le traitement de 270 images tomographiques d'un billon d'Epicéa relativement courbé. L'erreur moyenne (distance moyenne à la vraie position de la moelle) dans ce billon est de 2.2 pixels (écart-type = 1.2), soit 3.4mm, l'erreur maximum ayant été obtenue pour une section contenant des nœuds. Finalement, l'algorithme a été testé sur plus de 1000 images et l'erreur moyenne obtenue était de 2.7 pixels (écart-type = 1.7).

Chalifour et al. (2001) ont développé une méthode différente des approches par transformée de Hough. Les images traitées sont des photos de sections. Après un lissage Gaussien visant à éliminer le maximum de bruit des images, des pixels, appartenant aux cernes de croissance, sont sous-échantillonnés (opérateur de Sobel pour la détection de contours puis sous-échantillonnage par tirage aléatoire des pixels). Pour chaque pixel retenu, ses coordonnées sont notées (x_i, y_i) et l'orientation de son gradient est notée θ_i . Comme dans Wu & Liew (2000), l'auteur utilise la propriété que des droites orthogonales aux contours se coupent au centre de la structure. Une première approximation des coordonnées (u, v) du centre (pseudo-centre) consiste en une estimation des paramètres d'un modèle de régression linéaire : $u.a_i + v.b_i = c_i$, où $a_i = \frac{1}{\cos \theta_i}$, $b_i = -\frac{1}{\sin \theta_i}$ et $c_i = \frac{x_i}{\cos \theta_i} - \frac{y_i}{\sin \theta_i}$. Puis l'étude est restreinte à un voisinage de ce pseudo-centre afin d'affiner la localisation de la moelle.

Sliwa et al. (2003) ont proposé une autre méthode, toujours sur des photos de sections. L'image est parcourue par une fenêtre carrée. Dans chaque fenêtre une transformation en coordonnées polaires (r, θ) est effectuée et un rapport d'écarts-types (ET) est calculé (moyenne des ET à r constant ($\overline{ET}_{horizontal}$) / moyenne des ET à θ constant ($\overline{ET}_{vertical}$)). La fenêtre centrée sur la moelle est celle ayant le rapport le plus faible car dans ce cas la transformation en polaire rend la structure des cernes horizontale.

Dans l'ensemble des méthodes présentées ci-dessus, le cas de sections contenant des nœuds n'est pas traité mais cette difficulté est reconnue par la plupart des auteurs. En effet, la présence de nœuds crée des distorsions de la forme des cernes de croissance sur lesquels s'appuient tous ces algorithmes et rend la détection imprécise sur les images concernées. Par ailleurs, la plupart de ces méthodes font l'hypothèse de la circularité et de la concentricité des cernes. Elle peuvent donc se révéler imprécises en présence de méplat ou d'excentricité si aucun traitement additionnel n'est effectué tel qu'une restriction de la détection dans un voisinage de façon à favoriser les cernes proches de la moelle souvent plus circulaires et plus centrés que les cernes situés à l'extérieur.

Enfin, les méthodes de détection de la moelle n'utilisant pas les contours des cernes de croissance sont rares.

Jaeger et al. (1999) ont proposé un algorithme de localisation de la moelle, sur des images CT d'Épicéa, utilisant la propriété que la moelle est généralement peu dense comparée au reste de la section. Dans cette procédure, la moelle est pointée manuellement sur la 1^{ère} coupe du billon (initialisation), puis la détection est propagée de coupe en coupe, en se recalant à chaque fois sur le pixel le moins dense dans un voisinage (généralement 5 x 5 pixels) centré sur la moelle détectée à la coupe précédente.

Flood et al.^[5] (2003) ont décrit une approche permettant de détecter la moelle à partir de l'orientation des branches dans un billon. La position de la moelle est trouvée à l'intersection de la structure des branches (non encore segmentées) d'un verticille. Ils utilisent pour cela des méthodes de discrimination de forme et de direction en 3D. Cette méthode fonctionne donc dans les verticilles uniquement. La position de la moelle est ensuite utilisée pour la segmentation des branches.

Afin d'évaluer les performances des algorithmes décrits ci-dessus, nous en avons testé certains, susceptibles de fonctionner sur nos images : la méthode utilisant le comptage des tangentes (Som et al., 1993; Som et al., 1995) ; une méthode mettant en œuvre une transformée de Hough (Wu & Liew, 2000) ; la méthode du suivi de la moelle à partir de sa densité (Jaeger et al., 1999). Les résultats obtenus pour le traitement d'un billon de notre échantillon sont présentés au paragraphe 3.1.1.1.

1.2.2. Les cernes annuels de croissance

Bien que la plupart des méthodes présentées ci-dessus utilisent des pré-traitements visant à mettre en évidence les cernes annuels de croissance et à isoler des pixels appartenant à leurs contours, elles ne permettent pas une segmentation correcte de ces derniers. Des algorithmes pour estimer, par exemple, le nombre ou la largeur des cernes à partir d'une détection sur des images tomographiques sont rares, une seule référence, celle de Jaeger et al. (1999), a pu être trouvée. Dans la plupart des cas, ces éventuelles méthodes ne pourraient de toutes façons que fonctionner localement, c'est-à-dire en dehors des zones de nœuds, de pourriture, d'aubier (pour certaines essences) pouvant déformer les cernes et/ou masquer les variations de densité entre le bois de printemps et le bois d'été. Par ailleurs, la résolution des images n'est pas toujours suffisante pour l'identification des cernes quand ceux-ci sont de largeur trop faible (arbres âgés, conditions de croissance difficiles et/ou pour certaines essences). Quelques pistes intéressantes ont cependant été testées sur d'autres types d'images (photos de sections

ou IRM), elles sont listées brièvement ci-dessous, la détection des cernes n'étant pas traitée dans le cadre de la thèse.

L'approche la plus fréquente semble être de tracer des rayons à partir de la moelle et de travailler sur les profils ainsi obtenus.

Rauschkolb^[11] (1994) a consacré un rapport à l'identification automatique des cernes sur des photos de sections et a proposé un algorithme de détection à partir d'une série de rayons issus de la moelle. Des dérivées sont calculées sur ces rayons afin de localiser les limites de cernes comme de fortes pentes positives (passage du bois d'été au bois de printemps de l'année suivante). Ensuite, un histogramme azimutal global permet de résumer l'information obtenue sur chaque rayon, il s'agit d'additionner les valeurs des pixels (pixels de l'image des contours (0 ou 1) ou bien niveaux de gris de l'image d'origine) situés sur un cercle à une distance r de la moelle, r correspondant aux classes de l'histogramme. Cependant, la détection peut être faussée en cas d'excentricité et ce sont finalement des histogrammes azimutaux locaux qui sont utilisés : il s'agit de se placer à une distance r de la moelle et d'additionner les valeurs des pixels pour un angle θ variant de quelques degrés ($\ll 360$) et cela pour toutes les valeurs de r (de la moelle au bord de la section) constituant les classes de l'histogramme. Sur les photos présentées dans le document, les cernes sont larges et aucun défaut majeur n'est présent sur les sections.

Jaeger et al. (1999) ont également travaillé à partir de rayons issus de la moelle sur les images du gradient de coupes tomographiques d'Epicéa. Des algorithmes spécifiques permettent ensuite de connecter les points appartenant à un même cerne, ces traitements ne sont malheureusement pas détaillés. La méthode marche assez bien pour les 15 à 20 premiers cernes mais ensuite, la résolution des images, trop faible, et la largeur de cerne, trop étroite, ne permettent plus la détection.

De la même manière, Chalifour et al. (2001), sur des photos de sections, ont proposé une détection des cernes à partir d'un seuillage de la norme du gradient ou bien des niveaux de gris le long de rayons issus de la moelle. Ils ont également travaillé dans des voisinages locaux de pixels en vue d'affiner la détection.

Sjöberg^[5] (2001), Sjöberg et al. (2001) se sont intéressés à la détection des limites de cernes annuels pour la prédiction de la qualité du bois sur des photos de sections. Une détection de contours suivie d'un algorithme de renforcement de ces contours, du type de ceux utilisés pour l'amélioration des images d'empreintes digitales (Danielsson & Ye, 1988a, 1988b), sont mis en œuvre.

Soille & Misson (2001), toujours à partir de photos de sections d'Epicéa, ont décrit une méthode semi-automatique de détection des cernes en vue de calculer leur surface. Pour cela, ils appliquent une série de traitements morphologiques (ouvertures, fermetures, chapeau haut de forme, ligne de partage des eaux). Un post-traitement est effectué pour régler des problèmes de détection dus à la présence de fentes radiales ou de zones de bois de printemps trop étroites. Une intervention humaine reste nécessaire dans certains cas comme la présence de branche.

Morales et al. (2002; 2004) se sont intéressés à la détection des cernes et à leur reconstruction en 3D à partir d'images obtenues par IRM. Les cernes sont segmentés sur une série de coupes 2D puis la reconstruction en 3D est effectuée à partir d'interpolations. La segmentation sur les images 2D s'effectue en trois étapes : (i) un ré-échantillonnage de l'image par transformation en coordonnées polaires; (ii) une identification des maxima sur chaque profil radial; (iii) une reconstruction des cernes en 2D en s'aidant de la position du cerne le plus à l'intérieur et de celui le plus à l'extérieur.

Sliwa et al. (2003), sur des photos de sections, ont testé les ondelettes pour débruiter leurs images, préalablement transformées en coordonnées polaires. Puis ils détectent et comptent les cernes dans une bande qu'ils considèrent optimale du point de vue de critères de variations horizontales et verticales ($\overline{ET}_{horizontal} / \overline{ET}_{vertical}$ le plus faible).

Enfin, de nombreux travaux issus de la dendrochronologie ont eu pour but la mise au point d'algorithmes automatiques, ou du moins semi-automatiques, pour la détection des limites de cernes. Cependant, les images étudiées sont souvent restreintes à des barreaux de sections et sont en général de résolution supérieure (par ex. : caméra attachée à un microscope) à celles pouvant être obtenues par les scanners tomographiques auxquels nous nous intéressons. En conséquence nous avons choisi de ne pas aborder ce type de développement, pour un exemple se référer à Conner & Schowengerdt (1998) et Conner et al. (2000).

1.2.3. L'aubier et le duramen

L'aubier est une zone généralement humide située à la périphérie du tronc, sous l'écorce. Il joue un rôle majeur dans le processus de vie de l'arbre car, c'est l'endroit où s'effectuent le stockage et le transport de l'eau des racines vers les feuilles. Durant la vie de l'arbre, l'aubier se transforme progressivement en duramen qui est constitué de cellules mortes et inactives. Des détails sur la formation du duramen se trouvent dans Taylor et al. (2002).

La détection de l'aubier est intéressante à plus d'un titre. Tout d'abord, elle permet des analyses d'ordre physiologique concernant la zone conductrice du tronc et sa variabilité en fonction de différents facteurs, ainsi que la capacité de stockage en eau des arbres. Lohmann & Becker (1993) ont par exemple montré que dans des peuplements d'épicéas atteints par le déclin forestier, les arbres qui présentaient des pertes d'aiguilles importantes dans le houppier, avaient également des surfaces d'aubier beaucoup plus faibles. Par ailleurs, dans un contexte industriel, la connaissance de la carte d'humidité dans le tronc peut permettre de connaître la répartition de l'eau dans les produits sciés ; cette information est importante pour le séchage des produits.

A l'état sec à l'air, la densité du duramen est du même ordre que celle de l'aubier (souvent même légèrement supérieure). En revanche, à l'état frais, la densité de l'aubier est souvent (mais pas

toujours) beaucoup plus élevée que celle du duramen du fait de sa teneur en eau. Le **Tableau 5** (Polge, 1964) illustre ce résultat pour différentes essences.

Pour certaines essences, la densité de l'aubier à l'état humide est alors voisine de celle des branches, c'est notamment le cas pour l'Epicéa. Par ailleurs, afin de se placer dans un contexte industriel, les billons doivent être scannés à l'état frais. La plupart des auteurs reconnaissent alors la difficulté que représente la présence d'aubier ou de zones d'humidité sur les images pour les algorithmes de détection des branches notamment. Funt & Bryant^[12] (1987) ont montré que leur algorithme marchait mal sur les images des billons scannés avant séchage. Wells et al.^[9] (1991) mentionnent des problèmes de segmentation des nœuds en présence de zones humides de densité similaire sur des échantillons de Pin. De même, He^[11] (1997) souligne une difficulté de classification sur le Peuplier dont la densité de l'aubier est voisine de celle des nœuds. Avant une étape de détection des nœuds, il semble donc important de distinguer les zones d'aubier et de duramen afin éventuellement de pouvoir distinguer la détection des branches dans ces deux parties du tronc.

Tableau 5 : Densités de l'aubier et du duramen à l'état frais puis à l'état sec à l'air pour différentes essences (Polge, 1964).

Table 5. *Densities of sapwood and heartwood at fresh state and air-dried for different species (Polge, 1964).*

<i>Essences (latin) (Species)</i>	<i>Densités à l'état sec à l'air (kg/m³) (Air-dried density)</i>		<i>Densités à l'état frais (kg/m³) (Green density)</i>	
	<i>Duramen (Heartwood)</i>	<i>Aubier (Sapwood)</i>	<i>Duramen (Heartwood)</i>	<i>Aubier (Sapwood)</i>
Epicéa (<i>Picea abies</i>)	452	473	506	954
Mélèze (<i>Larix</i>)	610	521	739	1000
Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	574	533	684	998
Alisier (<i>Sorbus</i>)	791	691	956	1106
Sorbier (<i>Sorbus</i>)	882	828	1048	1071
Merisier (<i>Prunus</i>)	537	528	688	990

Grunberg & Grönlund^[4] (1992) ont détecté la limite aubier/duramen sur leurs images selon la procédure suivante : (i) filtrage de l'image pour la débrouiller (filtre passe-bas 3 x 3) ; (ii) seuillage ; (iii) calcul de l'image du gradient par un filtre de Roberts afin de mettre en évidence la frontière aubier/duramen. Des rayons issus de la moelle sont tracés tous les degrés et des moyennes par secteurs de 12° sont réalisées pour des raisons de compatibilité avec les entrées du logiciel OPTSAWQ (simulation du sciage). Cependant, la gestion des coupes contenant des nœuds n'est pas précisée or, en présence de nœuds dans le duramen, le positionnement de la limite aubier/duramen et le calcul des rayons vont se trouver affectés.

He (1997), Schmoldt et al.^[11] (1998) ont développé une approche par réseaux de neurones pour la détection de caractéristiques du bois sur leurs images tomographiques. Pour chaque pixel de l'image, le réseau prend en entrée les valeurs des pixels dans un voisinage 2D (5 x 5) ou 3D (3 x 3 x 3) ainsi que la distance du pixel courant à la moelle. En sortie, le réseau attribue à ce pixel une caractéristique du bois. Plusieurs réseaux ont été testés : des réseaux indépendants de l'essence traitée et d'autres spécifiques à chaque essence. Le réseau est entraîné et testé par validation croisée à partir d'un échantillon de 1000 pixels, un taux de pixels bien classés pouvant ainsi être estimé. Un post-traitement à partir d'opérations de morphologie mathématique (érosion et dilatation) permet d'éliminer des régions trop petites et d'améliorer les performances du système (Sarigul et al., 2003). Pour le Chêne et le Cerisier l'aubier n'était pas visible sur les images tomographiques, en revanche, pour le Peuplier jaune, une classe de sortie correspondant à l'aubier a dû être rajoutée. Les résultats présentés sont difficiles à évaluer car, il s'agit d'un nombre de pixels bien classés, et cela ne permet pas de se faire une idée sur les erreurs de positionnement des frontières des défauts par exemple. De plus, il ne s'agit pas de l'ensemble des pixels d'une image qui sont traités mais seulement d'un échantillon pris de façon à représenter toutes les classes de défaut. Par exemple, pour leur classificateur prenant en entrée un voisinage 3D et indépendant de l'espèce ("*3D all-species classifier*"), sur 232 pixels appartenant à de l'aubier, 226 ont été correctement détectés par le réseau, par ailleurs, 32 pixels de nœud et 15 pixels d'écorce ont été classés comme aubier.

Andreu & Rinnhofer^[12] (2003b) ont mentionné une segmentation de l'aubier dans la liste des pré-traitements à effectuer avant d'appliquer leur algorithme de détection des branches mais la méthode utilisée pour cela n'est malheureusement pas décrite.

Dans les trois travaux précédents, la détection de la limite aubier/duramen était une étape nécessaire à la détection des branches. Les algorithmes sont très peu détaillés et le traitement de sections contenant des nœuds n'est pas abordé or, c'est précisément sur ces sections que la détection est nécessaire. Par ailleurs, aucun résultat de validation sur la précision des algorithmes n'est donné.

Les études présentées ci-dessous s'intéressent à l'aubier d'un point de vue physiologique à partir d'images tomographiques. Bien que la détection sur les images se fasse de visuellement (il ne s'agit pas ici de procédures automatiques), nous avons choisi de mentionner ces travaux, sans toutefois les détailler, comme illustration de l'intérêt que pourrait représenter une détection automatique de l'aubier pour des travaux scientifiques, sur le fonctionnement des arbres par exemple.

Habermehl (1982a; 1982b), Habermehl & Ridder^[13] (1993) ont accédé à la teneur en eau d'arbres sur pied avec l'utilisation de scanners mobiles permettant l'analyse d'arbres de forêt mais également d'arbres de ville présents dans les rues et dans les parcs. Ce dispositif permet, entre autres, un suivi de l'évolution de la teneur en eau dans le temps. Les auteurs se sont notamment intéressés à la

détermination de surface d'aubier en relation avec des facteurs du site tels que la fertilité. Il est également possible de repérer d'éventuelles perturbations de la zone de conduction de l'eau.

A partir du même dispositif, Tognetti et al. (1996) ont analysé la teneur en eau à l'intérieur de tiges de Chêne (*Quercus petraea* et *Quercus cerris*), *Quercus cerris* étant nettement plus hydraté que *Quercus petraea*. Les réserves en eau peuvent jouer un rôle important pour la résistance des arbres en cas de période prolongée de sécheresse et cette capacité de certains arbres à stocker des quantités plus importantes d'eau peut expliquer la distribution géographique de certaines essences. Les auteurs ont également trouvé une bonne corrélation entre la densité du bois, la teneur en eau et la vitesse de conduction de la sève.

Rust (1999) a utilisé le même dispositif mobile que Habermehl pour la détection de la zone conductrice du tronc chez le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Il existe en fait trois zones dans le tronc : la zone conductrice (aubier fonctionnel), une zone de transition chimiquement non altérée mais relativement sèche, de 3 à 8mm d'épaisseur, et le duramen. Rust a montré qu'une méthode par coloration à la benzidine ne permettait pas de faire la différence entre la zone conductrice et la zone de transition et que, par conséquent, avec cette méthode la zone fonctionnelle de l'aubier était surestimée alors qu'elle était bien détectée par tomographie. L'estimation de la transpiration d'un peuplement à partir de la détection par coloration pouvait ainsi conduire à des erreurs supérieures à 15%. Enfin, aucune des deux méthodes (coloration ou tomographie) ne permet seule une estimation de l'épaisseur de la zone de transition, pour cela, une combinaison des deux méthodes est nécessaire.

Fromm et al.^[2] (2001), afin de mieux comprendre les mécanismes de transport de l'eau dans les arbres, se sont intéressés à l'analyse de la densité et de la teneur en eau de rondelles de bois à partir d'images tomographiques de haute résolution. Ils ont ainsi étudié la distribution de l'aubier et du duramen le long du tronc, mais également la répartition de l'eau dans la direction radiale de la moelle vers les cernes les plus jeunes, et sont descendus jusqu'au niveau intra-cerne entre le bois de printemps et le bois d'été.

Pour des références complémentaires sur des détections à partir d'autres types d'images (couleur, conductivité, IR) se référer à l'**article II**.

1.2.4. Les nœuds

Un nœud correspond à la partie de la branche incluse dans le tronc. Une branche est caractérisée par une position (hauteur dans l'arbre, azimut), une inclinaison, un diamètre, un statut (morte ou vivante). Dans le cas de l'Epicéa, les verticilles (*whorls*) sont des ensembles de branches situées à une même hauteur dans le tronc et mises en place au cours de la même année. Les verticilles permettent de délimiter les unités de croissance (UC). Il arrive cependant que deux verticilles soient mis en place

lors de la même année, on parle alors de pousses d'août (*lammas shoots*). Des détails sur la branchaison de l'Epicéa peuvent être trouvés dans la thèse de Colin (1992). Dans un contexte industriel, la présence de nœuds est le principal défaut qu'il est important de détecter en vue d'optimiser un débit.

Pour la segmentation des branches, la détection de la moelle et de l'aubier sont souvent considérés comme des étapes préliminaires car : (i) la moelle constitue le point d'origine de chaque branche ; (ii) selon les essences, les traitements dans le duramen et dans l'aubier doivent être distingués, la détection des branches étant souvent rendue difficile dans l'aubier à cause d'une densité élevée de ce dernier et voisine de celle des branches.

Funt (1985), Funt & Bryant^[12] (1987) semblent être les premiers à avoir développé un algorithme de détection des branches et à en avoir donné une description détaillée, bien qu'une ébauche d'algorithme ait été décrite antérieurement dans (Taylor et al., 1984)^[11]. Un seuillage de l'histogramme par des méthodes dérivatives (passage par zéro des dérivées 2^{de} et 3^{ème}) permet de segmenter l'image en 4 classes : (1) les nœuds ; (2) le bois de bonne qualité ; (3) à la fois du bois de bonne qualité et des altérations; (4) l'air, les trous, les fentes et les altérations sévères. Un algorithme de croissance de région permet de représenter les nœuds par des régions convexes, le système analyse ensuite leur forme et leur orientation pour s'assurer qu'il s'agit bien de nœuds : (i) les régions de surface inférieure à 10 pixels sont éliminées ; (ii) l'axe principal d'inertie de chaque région est calculé et son orientation est comparée à celle de l'axe entre la moelle et le centre de la région étudiée, les nœuds ayant généralement une forme elliptique dont l'axe passe par la moelle (les auteurs ne précisent pas comment ils détectent cette dernière). Cela permet de séparer les nœuds du bois de bonne qualité qui peut également avoir une densité élevée en raison d'une forte teneur en eau, particulièrement dans l'aubier. Cependant, la procédure ne permet pas de résoudre le problème lorsque les nœuds sont connectés à l'aubier, et les auteurs reconnaissent des difficultés de détection liées à l'humidité. Aucun résultat de validation n'est fourni, il est donc difficile de juger l'efficacité de l'algorithme. Par ailleurs, nous pouvons noter que la détection est effectuée sur chaque coupe tomographique individuellement sans jamais utiliser l'information 3D.

Wells et al. (1991) et Som et al.^[9] (1993; 1995) ont proposé plusieurs pistes pour la détection des branches sur leurs images : (1) Un système de règles basé sur le calcul de vecteurs de valeurs statistiques (moyenne, variance, etc.) calculées dans des voisinages 5 x 5. Les principales méthodes testées pour l'identification des défauts (dont les nœuds) à partir de ces vecteurs sont des analyses en composantes principales (ACP), des combinaisons non-linéaires des composantes des vecteurs et des opérations de morphologie mathématique (Wells et al., 1991) ; (2) Une détection des contours sur l'image puis un traitement par un masque orienté 3 x 3 adapté à la structure radiale des nœuds afin de les faire ressortir : si le contour local a une orientation perpendiculaire à une ligne imaginaire passant par la moelle alors le pixel concerné est effacé, sinon il est retenu. Ce traitement introduit du bruit

mais les pixels isolés peuvent ensuite être effacés (Som et al., 1993); (3) Une autre approche consiste à effectuer des soustractions de coupes CT consécutives pour segmenter les branches (méthode permettant de détecter des objets en mouvement d’une image à l’autre). Une transformation du graphe cartésien en coordonnées polaires permet de représenter les nœuds comme des structures verticales avec en abscisse leur azimuth (Som et al., 1993); (4) Il est également possible de détecter des ruptures dans le schéma des cernes annuels de croissance par des opérations de morphologie mathématique (Som et al., 1995). Les pistes présentées sont intéressantes mais les algorithmes ne sont pas aboutis et doivent être complétés afin de pouvoir fournir des résultats de la détection.

Grunberg & Grönlund^[4] (1992) ont décrit un algorithme de détection des nœuds dans des billons de Pin. Un filtre passe-bas dans la direction radiale permet dans un premier temps de supprimer les cernes de croissance des images tomographiques. L’originalité de la méthode décrite est de travailler ensuite sur des images de type “déroulage” à partir de surfaces concentriques (SC) prises dans le billon et centrées sur la moelle : 10 SC au total dont cinq dans le duramen et autant dans l’aubier. La résolution d’une image de SC est de 364 pixels dans la direction tangentielle (1 pixels par degré + 2 pixels de recouvrement de part et d’autre) et de 1 pixel pour 5mm dans la direction longitudinale. Les cinq surfaces du duramen sont seuillées (seuil égal à 875) afin d’identifier les nœuds, puis les recouvrements entre SC successives servent à identifier les branches en 3D. Des modèles de régression, servant à décrire l’axe d’un nœud (positions tangentielle et longitudinale) ainsi que son diamètre, sont ajustés pour chaque branche à partir de leur partie incluse dans le duramen (i.e. 5 SC). Plusieurs modèles ont été testés. Ces modèles servent également à prédire la localisation et la taille des branches dans l’aubier par une méthode pas à pas : les 5 localisations dans le duramen servent à prédire la localisation sur la 1^{ère} SC de l’aubier, cette prédiction est affinée par un traitement, malheureusement non détaillé, effectué dans un voisinage restreint (environ 6.5 fois plus grand que la zone prédite). Puis, le processus est répété et les localisations sur les six 1^{ères} SC servent à réajuster le modèle et à prédire la position sur la 2^{ème} SC de l’aubier et ainsi de suite. La robustesse des modèles a été évaluée à partir de 177 nœuds provenant de 5 arbres par comparaison de la prédiction de leur position et de leur taille sur la SC la plus extérieure dans l’aubier avec des mesures réelles. Les résultats obtenus pour le meilleur modèle testé sont présentés dans le **Tableau 6**. Nous pouvons noter une surestimation assez importante des dimensions des nœuds ainsi que des écarts-types très élevés au regard des valeurs moyennes et ce, quel que soit le critère d’évaluation. Les résultats semblent assez bons pour la localisation des nœuds (ΔX et ΔY). La modélisation des nœuds apparaît comme une tâche complexe et le développement des méthodes doit être poursuivi (Grundberg & Grönlund, 1992).

Tableau 6 : Moyennes et écarts-types (entre parenthèses) pour les différences entre les valeurs prédites par les modèles et les valeurs observées. ΔX et ΔY correspondent à des erreurs de positionnement respectivement dans les directions tangentielle et longitudinale. $\Delta Major$ et $\Delta Minor$ correspondent à des erreurs de dimensions des nœuds respectivement dans les directions tangentielle et longitudinale. Miss est le nombre de nœuds non détectés (Grunberg & Grönlund (1992)).

Table 6. Mean and standard deviation (in brackets) for differences between predicted values and observed values. ΔX et ΔY correspond to position errors respectively in tangential and longitudinal direction. $\Delta Major$ et $\Delta Minor$ correspond to knot size errors respectively in tangential and longitudinal direction. Miss is the number of not detected knots (Grunberg & Grönlund (1992)).

ΔX (mm)	ΔY (mm)	$\Delta Major$ (mm)	$\Delta Minor$ (mm)	Miss
0.44 (2.47)	-0.5 (6.16)	-2.55 (4.74)	-8.77 (8.76)	5

Oja^[4] (1996; 2000) a repris le travail de Grunberg & Grönlund afin de l'adapter pour le traitement de billons d'Epicéa et a proposé des améliorations : (i) pour la détection des petits nœuds avec la mise au point d'un algorithme complémentaire fonctionnant sur les sections transversales (algorithme non détaillé dans l'article) ; (ii) pour la position longitudinale du nœud avec la mise au point d'un nouveau modèle à base de fonctions tangente et logarithme. Cependant, aucune différence significative de précision par rapport au modèle utilisé par Grunberg & Grönlund n'a pu être mise en évidence ; (iii) pour la détection de la limite entre nœud adhérent et non-adhérent. Les résultats, obtenus à partir des 12 branches, montrent cependant un biais important entre les proportions de nœud sain prédite et mesurée. Enfin, en ce qui concerne le nombre de nœuds détectés, les résultats sont assez satisfaisants avec 94% des nœuds de plus de 7mm. L'erreur, évaluée sur 27 nœuds, entre les diamètres réel et mesuré est de 3mm avec un écart-type de 2.2m.

Dans le cas d'arbres jeunes, la méthode de détection ci-dessus est mal adaptée car la zone de duramen est alors très réduite. C'est pourquoi, Nordmark^[4] (2002; 2003) a choisi d'utiliser une méthode différente des précédentes, à partir de réseaux de neurones, pour l'extension de la base de données suédoise avec le traitement d'arbres jeunes. Les entrées du réseau sont les mêmes que celles utilisées dans Schmoldt et al. (1998) à savoir : les valeurs des pixels dans un voisinage du pixel courant et la distance de ce pixel à la moelle. Plusieurs tailles et orientations du voisinage ont été testées. Les résultats obtenus sont bons avec 95.9% de pixels bien classés (écart-type = 1.2%). Il convient cependant de faire attention car l'apprentissage du réseau a été réalisé à partir de 13 images seulement, provenant toutes d'un même billon pris à la base de l'arbre ; l'échantillon d'apprentissage n'est donc pas représentatif de toute la variabilité possible à la fois en intra- et en inter-arbre.

Jaeger et al. (1999) ont proposé une méthode de détection des branches par soustraction coupe à coupe, idée également proposée par Som et al. (1993), afin de mettre en évidence les objets s'étant déplacés d'une coupe à l'autre. Pour chaque coupe, deux soustractions sont effectuées : celle avec la coupe précédente et celle avec la coupe suivante ; le résultat obtenu pour la coupe courante tient compte des ces deux soustractions en gardant les pixels de valeur maximum. Plusieurs filtrages ont été appliqués sur les images afin de les débruiter et de supprimer les cernes de croissance avant l'étape de soustraction mais également après. L'écorce subsistait sur les images de la soustraction ; elle a

finaleme nt été effacée en supprimant les pixels les plus à l'extérieur du billon ("pelage" du billon). L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de s'affranchir de la présence de l'aubier qui est éliminé par la soustraction. Malheureusement, aucun résultat de validation n'est présenté.

Bhandarkar et al.^[10] (1996; 1999), après avoir lissé leurs images (algorithme de lissage sélectif), ont appliqué un algorithme de seuillage multiple pour répartir les pixels dans les 4 classes suivantes : (1) les fentes, les trous et les altérations avancées ; (2) les altérations peu avancées et le bois de printemps ; (3) le bois d'été ; (4) les nœuds, l'écorce et les zones humides. Les images traitées ne semblent pas présenter d'aubier ce qui simplifie considérablement le problème. Un processus de croissance de région est appliqué pour les pixels appartenant aux classes n°1 (la moins dense) et 4 (la plus dense). Puis, pour chaque région, plusieurs caractéristiques sont calculées (périmètre, surface, allongement, orientation, etc.) permettant d'affiner la détection. Un critère de surface minimale permet d'éliminer certaines régions. Les nœuds, appartenant à la classe n°4, sont distingués des zones humides et de l'écorce par le critère d'allongement. Puis, leur contour est ensuite représenté par une enveloppe convexe. La dernière étape consiste à utiliser l'information 3D afin d'affiner les classements précédents. Tout d'abord, les régions n'ayant pas de support 3D sont éliminées. Une série de tests (orientation, distance à la moelle, nombre de régions 2D connectées devant être supérieur à 3 pour les nœuds) est ensuite réalisée pour vérifier que les régions détectées en 2D comme étant des nœuds le sont effectivement. Pour la validation de l'algorithme, les billons scannés ont été découpés transversalement aux endroits présentant des défauts sur les images tomographiques. Les sections ont été numérisées, et les défauts ont été manuellement identifiés et détournés afin de servir de référence. Le **Tableau 7** présente les taux de détection (nombre de nœuds effectivement détectés sur les images CT / nombre exact de nœuds à détecter) et les taux de fausses alarmes (nombre de faux nœuds détectés / nombre total de nœuds détectés) obtenus pour les nœuds sur les 4 essences traitées. Le **Tableau 8** donne des informations sur la précision de la détection : erreur de positionnement, différence d'orientation (azimut), précision dimensionnelle (facteur de recouvrement entre la surface du nœud détectée et la surface détournée manuellement).

Tableau 7 : Taux de détection et taux de fausses alarmes pour la détection des nœuds après la procédure 3D (Bhandarkar et al., 1999).

Table 7. Detection rates and false-alarm rates for knot detection with 3D analysis (Bhandarkar et al., 1999).

<i>Essences (Species)</i>	<i>Nombre d'images (Number of images)</i>	<i>Nombre de billons (Number of logs)</i>	<i>Nombre exact de nœuds (True knots)</i>	<i>Taux de détection (%) (Detection rate)</i>	<i>Taux de fausses alarmes (%) (False-alarm rate)</i>
<i>Fraxinus americana</i>	424	2	225	89.3	6.1
<i>Quercus rubra</i>	633	3	161	80.8	5.1
<i>Juglans nigra</i>	456	2	330	83.3	7.1
<i>Acer saccharum</i>	663	3	194	81.4	12.7

Tableau 8 : Précision de la localisation des nœuds (Bhandarkar et al., 1999).

Table 8. Accuracy for knot localisation (Bhandarkar et al., 1999).

Paramètres (Parameters)	Fraxinus americana	Quercus rubra	Juglans nigra	Acer saccharum
Nombre de nœuds considérés (Number of knots)	17	15	20	21
Erreur sur le positionnement du centre de gravité (mm) (displacement)	4.27	6.24	3.11	3.53
Différence d'orientation (°) (Orientation difference)	6.14	8.31	7.88	5.54
Facteur de recouvrement^(a) (Overlap factor)	0.93	0.86	0.91	0.83

^(a) Facteur de recouvrement = surface de recouvrement des deux régions (détournée manuellement et détectée) / surface de la région détournée.

He (1997), Schmoldt et al.^[1] (1998) ont utilisé leurs réseaux de neurones (décrits au § 1.2.3) pour la détection des nœuds sur leurs images. Sur 444 pixels appartenant à des nœuds, 389 ont été correctement détectés par le réseau, 32 ont été classés comme aubier et 16 comme bois sans défaut.

Andreu & Rinnhofer^[2] (2003a; 2003b) ont détecté les nœuds sur des images tomographiques par un seuillage multi-modal de l'histogramme après avoir lissé les cernes (masque Gaussien) et segmenté l'aubier. Ces zones ont ensuite été connectées en 3D afin de reconstruire les branches avec comme critères la distance à la moelle et l'orientation de leur axe principal. De la même façon que dans Grundberg & Grönlund (1992), des modèles ont été ajustés permettant de décrire la position longitudinale de la branche et son diamètre en fonction de la distance radiale à la moelle. Les coupes sont espacées de 2cm en longitudinal et les auteurs ont mentionné l'absence de support 3D pour certaines branches. L'algorithme de détection a été validé sur 4 billons à partir de l'observation de la surface de planches coupées longitudinalement. 96 % des nœuds de diamètre supérieur à 10mm ont été détectés (taux de détection) et 10% des nœuds détectés n'en étaient pas (taux de fausses alarmes) (ces taux passent respectivement à 73% et 13% si tous les nœuds sont considérés). Le **Tableau 9** donne la précision de la détection en ce qui concerne la position azimutale, la position longitudinale et le diamètre des branches. Ces deux dernières mesures sont moins précises avec des écarts-types élevés, supérieurs à 10mm. Les résultats sont toutefois assez satisfaisant si l'on tient compte du fait que le scanner utilisé est un prototype industriel de résolution plus faible qu'un scanner médical. Les auteurs mentionnent la difficulté de la détection des branches dans l'aubier et ont fait l'hypothèse simplificatrice qu'une branche atteignant l'aubier atteindra également la surface du tronc.

Tableau 9 : Moyennes et écarts-types (entre parenthèses) de l’erreur sur le positionnement et la taille des branches (Andreu & Rinnhofer, 2003a).

Table 9. Mean and standard deviation (in brackets) of errors for position and size of knots (Andreu & Rinnhofer, 2003a).

Azimut (°) (Azimuth)	1.9 (2.9)
Position longitudinale (mm) (Longitudinal position)	0.9 (10.4)
Diamètre (mm) (Diameter)	0.7 (10.1)

Pour conclure sur les méthodes de détection des nœuds, il est difficile d’établir des comparaisons à partir des résultats de validation fournis. En effet, les paramètres mesurés, les essences étudiées, les procédures de validation (comparaison à des détournages sur images CT, sur rondelles ou sur planches) peuvent varier d’une étude à l’autre et fausser ainsi une éventuelle comparaison.

1.2.5. Les fentes et les trous

La présence de fentes (*cracks, checks, splits*) est un défaut auquel se sont intéressées plusieurs équipes et des algorithmes visant à les détecter existent dans la littérature. Les fentes et les trous sont des caractéristiques de faible densité puisqu’elles sont constituées essentiellement d’air.

Wells et al.^[9](1991) ont lancé quelques pistes pour une détection automatique à partir de leurs images tomographiques. Comme pour la détection des nœuds (§ 1.2.4), ils ont tenté de caractériser les fentes par des vecteurs de grandeurs statistiques calculées dans des voisinages 5 x 5 des pixels de l’image. Tandis que dans Som et al. (1995), des seuillages suivis d’opérations de morphologie mathématique (ouvertures et fermetures) ont été utilisés.

Bhandarkar et al.^[10] (1996; 1999) se sont intéressés à la détection automatiques des fentes mais également des trous (*holes, voids*). Au départ, l’algorithme est commun avec celui de la détection des nœuds (§ 1.2.4). Puis, les fentes et les trous appartenant à la classe n°1 (la moins dense) sont distingués par le critère d’allongement, plus élevé pour les fentes que pour les trous. Le contour des trous est représenté par une enveloppe convexe, tandis que celui des fentes est représenté par un polygone. De la même façon que pour les nœuds, l’information 3D est ensuite utilisée. Les fentes et les trous doivent être présents sur au moins 10 sections consécutives (contre 3 pour les nœuds). Le **Tableau 10** donne les taux de détection des fentes dans les billons analysés. Des résultats sur la précision de la détection des fentes et des trous sont donnés dans Bhandarkar et al. (1999), les mêmes critères que pour les nœuds sont utilisés : erreur sur la position du centre de gravité de l’objet détecté, erreur d’orientation (azimut) et taux de recouvrement. Les taux de recouvrement sont élevés, toujours supérieurs à 90% ce qui est satisfaisant. Les erreurs sur l’orientation sont plus faibles pour les fentes

que pour les trous, peut-être parce que les fentes ont une forme allongée et qu'il est plus facile de leur attribuer une orientation que pour les trous.

Tableau 10 : Taux de détection et taux de fausses alarmes pour la détection des fentes dans des billons après la procédure 3D.

Table 10. Detection rates and false-alarm rates for crack detection with 3D analysis.

<i>Essences (Species)</i>	<i>Nombre d'images (Number of images)</i>	<i>Nombre de billons (Number of logs)</i>	<i>Nombre exact de fentes (True cracks)</i>	<i>Taux de détection (%) (Detection rate)</i>	<i>Taux de fausses alarmes (%) (False-alarm rate)</i>
<i>Fraxinus americana</i>	424	2	112	79.5	2.2
<i>Quercus rubra</i>	633	3	8	75.0	14.3
<i>Juglans nigra</i>	456	2	29	72.4	8.7
<i>Acer saccharum</i>	663	3	5	80.0	20.0

Andreu & Rinnhofer^[7] (2003b) ont mis en évidence les structures radiales présentes sur les images et ont atténué les structures tangentielles telles que les cernes et les poches de résine par l'application de filtres directionnels. Un seuillage permet ensuite de détecter les fentes.

Dans les travaux de l'équipe de Virginia Tech^[14] (Schmoldt et al., 2000a), une classe correspondant aux fentes se trouve en sortie de leurs réseaux de neurones. Les fentes représentaient, selon les essences, de 5 à 17% des pixels ayant servi à l'apprentissage et à la validation des réseaux. Pour le classificateur utilisant un voisinage 3D et indépendant de l'espèce ("*3D all-species classifier*"), sur un total de 318 pixels appartenant à des fentes, 226 ont été correctement détectés et 85 ont été classifiés comme bois sans défaut, soit un taux de détection de 71%.

Wu & Liew (2000), qui avaient déjà détecté la position de la moelle sur des photos de sections (§ 1.2.1), se sont également intéressés à la détection des fentes. Premièrement, ils éliminent le bruit des images par application d'un filtre médian. Une correction de l'histogramme est effectuée afin de maintenir un niveau de gris moyen constant d'une image à l'autre et de permettre ainsi un traitement commun à toutes les images. Les fentes sont ensuite détectées par application d'un filtre passe-haut destiné à améliorer le contraste suivie d'une détection de contours (opérateur de Sobel). Un post-traitement à partir d'opérations de morphologie mathématique (ouverture, fermeture, dilatation) permet d'améliorer la détection.

Cruvinel et al. (2003) ont montré qu'il était possible de détecter la présence d'insectes et de trous créés par ces derniers (*cavities*) à partir de profils de densité extraits d'images tomographiques. Les scanners utilisés sont deux scanners à rayons gamma, l'un d'énergie 59.5 keV et de résolution 1mm et l'autre, portable, d'énergie 662keV et de résolution 2mm. Seul le premier dispositif a permis la détection de la présence d'insectes et de trous dans le bois. Cependant aucun algorithme de détection n'a été proposé par les auteurs.

1.2.6. Les altérations et la pourriture

Les zones de pourriture (*decay*, *rot*) se caractérisent sur les images tomographiques de bois séché (*oven dry*) par une faible densité due à une dégradation du bois (lignine et cellulose) entraînant des pertes de masse importantes pour les zones atteintes (Nicolotti et al., 2003). Ces pertes de masse expliquent les faibles densités observées à l'état sec pour les zones altérées par de la pourriture blanche dans l'étude de Karsulovic et al. (2002). A l'état "frais", les zones de pourriture semblent présenter une teneur en eau élevée. Karsulovic et al. (2002), à partir de mesures par rayons Gamma (simples projections ici $\neq$ tomographie) sur *Nothofagus pumilio*, ont montré qu'un échantillon de bois sain présentait une humidité plus élevée dans l'aubier que dans le duramen et que le contraire était observé pour un échantillon présentant de la pourriture de cœur (pourriture blanche). L'augmentation de l'humidité serait due à une augmentation de l'hygroscopie du bois dégradé, liée à l'action métabolique des champignons lorsqu'ils rejettent de l'eau. L'augmentation de l'humidité a été confirmée par Nicolotti et al. (2003) à partir d'images tomographiques obtenues par 3 méthodes : résistivité à un courant électrique, ultra-sons et ondes radar. Les densités mesurées à l'état "frais" ne permettent pas une distinction entre le bois sain et le bois atteint, au moins pour l'essence considérée (*Platanus hybrida*) ; en effet, sur les deux arbres de l'étude de Nicolotti et al., les différences de densité entre bois sain et atteint sont positives pour l'un et négatives pour l'autre. Des résultats similaires ont été démontrés par Karsulovic et al. pour différents niveaux d'altération.

La teneur en eau semble donc être toujours plus importante dans les zones dégradées que dans les zones saines avec parallèlement des pertes de masse, les deux ayant un effet inverse sur la densité. La détection des zones d'altération sur des images tomographiques de bois scanné à l'état "frais" ne semble donc pas évidente à partir uniquement des niveaux de gris des images en raison d'une forte variabilité de la densité observée liée : au niveau d'altération, mais également à la teneur en eau. Par ailleurs, Petutschnigg et al. (2002) ont montré que la détection de la pourriture n'était pas possible sur des images d'Epicéa obtenues par tomographie à rayons X et que, des mesures additionnelles de la répartition de la teneur en eau étaient nécessaires. Ce constat étant sans doute à réviser au cas par cas en fonction : (i) du niveau d'altération que l'on cherche à détecter sur les images ; (ii) de la teneur en eau et (iii) de l'essence considérée.

Habermehl^[1] (1982a; 1982b) puis Habermehl & Ridder (1996; 1997) ont mis en évidence la présence de pourriture à la base d'arbres sur pied à partir de leurs dispositifs mobiles.

Funt & Bryant^[2] (1987) ont mis au point un algorithme pour détecter la présence de pourriture à partir de la texture des cernes de croissance. Les zones à détecter sont de faible densité et sont à l'origine de ruptures dans le schéma des cernes de croissance. Dans un premier temps, ils ont effectué une détection des contours sur les images afin de mettre en évidence les cernes de croissance. Puis,

pour chaque pixel appartenant à un contour, les directions des pixels de son voisinage sont moyennées afin d'attribuer une direction moyenne au pixel courant. Les directions ainsi obtenues sont comparées à l'intérieur de petits voisinages de l'image et plus le pourcentage de pixels ayant la même direction est important, plus l'uniformité des cernes est élevée. Les pixels de faible densité, correspondant à une faible uniformité du schéma des cernes, sont associés à de la pourriture. En l'absence de résultats quantitatifs de validation, il est difficile d'émettre un jugement sur l'efficacité de la méthode.

He (1997), Schmoldt et al.^[11] (1998) ont détecté la présence d'altérations sur leurs images tomographiques à partir de leurs réseaux de neurones. A titre indicatif, sur un total de 271 pixels appartenant à des zones de pourriture, 236 ont été classés correctement. Bien qu'une validation croisée ait été utilisée pour estimer les performances du réseau ("*3D all-species classifier*"), le fait de travailler avec un échantillon commun pour l'apprentissage et la validation ne permet pas de prendre en compte toute la variabilité possible au niveau de la densité des zones de pourriture. Les résultats ne seraient sans doute pas aussi satisfaisants sur des arbres ayant des niveaux d'altération différents de ceux ayant servi à l'apprentissage.

Pour conclure sur cette section, les zones de pourriture ne semblent pas faciles à détecter sur les images tomographiques, bien que certains aient toutefois proposé des algorithmes. La densité de ces régions est fortement variable en fonction du niveau d'altération (plus le niveau d'altération est élevé, moins le bois est dense), de la teneur en eau (les zones de pourriture sont généralement humides, ce qui peut compenser la perte de masse du bois) ou même de l'espèce considérée.

1.2.7. Les poches de résine ou de gomme

En ce qui concerne les poches de résine (*resin pockets*) et de gomme (*kino veins*), ayant des apparences similaires, le problème semble être délicat et les algorithmes de détection sont rares dans la littérature. Un des problèmes majeur semble être de les distinguer du bois de réaction. Les poches de résine se trouvent le long de cernes de croissance, elles ont donc une forme particulière en arc de cercle. Elles sont caractérisées par une largeur (dimension tangentielle), une épaisseur radiale ainsi qu'une longueur (dimension longitudinale) ; l'épaisseur étant toujours inférieure aux deux autres dimensions.

Som et al.^[9] (1995) ont été confrontés à la présence de poches de gomme sur des images CT d'Eucalyptus. Selon le type d'Eucalyptus étudié, les poches apparaissent plus ou moins denses. Ils proposent de les détecter dans des volumes en forme d'arc, de plusieurs cernes d'épaisseur, à déplacer le long des cernes de croissance. Cependant le suivi du schéma des cernes de façon automatique est un autre problème non résolu.

Oja & Temnerud^[4] (1999), dans l'objectif de compléter leur base de données par 200 épicéas supplémentaires, ont analysé la possibilité d'une détection automatique des poches de résine. Ils se sont donc intéressés à l'apparence des poches de résine sur les images CT (coefficient d'atténuation, densité). Ils donnent quelques pistes pour la détection dans le duramen d'une part (où les poches sont bien contrastées) et dans l'aubier d'autre part (où une zone de densité plus faible entoure la poche). En utilisant en plus un critère de forme, une détection des poches de résine les plus larges semblerait possible.

Parziale & Rinnhofer^[5] (2003) ont utilisé un filtre de "diffusion anisotrope" permettant d'obtenir des zones uniformes dans l'image. L'idée étant ensuite de localiser les poches de résine par une détection de contours. L'application du filtre a permis de rehausser les contours des poches de résine et de réduire la présence d'autres contours comme ceux des cernes de croissance. Enfin, un critère d'orientation permet de distinguer les poches de résine des nœuds et des fentes radiales également détectés.

1.2.8. Le bois de compression

Le bois de compression (BC) (*compression wood*) est considéré comme un défaut sévère du bois. Sa présence est à l'origine de pertes de propriétés mécaniques avec notamment une forte instabilité dimensionnelle des produits sciés lors du séchage. L'automatisation de la détection du BC pose encore problème quelque soit la méthode utilisée pour le mettre en évidence.

Un algorithme de détection à partir d'images numériques de rondelles, éclairées par lumière transmise, a été décrit par Andersson & Walter^[6] (1995), mettant en œuvre une classification supervisée par maximum de vraisemblance. La méthode développée avait pour but une classification rapide et objective du bois en trois classes : bois normal, BC modéré et BC sévère. Les résultats semblent assez satisfaisants pour l'estimation des quantités de BC total et modéré. Cependant, des améliorations sont nécessaires concernant l'estimation de la quantité de BC sévère.

Les tentatives de détection par tomographie sur du bois à l'état vert n'ont pas été concluantes. Nyström & Kline^[7] (2000) ont conclu que le BC n'était pas détectable dans des planches scannées à l'état vert en raison d'une répartition hétérogène de la teneur en eau masquant les variations de densité liées à la présence de BC.

Ohman & Nystrom^[8] (2002) ont utilisé un seuillage des niveaux de gris pour distinguer le bois normal et le BC sur des images tomographiques de planches à l'état sec. Le seuil correspond à une densité de 630 kg/m³ et a été choisi afin de fournir le meilleur compromis entre la détection de bois d'été et la détection de BC. L'objectif final de leur travail était l'établissement d'un modèle de

prédiction de la quantité et de la distribution de BC dans des planches (données obtenues à partir des images tomographiques de planches séchées) en fonction de leur forme mesurée à l'état vert.

Bien que les deux travaux décrits ci-dessus ne traitent pas de bois ronds mais de planches, nous avons choisi de les mentionner à titre informatif.

1.2.9. La fibre torse

Seule l'équipe suédoise^[4] semble s'être intéressée à la détection de la fibre torse (*spiral grain, fiber orientation*) à partir d'images CT. Sepulveda et al. (2002; 2003) ont établi des modèles de prédiction de l'intensité de l'angle du fil à partir de variables mesurées sur les billons (quantité d'aubier, proportion du duramen, etc.) ; ces variables ont été mesurées manuellement à partir d'images obtenues par simulation d'un scanner industriel. Cependant, il s'agit d'une méthode de prédiction et non pas de détection directement sur les images. Ekevad (2004) semble être le seul à avoir tenté de mettre au point une méthode de détection automatique.

1.2.10. L'écorce

L'écorce (*bark*) fait également partie des caractéristiques accessibles sur des images tomographiques de billons. Cependant, peu d'équipes ont tenté de mettre au point des procédures automatiques pour la détecter, peut-être parce que cela ne présente pas un intérêt industriel suffisant à l'heure actuelle. Sa détection pourrait toutefois avoir comme objectif d'améliorer les connaissances scientifiques concernant cette partie de l'arbre. Des analyses inter-peuplements, inter-arbres et intra-arbre des variations d'épaisseur d'écorce pourraient servir à une meilleure calibration des modèles prédictifs de cette épaisseur. En ce qui concerne l'intérêt de sa détection en industrie, tout dépend de la position du scanner dans la chaîne de traitement. Si un scanner à rayons X était placé avant écorçage, pour une opération de cubage par exemple, la détection de l'écorce permettrait une meilleure estimation des dimensions sous écorce. Généralement, ce sont des scanners optiques qui sont utilisés pour le cubage sur écorce et des modèles sont utilisées pour la prédiction de l'épaisseur d'écorce et l'estimation de mesures sous écorce. Ces fonctions sont sans doute moins précises que ne le serait une détection automatique et, des morceaux d'écorce manquants peuvent notamment générer des erreurs de classement lors du cubage (Chiorescu & Grundberg, 2001). En revanche, si un scanner à rayons X était placé juste avant le banc de scie, afin d'optimiser le débit de chaque billon individuellement, la détection de l'écorce n'aurait plus lieu d'être car, à ce stade de la chaîne, les billons arrivent écorcés.

L'équipe de Virginia Tech^[11] semble être la seule à segmenter l'écorce en lui attribuant une classe en sortie de leurs réseaux de neurones (He, 1997).

1.2.11. Le cœur rouge du Hêtre

Des essais ont été conduits pour la détection du cœur rouge du Hêtre (*red heart of Beech*) à partir d'images obtenues par un scanner mobile à rayons gamma (Schwartz-Spornberger, 1990; Seeling et al., 1999)^[8]. Le cœur rouge dit "normal" est potentiellement détectable par tomographie à rayons X ou gamma en raison de sa faible teneur en eau, il est généralement caractérisé par une humidité inférieure à 60% (Zycha, 1948; Bauch & Koch, 2001). Lors de ces études, certaines similarités ont pu être mises en évidence par comparaison visuelle de rondelles contenant du cœur rouge avec les tomogrammes correspondant. L'idée serait de mettre en place une clé d'interprétation des images tomographiques pour identifier la présence de cœur rouge dans les arbres sur pied.

Nous pouvons noter par ailleurs que le cœur rouge apparaît chez des individus plutôt âgés, de diamètre souvent supérieur à 40cm (Mahler & Höwecke, 1991; Walter & Kucera, 1991) or, l'ouverture d'un scanner médical est limitée et ne permet pas de traiter des billons de cette taille. Des analyses poussées sur le cœur rouge à partir de scanners médicaux, sur des arbres scannés représentatifs de la variabilité en diamètre, impliqueraient sans doute de procéder de façon destructive.

2. MATERIELS

2.1. Matériel végétal

Les données ayant servi pendant la thèse ont été obtenues dans le cadre du Projet de Recherche Européen STUD (Daquitaine et al., 1998). L'échantillon se compose de 24 épicéas communs (*Picea abies* (L.) Karst.) issus de quatre peuplements du nord-est de la France (département des Vosges). Les peuplements sont équiennes monospécifiques. Le **Tableau 11** donne des informations sur leurs caractéristiques et sur leur localisation. Deux classes de fertilité sont représentées. Pour chaque classe, deux peuplements ont été sélectionnés (un jeune et un plus âgé). Dans chaque peuplement, six arbres ont été échantillonnés selon leur statut social (deux dominés, deux co-dominants et deux dominants).

Tableau 11 : Caractéristiques des quatre peuplements vosgiens de l'étude.

Table 11. Characteristics of the four studied stands.

Peuple- ment (Stand)	Age (Age)	Fertilité (Décourt) (Fertility, site index)	Densité (tiges/ha) (Density)	Localisat- ion (Localisat -ion)	Alti- tude (m) (Alti- tude)	Latitude (Latitude)	Longitude (Longitude)	Hauteur dominante à 100 ans (m) (Dominant height at 100 years)
31	64	4	510	Saint Amé	750	48°02'18'' N	- 6°38'40''	33.0
32	90	2	520	Le Puid	605	48°23'46'' N	- 7°03'08''	36.1
33	67	2	800	Le Puid	625	48°23'30'' N	- 7°03'50''	38.3
34	130	4	520	Moussey	860	48°27'24'' N	- 7°05'31''	31.1

Des mesures externes ont été réalisées sur les arbres, seules celles d'intérêt pour notre étude sont mentionnées ici. L'écorce a été marquée d'un trait de griffe pour indiquer la direction du nord avant abattage. Un autre trait de griffe (génératrice) a été tracé après abattage sur toute la longueur de l'arbre et l'angle entre cette génératrice et la direction du nord a été mesuré. L'âge de l'arbre a été compté à la souche. Les unités de croissance (UC) ont été numérotées à partir du haut de l'arbre, leur circonférence et leur hauteur dans l'arbre ont été mesurées ainsi que les hauteurs d'apparition de la 1^{ère} branche verticillaire morte (h1bm), de la 1^{ère} branche verte (h1bv), du 1^{er} verticille vert (h1vv), la hauteur totale de l'arbre (H) et le diamètre à 1.3m (D130). Le **Tableau 12** décrit les principales caractéristiques mesurées sur les arbres de l'étude. Pour une UC sur deux, des mesures de chaque branche verticillaire ont également été réalisées : statut (mort ou vivant), diamètre sur écorce, angle d'insertion, angle azimutal.

Tableau 12 : Description des 24 arbres échantillonnés.

Table 12. Description of the 24 sampled trees.

<i>Identifiant arbre (Tree number)</i>	<i>Peuplement (Stand)</i>	<i>Age (Age)</i>	<i>D130 (cm) (DBH)</i>	<i>h1bm (cm)</i>	<i>h1bv (cm)</i>	<i>h1vv (cm)</i>	<i>H (cm) (Height)</i>	<i>H/D130 (cm/cm) (Height/DBH)</i>
3101	31	64	27.3	163	1383	1737	2381	87.2
3102	31	64	28.3	222	1197	1779	2585	91.2
3103	31	62	33.2	184	740	980	2494	75.0
3104	31	65	36.9	228	1102	1708	2688	72.8
3105	31	65	41.7	258	788	1750	2893	69.4
3106	31	63	41.8	204	774	2005	2542	60.8
3201	32	.	32.1	96	2306	2493	3212	99.9
3202	32	90	32.1	175	2020	2342	2995	93.2
3203	32	91	40.1	24	2300	2415	3513	87.6
3204	32	90	36.6	109	2036	2490	3518	96.1
3205	32	91	33.7	161	2409	2583	3240	96.0
3206	32	90	33.7	280	2018	2310	3302	97.9
3301	33	.	23.9	126	2200	2285	2830	118.5
3302	33	67	28.0	67	1842	2047	2790	99.6
3303	33	.	33.1	55	1810	1996	3152	95.2
3304	33	66	33.1	162	1869	2213	2969	89.7
3305	33	66	40.4	37	1783	2038	3057	75.6
3306	33	68	42.0	134	2132	2245	3138	74.7
3401	34	133	33.0	340	1737	2270	2925	88.7
3402	34	128	34.1	485	2060	2357	3166	92.8
3403	34	124	38.0	370	1833	2572	3000	78.9
3404	34	131	39.4	532	1830	2260	2862	72.6
3405	34	132	42.8	446	1968	2201	3065	71.6
3406	34	130	43.1	382	1918	2169	3397	78.8

Les arbres ont ensuite été débités en billons de 4.5m séparés par des rondelles de 10 cm d'épaisseur (**Figure 2**), soit un total de 90 billons, puis transportés en Suède pour y être scannés à l'état frais. Les images issues de la scanographie des billons et qui constituent la base de données principale de la thèse sont décrites au paragraphe 2.3.

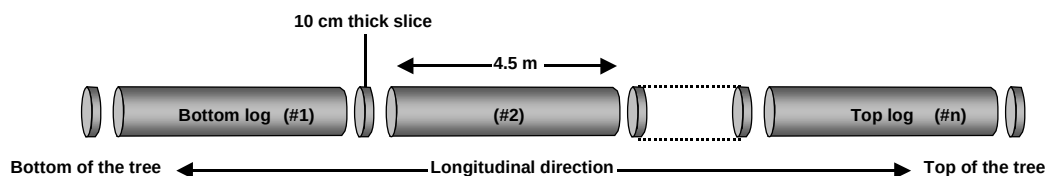


Figure 2 : Schéma de découpe des billons.

Fig. 2. Log sampling scheme.

Dans certains billons (du haut ou du bas de l'arbre), toujours dans le cadre du projet STUD, des planches ont été découpées (Constant, 1999). Les dimensions des planches étaient de

45x95x2500mm après rabotage, le plan de débit est illustré **Figure 3**. Une partie de ces planches a fait l'objet d'une caractérisation détaillée des nœuds (localisation et taille) sur les quatre faces.

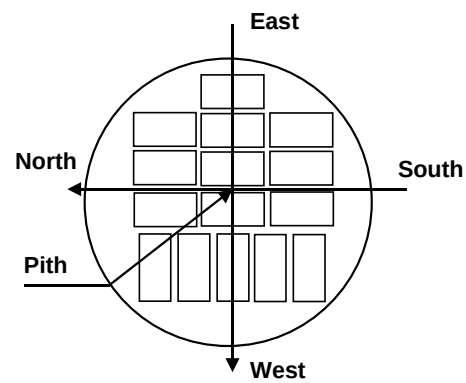


Figure 3 : Plan de débit vu depuis l'extrémité côté fin bout du billon.

Fig. 3. Sawing plane sawn from upper end.

2.2. Le scanner à rayons X

2.2.1. Généralités sur les rayons X

Une onde électromagnétique est la combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires l'un à l'autre. La direction de propagation de l'onde est orthogonale au plan déterminé par les précédents champs. L'onde est caractérisée par une longueur d'onde λ (en m ou dérivées) et une fréquence ν (en Hz). Dans le vide, les ondes se propagent toutes à la vitesse $c = 300\,000\text{ km/s}$, λ et ν étant liés par la relation : $c = \lambda \nu$.

Un rayonnement électromagnétique est en général composé d'ondes de fréquences (ou longueurs d'ondes) différentes. Citons par exemple le cas de la lumière visible composée de plusieurs couleurs correspondant à des ondes de fréquences différentes. Un rayonnement composé uniquement d'ondes de même fréquence est dit monochromatique. La mécanique quantique associe à une onde électromagnétique monochromatique un corpuscule de masse nulle nommé photon dont l'énergie vaut $E = h\nu$, où h est la constante de Planck. Donc, plus la longueur d'onde est courte (ou plus la fréquence est élevée), plus l'énergie est élevée.

Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques de fréquences élevées. Ils ont été découverts en 1895 par Wilhelm Conrad Röntgen qui a reçu pour cela le premier prix Nobel de Physique en 1901. Des rayons X et des rayons gamma de même énergie sont physiquement identiques. La limite entre ces deux types de rayonnements est liée au processus qui les engendre plutôt qu'à une longueur d'onde précise, bien que les rayons gamma caractérisent généralement des longueurs d'ondes plus courtes. Les rayons gamma sont en général définis comme étant produits par des processus nucléaires alors que les rayons X font intervenir des électrons (collisions d'électrons lancés à grande vitesse avec des atomes cibles et interactions avec les électrons de ces atomes, cf. aussi § 2.2.2). Comme il est possible pour certaines transitions électroniques d'être plus énergétiques que des transitions nucléaires, il existe un certain chevauchement entre les rayons X de haute énergie et les rayons gamma de faible énergie. La **Figure 4** est une représentation des différentes catégories d'ondes sur l'échelle du spectre électromagnétique en terme de longueurs d'ondes, fréquences et énergies.⁷

⁷ Sources en ligne consultées pour la rédaction des paragraphes concernant la nature des rayons X et gamma :

- "X, rayons" Encyclopédie Microsoft® Encarta® en ligne 2005, <http://fr.encarta.msn.com> © 1997-2005 Microsoft Corporation. Tous droits réservés ;
- Wikipédia L'Encyclopédie Libre, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil> ;
- Berkeley Lab (Lawrence Berkeley National Laboratory), <http://www.lbl.gov> ;
- Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, Cours de Paul Barthez, <http://www.vet-lyon.fr/ens/imagerie/D1/01.RayonsX/ImageRadio.html> ;

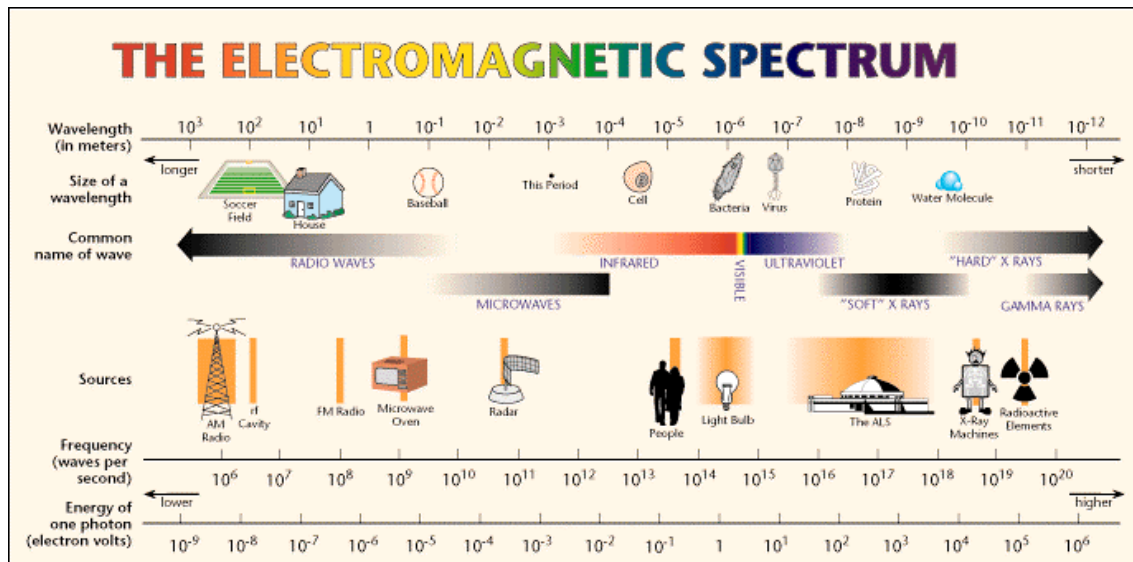


Figure 4 : Classification des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou de l'énergie des photons.

Fig. 4. Electromagnetic spectrum.

Contrairement à la lumière qui est absorbée ou réfléchiée par les objets solides, les rayons X traversent les corps opaques à la lumière, et en particulier les organismes vivants. Si un flux de rayons X d'intensité I_0 (nombre de photons par unité de temps et de surface) est envoyé à travers un objet (**Figure 5**), il va être atténué en fonction des caractéristiques de cet objet (composition atomique et densité), cela étant dû à des phénomènes d'absorption et de diffusion.

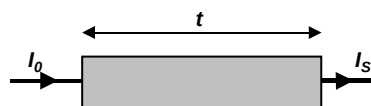


Figure 5 : Intensité en entrée I_0 et en sortie I_s après passage au travers d'un objet.

Fig. 5. Input and output intensity after passing through an object.

Dans le cas d'un objet homogène nous pouvons écrire la relation suivante (loi de Beer-Lambert) :

$$I_s = I_0 \cdot \exp(-\mu t),$$

Équation 1

où t est la distance parcourue par le faisceau dans l'objet avant de ressortir et μ est le coefficient d'atténuation linéaire (ou coefficient d'absorption) de l'objet, constant en tout point de celui-ci. Si l'objet à traverser est hétérogène, c'est-à-dire que μ est une fonction dépendant de la localisation dans l'objet, il faut alors additionner les coefficients d'atténuation des différents constituants rencontrés sur la distance parcourue (**Équation 2**).

$$I_s = I_0 \cdot \exp\left(-\int_0^t \mu(x)dx\right) \quad \text{Équation 2}$$

Cette équation peut également s'écrire sous une forme linéarisée (**Équation 3**).

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_s}\right) = \int_0^t \mu(x)dx \quad \text{Équation 3}$$

Le coefficient d'atténuation dépend de la composition et de la densité de l'objet traversé mais également de l'énergie du faisceau. Pour de basses énergies, la composition chimique des matériaux causent des variations du coefficient d'atténuation même pour des matériaux de densités égales. A des énergies élevées, l'influence de la densité du matériau scanné prévaut sur sa composition chimique.

2.2.2. Le scanner

La tomодensitométrie X, tomographie X, ou scanographie, "*computed tomography*" en anglais, est une méthode permettant d'obtenir des images de coupes d'un objet de façon non destructive. Les images sont reconstruites à partir de l'atténuation de faisceaux de rayons X lancés selon différentes orientations dans un plan de coupe passant au travers du volume étudié. La théorie mathématique, sur laquelle le principe de la tomographie est basé, date de 1917 avec la formule de Radon (Radon, 1917). Quant à l'invention de cette technique, elle est due aux travaux conjoints du physicien américain Allan Cormack et de l'ingénieur britannique Godfrey Hounsfield et date officiellement de 1972 avec la mise au point du premier scanner médical. Cormack et Hounsfield ont partagé le prix Nobel de Médecine en 1979 pour leurs travaux respectifs.

Plusieurs types de scanners existent à l'heure actuelle, différenciés par l'arrangement de leurs composants (émetteurs et récepteurs) et par les mouvements qui les animent (translations et rotations). Le terme "génération" est employé en référence à l'ordre dans lequel sont apparus les différents dispositifs. Au jour d'aujourd'hui, on comptabilise quatre générations de scanners, sachant qu'un nouveau numéro de génération n'a pas été attribué à chaque nouvelle variante développée. Par ailleurs, un numéro de génération plus élevé ne correspond pas nécessairement à de meilleures performances du système. Pour plus de détails sur les différents développements, se référer à l'encyclopédie en ligne Medcyclopaedia développée par General Electric (Anon., 2005c) où à l'article de Schmoldt et al. (1999).

Dans la présente étude, un scanner de 3^{ème} génération a été utilisé. L'appareil est constitué d'une source de rayons X en rotation et d'un ensemble de récepteurs disposés en arc de cercle (**Figure 6**). La source génère un faisceau de photons d'ouverture assez large (faisceau en éventail ou en cône, "*fan beam*" ou "*cone beam*" en anglais) pour englober entièrement l'objet étudié. Ce faisceau peut

avoir des caractéristiques (largeur, énergie) variées. Du fait de l'épaisseur du rayon, les régions élémentaires traversées sont des volumes appelés voxels.

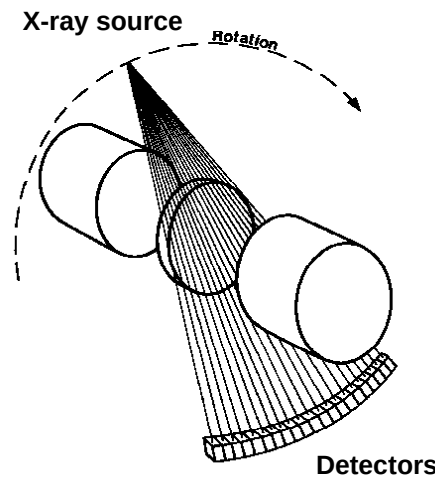


Figure 6 : Schéma de fonctionnement d'un scanner de 3^{ème} génération (extrait de Lindgren (1991a)).

Fig.6. Rotating X-ray tube and detector array (from Lindgren (1991a)).

Le principe général de fonctionnement du scanner est d'effectuer de multiples projections sous différents angles. A partir de l'information collectée lors des différentes projections (ce sont les valeurs des $\ln(I_0/I_s)$, **Équation 3**), il est possible de calculer les coefficients d'atténuation μ de chaque voxel traversé afin de reconstruire une image de la section. La résolution des équations (**Équation 3**) se fait concrètement par implémentation d'une version discrète de la transformée de Radon inverse. La méthode de reconstruction utilisée est la rétroprojection filtrée.

Les valeurs des coefficients d'atténuation sont fortement dépendantes du faisceau émis et notamment de son énergie. Pour rendre possible des comparaisons, une unité normalisée doit être utilisée, ce sont les indices de Hounsfield (I_H) (*CT-numbers* en anglais) qui se calculent à partir des coefficients d'atténuation selon l'**Équation 4**. La normalisation s'effectue par rapport au coefficient d'atténuation de l'eau.

$$I_H = 1000 \cdot \frac{\mu_x - \mu_{\text{eau}}}{\mu_{\text{eau}}}, \quad \text{Équation 4}$$

μ_x et μ_{eau} étant respectivement les coefficients d'atténuation du matériel testé et de l'eau.

Ainsi, les niveaux de gris sur une image de coupe tomographique correspondent aux indices de Hounsfield. Par exemple, l'air, l'eau et les os ont respectivement des valeurs de -1000, 0 et 1000 unités Hounsfield.

Le principe physique de la génération des rayons X est le suivant : les électrons sont accélérés dans un tube grâce à une tension d'accélération en kV (en fait on devrait même parler de kVp qui sont

les kV “peak”, c’est-à-dire la tension d’accélération des électrons) et percutent ainsi une cible : l’anode du tube (par exemple en tungstène, molybdène ou rhodium).

Attention, il ne faut pas confondre les deux grandeurs que sont les kV et les keV. Les kV sont la tension d’accélération du tube qui sert à générer le faisceau. En général, cette tension est de l’ordre de 25 kV pour la mammographie et de l’ordre de 80 kV pour la tomographie. Les keV sont l’énergie des photons qui vont traverser l’objet que l’on image. Par exemple, une tension accélératrice de 30kV confère à un électron une énergie maximale de 30 keV. Mais en pratique, il n’y a pas beaucoup d’électrons qui reçoivent cette énergie. En fait, les électrons reçoivent environ un tiers de l’énergie maximale.

Cette interaction entre les électrons et les atomes de l’anode crée un spectre de photons (**Figure 7**). Ce spectre est limité vers les hautes énergies par la tension du tube (les kVp). Il est formé :

- d'un spectre continu également appelé **rayonnement de freinage**. Ce rayonnement est dû au freinage des électrons incidents à la surface de l'anode. L'électron, à proximité d'un noyau de l'anode, voit sa trajectoire déviée à cause de la forte attraction électrostatique. Ceci lui fait perdre une partie de son énergie qui est rayonnée sous forme de photons (plus il passe près du noyau, plus il perd d'énergie, et donc plus le photon aura une énergie importante). L'énergie des photons est donc limitée à l'énergie maximale des électrons (E_0 sur le graphe, liée à la valeur en kV des kVp). La fréquence des photons évolue donc de 0 à $\nu_{\max}$, d'après la relation $E_0 = h \cdot \nu_{\max}$;
- et d'un **spectre de raies**, ionisation des atomes de l'anode si l'énergie de l'électron est suffisante. Le retour à l'état fondamental se fait par émission d'un ou plusieurs photons (donc d'énergies caractéristiques du matériau de l'anode).

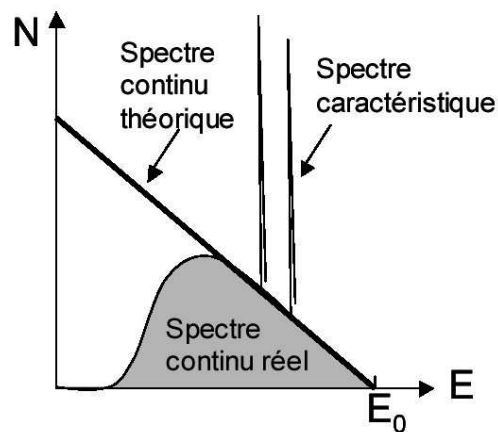


Figure 7 : Schéma représentatif d’un spectre de photons constitué d’un spectre continu et d’un spectre de raies caractéristiques.

Fig. 7. Diagram representative of a photon spectrum.

Par exemple, un électron accéléré par une tension de x kV donne un photon d'énergie maximale égale à x keV. Donc le spectre sera constitué de photons ayant tous une énergie inférieure ou égale à x keV (puisque'une partie de l'énergie peut être perdue).

Sur la **Figure 7** on peut voir un spectre continu théorique et un spectre continu réel. En fait, l'anode absorbe une partie des photons de freinage, surtout ceux de basse énergie. Par contre, l'énergie maximale reste la même.

En pratique deux paramètres peuvent être réglés sur le système : les kVp et les mAs.

Les mAs sont le produit du courant de chauffage et du temps d'exposition. La valeur des mAs est proportionnelle au nombre de photons qui vont constituer le spectre. Les énergie de changent pas, il y a simplement plus de photons. Si on augmente les mAs (quantité d'électrons émis), la tension maximale reste la même, on multiplie juste tout le spectre par un certain coefficient, car on a plus de photons dans chaque bande d'énergie.

Si on augmente les kVp, le spectre continu théorique subit une translation vers le haut.

On peut également jouer sur l'anode et les filtres, cependant, ce sont des éléments fixes du système. La composition de l'anode a surtout une influence sur l'énergie des raies caractéristiques (la forme du rayonnement de freinage peut aussi changer mais l'énergie maximale du rayonnement de freinage reste déterminée par les kVp). On a donc le même spectre, mais les raies caractéristiques sont décalées selon l'anode. Dans l'idéal, on aimerait avoir un spectre monoénergétique. A la sortie du tube, le spectre est filtré pour diminuer l'influence du rayonnement de freinage par rapport aux raies caractéristiques. En mammographie par exemple, l'anode en rhodium permet d'avoir des raies d'énergie plus élevée qu'avec l'anode en molybdène. Il est possible de jouer sur différents couples anode/filtre, pour obtenir différentes formes de spectre. On peut également utiliser une anode (par exemple de type tungstène en mammographie) dont les raies caractéristiques sont en dehors des énergies considérées ($> E_0$ donnée par kVp). On utilisera ainsi que le rayonnement de freinage. Quand on design un tube, il faut prendre en compte l'épaisseur d'anode nécessaire (qui aura une influence aussi), son vieillissement (car l'anode chauffe beaucoup lors du bombardement par les électrons), la puissance du tube, etc.

2.2.3. Calibration pour l'étude du matériau bois

Les applications au matériau bois ont nécessité des travaux spécifiques pour l'analyse des relations entre indices de Hounsfield et densités. Les études réalisées portent sur des échantillons de différentes essences scannés à des niveaux d'humidité variables. En effet, une attention particulière doit être portée à la teneur en eau des échantillons car les coefficients d'atténuation dépendent à la fois de la densité du matériau scanné mais également de son humidité. Une mesure de densité par tomographie à rayons X, par rapport à une méthode classique (par ex. : gravimétrie), présente l'avantage d'être non

destructive et de permettre une quantification spatiale des hétérogénéités de la densité. Les relations entre indices de Hounsfield et densités sont linéaires et leur étude consiste à regarder les variations de leur pente et de leur ordonnée à l'origine dans différents cas de figure.

L'**Équation 5** a été obtenue en 1982 par Benson-Cooper et al. (1982) à partir d'échantillons de plusieurs essences scannés à l'état vert (scanner médical Technicare Delta 2020). La densité est exprimée en kg/m^3 .

$$\text{Densité} = 0.91 \cdot I_H + 1002$$

Équation 5

Hattori & Kanagawa (1985) ont conduit une étude de faisabilité pour la mesure de la distribution de la teneur en eau dans des échantillons de bois avec un scanner médical. Pour ce faire, les échantillons ont été scannés à l'état "vert" puis après séchage et les relations entre densités et indices de Hounsfield ont été étudiées. La pente et l'ordonnée à l'origine de ces relations linéaires semblaient dépendantes de la substance entourant la zone d'intérêt, l'air ayant été remplacé par de l'eau ou du sucre granulaire. De plus, l'uniformité des images tomographiques n'était pas satisfaisante pour des échantillons de faible densité, bien que celle-ci ait été améliorée en utilisant un matériel compensatoire tel que du sucre granulaire.

Lindgren (1991a) a mené une étude afin d'analyser la relation entre les valeurs des I_H et les valeurs de densité sur des échantillons de bois frais et sec. Le coefficient d'atténuation d'un constituant peut être calculé du moment que l'on connaît sa densité et sa composition chimique (Tsai & Cho, 1976 dans Lindgren, 1991a). Par ailleurs, le coefficient d'atténuation d'un matériau se calcule comme une combinaison linéaire des coefficients d'atténuation de ses différents constituants, pondérée par leur pourcentage en volume (Wilson, 1980 dans Lindgren, 1991). Des valeurs de coefficients d'atténuation pour le bois (sec et humide) et ses constituants ont ainsi été calculées par Lindgren (1991a) et sont présentées dans le **Tableau 13**. Le bois est un matériau poreux contenant une proportion d'air importante. Le **Tableau 14** donne des valeurs de coefficients d'atténuation et d' I_H pour différentes proportions en volume de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. Il est apparu que les proportions en cellulose, hémicellulose et lignine influent peu sur le coefficient d'atténuation du bois.

Tableau 13 : Coefficients d'atténuation de constituants du bois (extrait de Lindgren (1991a)).

Table 13. Calculated absorption coefficient for cellulose, hemicellulose and lignin (from Lindgren (1991a)).

<i>Constituant (Substance)</i>	<i>Coefficient d'atténuation (Attenuation coefficient)</i>
Cellulose	0.2634
Hémicellulose	0.2655
Lignine	0.2608

Tableau 14 : Influence sur les indices de Hounsfield de différents pourcentages en volume de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine pour un bois de densité anhydre 0.5g/cm³ (extrait de Lindgren (1991a)).

Table 14. Influence on CT-number of different volume percentages of cellulose, hemicellulose and lignin for wood with a dry density of 0.5g/cm³ (from Lindgren (1991a)).

Cellulose Vol% (Cellulose)	Hemicellulose Vol% (Hemicellulose)	Lignine Vol% (Lignin)	μ_{total}	I_H (CT-number)
50	25	25	0.08775	-527
25	25	50	0.08753	-528
50	40	10	0.08799	-526
10	10	80	0.08715	-530

Lindgren a également établi des relations linéaires entre densités (en kg/m³) et indices de Hounsfield pour respectivement du bois anhydre (**Équation 6**) et du bois à l'état vert (**Équation 7**). Dans les deux cas, la densité a pu être estimée avec précision à partir des indices de Hounsfield.

$$\text{Densité} = 1.052 \cdot I_H + 1053 \quad \text{Équation 6}$$

$$\text{Densité} = 0.993 \cdot I_H + 1015 \quad \text{Équation 7}$$

Lors de la calibration de leur scanner EMI CT1010 à partir d'échantillons de plusieurs essences, Davis & Wells (1992) ont obtenu une relation similaire entre les densités et les indices de Hounsfield (**Équation 8**). L'état d'humidité du bois utilisé n'est pas précisé.

$$\text{Densité} = 1.006 \cdot I_H + 1035 \quad \text{Équation 8}$$

Macedo et al. (2002) ont proposé une procédure de calibration différente de celle de Hounsfield (**Équation 4**) pour l'interprétation des images en terme de densité. Des échantillons secs à l'air provenant de huit essences ont été scannés à différents niveaux d'énergie de la source de rayons X (ou gamma). Trois types de scanners ont été utilisés dans cette étude. Cette calibration a donné des résultats précis avec un R² de 0.94 entre la densité estimée par tomographie et celle mesurée par gravimétrie.

Bien que les relations présentées ci-dessus soient légèrement différentes les unes des autres⁸, les coefficients directeurs sont voisins de 1 et les ordonnées à l'origine sont quant-à elles de l'ordre de 1000. C'est pourquoi, pour étudier les images tomographiques de bois, un offset de 1000 est généralement ajouté à la valeur des indices de Hounsfield initiaux, afin que les niveaux de gris soient assimilables à des densités en kg/m³ (**Équation 9**).

$$\text{Densité} = I_H + 1000 \quad \text{Équation 9}$$

⁸ Les coefficients d'atténuation et les relations linéaires présentés ne sont valides que pour le scanner avec lequel ils ont été calculés. En effet, les valeurs de Hounsfield diffèrent d'un fabricant à l'autre et même entre les scanners d'un même fabricant (Levi et al., 1982 dans Lindgren 1991).

Cette formulation simplifiée, d'une précision de l'ordre de 10%, convient souvent en pratique (Davis & Wells, 1992). De plus, en ce qui nous concerne, les variations des niveaux de gris entre différentes régions de l'image importent plus que les valeurs des niveaux de gris (ou de densité) elles-mêmes. Avec cette formulation, les valeurs pour l'air et l'eau sont respectivement 0 et 1000 et les valeurs pour le bois sont positives, pouvant être assimilées à des valeurs de densité.

2.3. Les images tomographiques de la base de données

2.3.1. Caractéristiques et stockage des images

Les données ont été obtenues grâce à un scanner installé en Suède (Luleå University of Technology, Skellefteå Campus), le même ayant servi à créer la banque de données suédoise sur le Pin et l'Epicéa (Grönlund et al., 1994). Il s'agit d'un scanner médical Siemens SOMATOM AR. T. de 3^{ème} génération. Environ 2h30 sont nécessaires pour scanner un billon avec cet équipement.

Un billon est représenté par une pile d'images de taille 512 x 512 pixels et espacées longitudinalement de 1cm (à un billon de 4.5m correspond une pile de 450 images tomographiques). Le réglage de la résolution transversale dépend du diamètre du billon scanné : le champ de vue varie de 350mm pour les plus petits billons à 450mm pour les plus gros, soit une résolution dans tous les cas inférieure au millimètre pour un pixel. L'épaisseur de coupe est de 5mm, correspondant à l'épaisseur du faisceau de rayons X. En raison de cette épaisseur, le niveau de gris d'un pixel est en fait le résultat d'une intégration sur 5mm, cela pouvant induire un certain flou dans la frontière des objets présents sur les images tels que les cernes ou les branches. Par ailleurs, le pas longitudinal étant de 10mm, il reste 5mm qui ne sont pas scannés entre chaque coupe (**Figure 8**). Les images sont codées sur 12 bits, les niveaux de gris pouvant ainsi varier en théorie de 0 à 4095, cependant toute l'échelle disponible n'est pas utilisée.

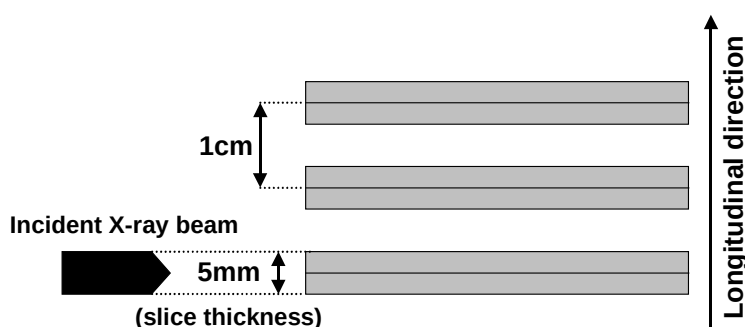


Figure 8 : Schéma illustrant l'épaisseur de coupe de 5mm ainsi que l'espace non scanné entre les coupes de 5mm également.

Fig. 8. Drawing illustrating the slice thickness of 5mm and the space not scanned between slices of 5mm as well.

Les images d'origine sont stockées dans des fichiers d'extension .IMA contenant un entête codé sur 6144 octets. Des informations sur le modèle du scanner (Siemens Somatom AR.), les caractéristiques de la source de rayons X (110kV et 50mA), le numéro de l'image dans la pile,

l'identifiant du billon, la date de l'examen et la résolution des images (350, 400 ou 450) sont disponibles dans cet entête.

Après suppression de ces entêtes et conversion des données en flottants, les images appartenant à un billon sont stockées les unes à la suite des autres dans un même tableau. A un billon de 4.5m correspond ainsi un tableau de $512 \times 512 \times 450 = 117964800$ éléments, chacun d'entre eux étant codé sur 4 octets soient 471859200 octets au total.

2.3.2. Traitements préliminaires sur les images

2.3.2.1. Ressources logicielles

Très tôt, nous avons dû effectuer le choix d'un langage et d'un environnement de programmation. Des logiciels, tels que MATLAB, proposent des boîtes à outils spécialisées dans le traitement des images. Cependant, nous avons orienté notre choix vers une programmation en C essentiellement pour trois raisons : (i) l'équipe du projet ISA de l'INRIA avait mis à notre disposition leur bibliothèque de traitement d'images programmée en C ; (ii) un des objectifs de la thèse étant de se familiariser avec les techniques d'analyse d'images, la programmation d'algorithmes de la littérature⁹ a permis de bien comprendre leur fonctionnement ; (iii) l'utilisation de ressources libres a également motivé notre choix, cela nous permettant entre autres une utilisation ultérieure de nos algorithmes sans contrainte.

La plupart des ressources informatiques utilisées sont donc libres. La bibliothèque libre GSL (Gnu Scientific Library) a été utilisée pour le calcul matriciel. Les programmes ont été compilés avec GCC sous Linux Mandrake ou bien GCC (3.2.3) sous Windows XP. Les logiciels libres ImageJ, Gimp, Geomview (ce dernier ne fonctionnant que sous Linux) et VTK ont également servi pour des phases de test (ImageJ), de validation (Gimp a par exemple été utilisé pour les détourages manuels servant à la validation), ou de visualisation 3D (Geomview, VTK).

2.3.2.2. Traitements préliminaires

Par convention, l'origine du repère pour chaque section a été placée en haut et à gauche de l'image (**Figure 9**).

⁹ Nous avons implémenté la quasi totalité des algorithmes utilisés pour le traitement de nos images.

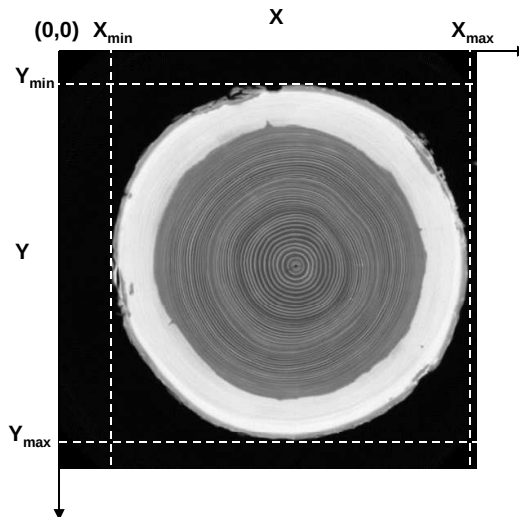


Figure 9 : Repère utilisé pour le traitement des images. L'origine du repère est placé en haut et à gauche de l'image.

Fig.9. Reference mark used for image processing. The origin is in the upper left corner of the image.

La première opération effectuée pour chaque billon avant tout traitement est le calcul de sa boîte englobante¹⁰ afin de limiter le volume de données à manipuler.

La **Figure 10** montre un exemple d'image obtenue ainsi que l'histogramme des niveaux de gris (assimilables à des densités) correspondant. Les niveaux de gris utilisés pour la représentation des densités sur cette coupe sont compris entre 0 et 1126. L'histogramme comporte trois modes principaux correspondant au fond de l'image, au duramen et à une dernière classe regroupant à la fois les nœuds et l'aubier.

¹⁰ Il s'agit d'englober le billon dans un parallélépipède rectangle dont les dimensions sont définies par les valeurs X_{min} , X_{max} , Y_{min} et Y_{max} (Figure 9) calculées à partir des sections de l'ensemble de la pile d'images.

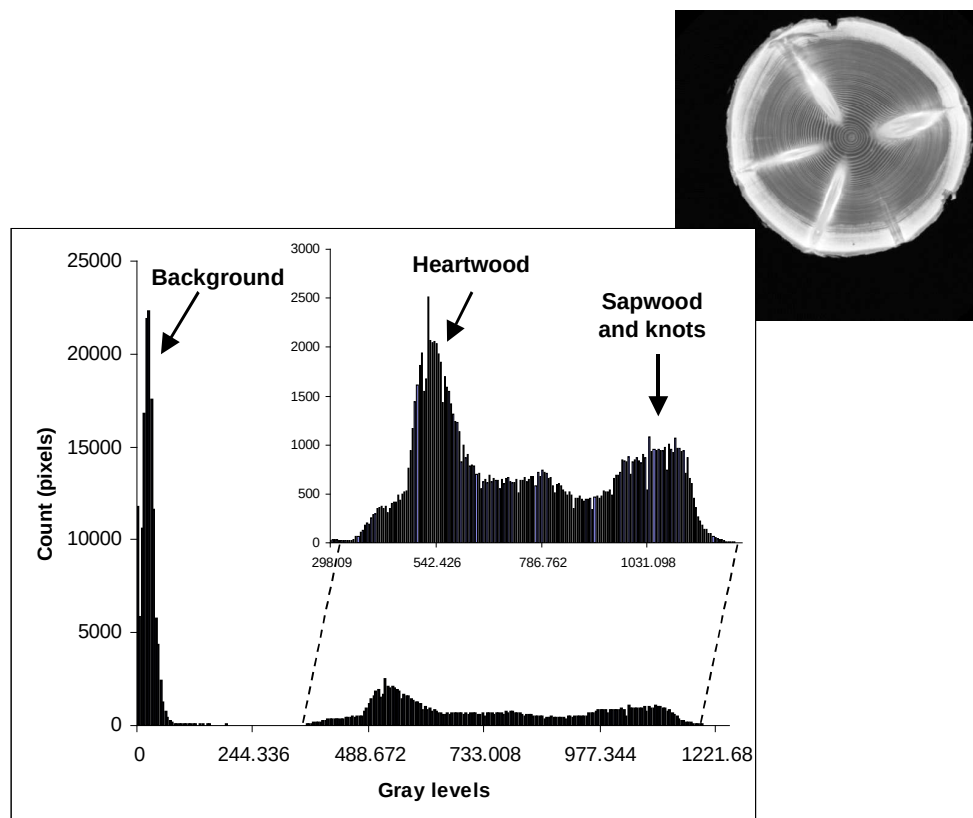


Figure 10 : Histogramme des niveaux de gris sur une coupe verticillaire.

Fig. 10. Histogram of the grey levels for a slice showing a whorl.

Grundberg & Grönlund (1991) ont utilisé les cinq classes de densité du **Tableau 15** en vue d'identifier les différentes composantes présentes sur des images tomographiques de Pin sylvestre.

Tableau 15 : Classes de niveaux de gris pour les principaux composants d'une image tomographique de Pin sylvestre (Grundberg & Grönlund, 1991).

Table 15. Grey-level classes for the main wood components in CT images of Scots Pine (Grundberg & Grönlund, 1991).

<i>Constituants (Component)</i>	<i>Densités mesurées à partir des images CT (kg/m³) (Densities measured from CT images)</i>
Air	0-250
Heartwood, dead knots	250-775
Compression wood	775-900
Sapwood	900-1000
Sound knots	>1100

La densité élevée de l'aubier est directement liée à une teneur en eau importante dans les billons scannés à l'état frais. Un problème important mentionné par les auteurs était de distinguer l'aubier des nœuds sains par seuillage sur les niveaux de densité. Ce problème est également présent

sur nos images pour de l'Epicéa ; dans l'histogramme présenté (**Figure 10**), l'aubier et les nœuds correspondent à un mode unique et un simple seuillage ne permet pas de les distinguer.

Outre les nœuds, l'aubier et le duramen, d'autres singularités sont accessibles à partir d'images tomographiques : les cernes de croissance, les fentes, le bois de compression (**Figure 11a**), les poches de résine (**Figure 11b**), les altérations, etc. La **Figure 12** présente des défauts moins courants sur les images des billons de notre échantillon. Sur la **Figure 12a**, il s'agit probablement d'une blessure cicatrisée, quant-à l'image de droite (**Figure 12b**), les cernes présentent un aspect particulier ; là encore il s'agit probablement d'une blessure.

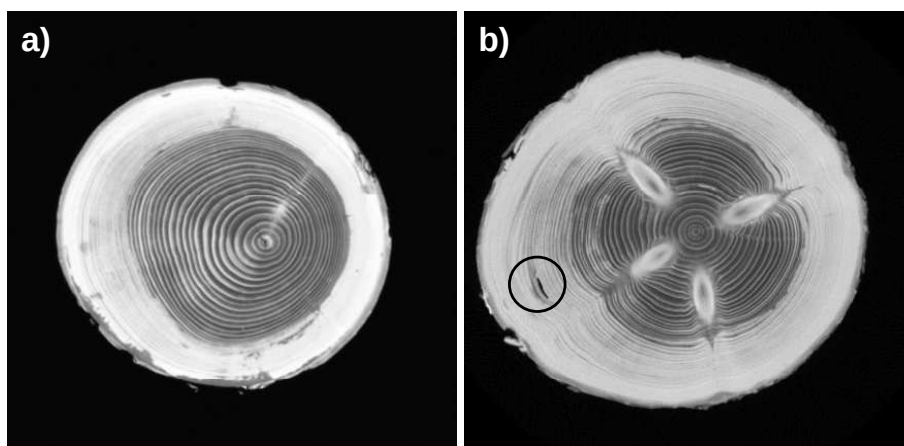


Figure 11 : Exemple de défauts relativement courants observables sur des images tomographiques d'Epicéa : **a)** Bois de compression (coupe n°14 du billon 34-2-5) ; **b)** Poche de résine dans l'aubier (coupe n°378 du billon 31-4-1).

Fig. 11. Example of relatively common defects visible on CT images of Spruce: a) Compression wood; b) Resin pocket in sapwood.

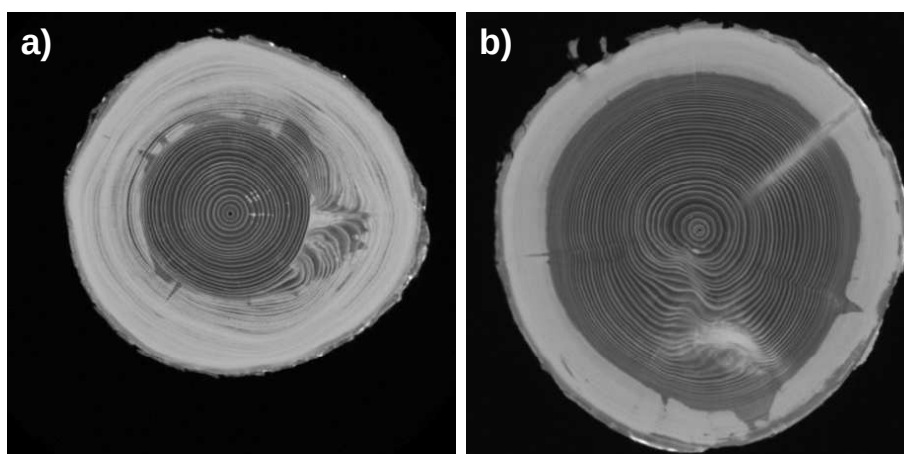


Figure 12 : Exemple de défauts plus particuliers résultant probablement de blessures et de leur cicatrisation.

Fig.12. Example of more particular defects probably resulting from wounds.

Enfin, bien que l'intérêt majeur de la tomographie à rayons X soit d'accéder à des informations sur la structure interne des billons, elle permet également une description très précise de leur forme externe (défilement, courbure, irrégularités de la surface, dimensions). En particulier, il est possible de simuler à partir d'images tomographiques les données de forme externe que l'on obtiendrait avec un scanner optique multi-points. Les algorithmes de détection et les modèles développés pour des données issues de scanners optiques restent donc applicables à des images obtenues par tomographie.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats obtenus au cours de la thèse sont présentés et discutés dans ce chapitre. Quand un article a été produit, il y est fait référence et, la méthode et les résultats sont brièvement rappelés. Certaines parties n'ayant pas encore fait l'objet de publication, c'est notamment le cas pour la détection de l'écorce ou des nœuds, font l'objet d'un développement plus détaillé.

3.1. La moelle

3.1.1. Détection de la moelle

La mise au point d'un algorithme de détection de la moelle dans les billons a été motivée par la nécessité de connaître la position précise de cette dernière pour l'identification d'un grand nombre d'autres caractéristiques et par l'absence dans la littérature de méthode capable de gérer la présence des verticilles et de fortes excentricités.

Les images tomographiques traitées représentent des sections de bois ronds et par conséquent, sur ces images, le duramen, l'aubier, les cernes de croissance ont une forme circulaire. La position de la moelle, au centre du 1^{er} cerne annuel de croissance, permet des traitements efficaces dans des directions radiales, ce qui est souvent adapté pour la détection de structures circulaires. De plus, elle facilite également la détection de composantes radiales telles que les branches dont les axes principaux passent par la moelle.

L'approche la plus fréquente rencontrée dans la littérature pour localiser la moelle est de s'appuyer sur la structure des cernes de croissance. Des tests préliminaires nous ont permis de désigner la transformée de Hough comme étant une méthodes efficace et robuste. A titre d'exemple, le traitement de 400 coupes d'un billon de notre échantillon par trois méthodes proposées dans la littérature est décrit dans la sous-section 3.1.1.1.

3.1.1.1. Exemple de mise en œuvre d'algorithmes de la littérature pour le traitement de nos images

La méthode utilisant un comptage des tangentes horizontales et verticales (méthode A) développée par Som et al. (1993; 1995) a donné d'assez bons résultats sur nos images. Un exemple de détection est donné **Figure 13** pour deux sections, l'une avec nœuds (image de gauche) et l'autre sans nœud (image

de droite). Sur la section sans nœud, la détection marche parfaitement bien. En présence de nœuds d'orientation proche de l'horizontale ou de la verticale (c'est le cas sur l'image de gauche avec un nœud proche de la verticale), la détection peut être perturbée car les tangentes dans ces directions ne sont plus détectables et par conséquent l'intersection des deux droites blanches ne se situe plus au niveau de la moelle. En revanche, la recherche des tangentes à 45° par rapport aux directions horizontale et verticale (droites grises) permettait dans ce cas de localiser la moelle (**Figure 13**, image de gauche). Nous n'avons effectué ici qu'une seule itération du comptage des tangentes (cf. description de la méthode § 1.2.1).

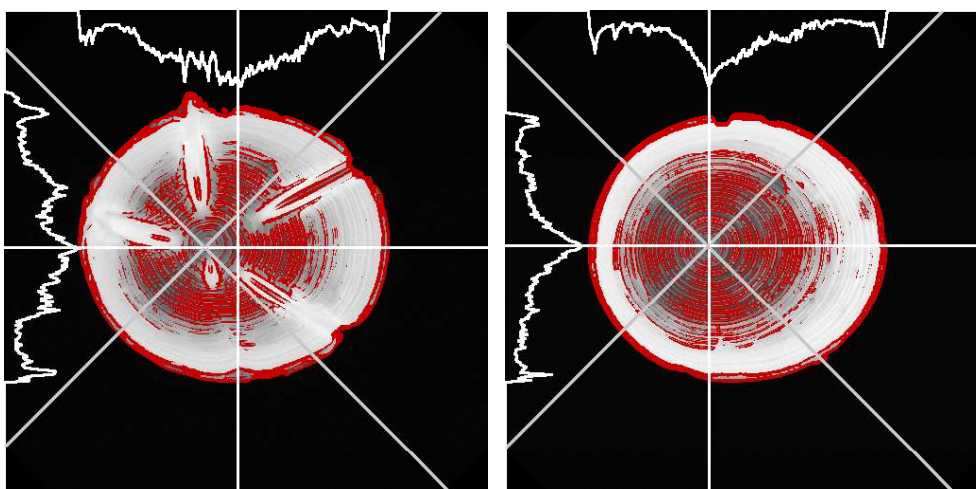


Figure 13 : Détection de la moelle par comptage des tangentes horizontales et verticales aux contours sur une coupe avec nœuds (à gauche) et sur une coupe sans nœud (à droite) (respectivement coupes n°30 et 40 du billon 31-1-3). Les pixels rouges sont ceux appartenant à des tangentes. Des histogrammes pour le comptage du nombre de tangentes horizontales et verticales apparaissent respectivement sur le bord supérieur et sur le bord gauche de l'image. L'intersection des deux droites blanches, passant par les maximum des deux histogrammes, donne la position de la moelle. Pour information les deux droites grises ont été obtenues à partir du comptage des tangentes dans une direction à 45° par rapport à l'horizontale et à la verticale.

Fig. 13. Pith detection by counting the number of horizontal and vertical edge tangents in a slice containing knots (on the left) and in a slice without any knot (on the right). Red pixels belong to tangents. Histograms for the counting of horizontal and vertical tangents appear respectively on the upper border and on the left border of the image. The crossing of the two white lines, passing through the maximum of the two histograms, gives the pith position. For information, the two grey lines were obtained in directions at 45° from horizontal and vertical.

La méthode de détection basée sur la densité de la moelle (Jaeger et al., 1999) a également été testée (méthode B). La **Figure 14** illustre le creux de densité au niveau de la moelle à partir du tracé d'un profil de niveaux de gris passant par la moelle. Avec cette procédure, il arrivait fréquemment de perdre le suivi de la moelle lors du passage dans un verticille. En effet, à l'approche d'une zone de branches, la moelle présentait sur les images tomographiques une densité plus élevée et un rétrécissement de son diamètre, le pointeur pouvant alors passer dans un cerne voisin moins dense et y rester bloqué. Ce cas est illustré **Figure 15**, où l'on peut voir le pointeur bien positionné sur la coupe n°24, passer dans le 1^{er} cerne sur les coupes n°25 et 26 (les branches du verticille concerné étaient

visibles à partir de la section n°28). La présence de fentes de cœur sur les sections, qui sont des zones très peu dense (densité voisine de celle de l'air) conduisait également à des pertes du suivi de la moelle et à des déplacements du pointeur dans la fente au gré des variations locales de densité.

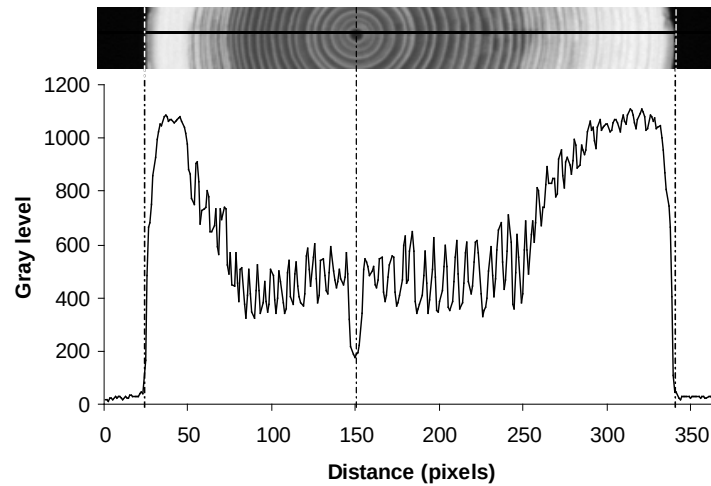


Figure 14 : Profil de niveaux de gris passant par la moelle illustrant la faible densité de cette dernière par rapport au reste de la rondelle (coupe n°40 du billon 31-1-3).

Fig.14. Grey level profile passing through the pith illustrating the low density of pith comparing to the rest of the section.

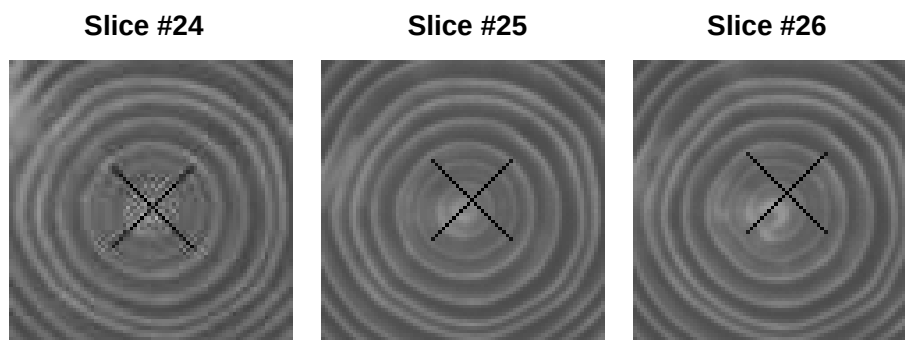


Figure 15 : Illustration de la perte du suivi de la moelle sur la base de sa densité (méthode B) à l'approche d'un verticille (Billon 31-1-3, coupes 24, 25, 26). Les branches du verticille deviennent visibles à partir de la coupe n°28.

Fig. 15. Illustration of the loss of the pith for the tracking based on its density in the neighbourhood of a whorl. The knots were present on the above sections.

Enfin, une approche par transformée de Hough à partir de droites orthogonales aux contours, telle que décrite dans l'étude de Wu & Liew (2000), a été programmée (méthode C). Le type d'images traitées n'était cependant pas le même car, Wu & Liew ont travaillé sur des photos de sections; quant à la qualité des images, il est difficile d'effectuer des comparaisons. Par ailleurs, nous avons décidé de ne pas sous-échantillonner les pixels de contour afin de garder le maximum d'information, quitte à ce

que le traitement des images soit plus long. Pour les sections sans nœud, les résultats étaient très satisfaisants avec un pic d'accumulation bien marqué. En présence de nœuds sur les sections, les cernes de croissance pouvaient être déformés par le passage des branches et les contours détectés, pouvant appartenir aussi bien à un cerne qu'à une branche, ne permettaient plus une détection suffisamment précise sur les images concernées.

Les profils des erreurs de détection pour les trois méthodes A, B et C implémentées, évaluées par comparaison avec un pointage manuel de la moelle sur les images, sont présentés **Figure 16**. Le comptage des tangentes donne de bons résultats mais la transformée de Hough s'est avérée plus précise avec une erreur moyenne de détection dans le billon de l'ordre de 1mm (**Tableau 16**). La significativité de cette différence a été mise en évidence par un test de Student apparié sur les 400 coupes considérées.

Dans tous les cas, la présence des branches sur les images a perturbé la détection (de nombreux pics d'erreur sur la **Figure 16** sont dus à des zones de branches dans le billon). Bien que les résultats obtenus par la transformée de Hough soient les plus précis, l'excentricité et l'ellipticité des cernes du billon traité ont toutefois réduit la précision de la méthode. Une amélioration pourrait être apportée en restreignant la détection à des sous-fenêtres centrées autour de la moelle, les cernes étant plus circulaires et concentriques dans cette partie de la section.

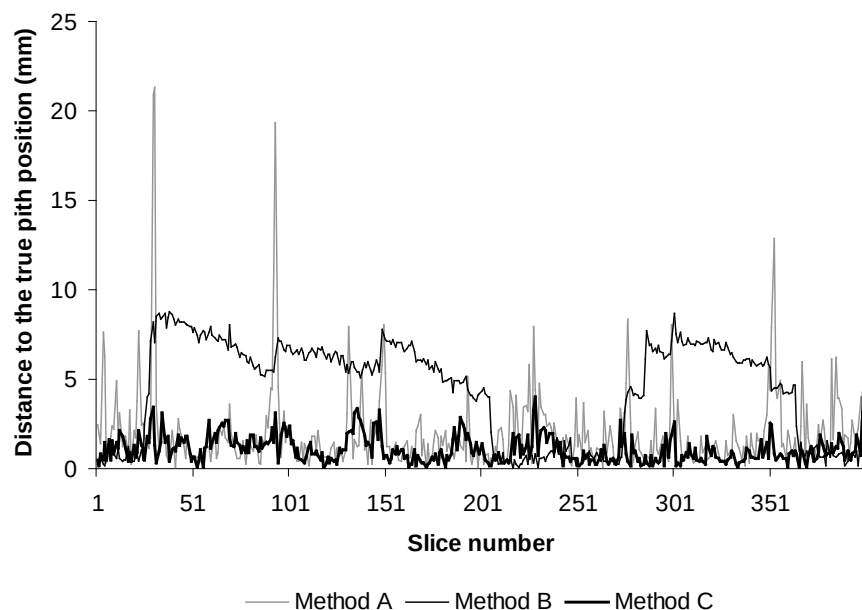


Figure 16 : Evaluation visuelle des résultats de détection de la moelle dans un billon (31-1-3) pour les trois méthodes testées : celle basée sur le comptage des tangentes aux contours (méthode A en gris) ; celle basée sur la densité (méthode B en noir) et celle utilisant une transformée de Hough (méthode C en noir gras).

Fig. 16. Visual evaluation of the results of pith detection in a log for the three tested methods: the one based on the tangent counting (method A in grey); the one based on density (method B in black) and the one using a Hough transform (method C in bold black).

Tableau 16 : Erreurs de détection calculées à partir du traitement de 400 coupes d'un billon (31-1-3) pour les méthodes A, B et C précédemment décrites.

Table 16. Errors of detection calculated from the processing of 400 slices of one log for the methods 1, B and C described above.

<i>Distance à la position de la moelle obtenue par pointage manuel (mm)</i>	<i>Méthodes (Methods)</i>		
<i>Distance to the observed pith position</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>Moyenne (mean)</i>	1.94	4.44	1.07
<i>Ecart-type (standard deviation)</i>	2.33	2.77	0.73
<i>Médiane (median)</i>	1.34	5.5	0.89

Nous n'avons donc pu trouver d'algorithmes de détection de la moelle dans les billons, entièrement automatiques, capables de gérer la présence de branches sur les images ainsi que d'éventuelles excentricité et ellipticité des cernes. Pour développer un tel algorithme, il faudrait notamment pouvoir distinguer les coupes "sans nœuds" des coupes "avec nœuds" ; il serait alors possible de correctement détecter la moelle sur les premières, puis d'utiliser une interpolation pour la détection sur les dernières. C'est l'idée générale de l'algorithme que nous avons développé.

3.1.1.2. Description de notre algorithme et des améliorations apportées

L'article I décrit l'algorithme de détection de la moelle développé dans le cadre de la thèse. Le traitement se décompose en deux étapes majeures : une étape (a) de localisation de la moelle par transformée de Hough (Duda & Hart, 1972); une étape (b) de correction par interpolation en cas notamment de présence de verticilles.

La phase (a) est résumée **Figure 17**. Ce traitement est appliqué de proche en proche sur toutes les coupes du billon. La sous-image, de taille 49 x 49 pixels, sur laquelle est effectuée la détection de contours est centrée sur la position de la moelle détectée à la coupe précédente. Les cernes les plus proches du centre sont en général circulaires et bien centrés. Travailler dans un voisinage de taille réduite permet de localiser la moelle avec précision même en cas de forte excentricité ou d'ellipticité des cernes, cela permet par ailleurs de diminuer considérablement le temps de traitement. Dans le cas de coupes sans branche, la transformée de Hough conduit à un pic marqué, position à laquelle se coupent un maximum de droites orthogonales aux contours. Ce pic correspond précisément à l'emplacement de la moelle. Pour les coupes verticillaires, il n'y a pas de point d'accumulation évident (**Figure 17**, partie du bas), c'est ce critère qui va permettre de les identifier. Les coupes pour lesquelles la valeur du maximum d'accumulation se trouve sous un certain seuil sont identifiées comme présentant des nœuds ne permettant pas une détection directe de la moelle. La correction de la

détection sur ces sections est effectuée lors de l'étape (b). Les verticilles étant présents sur plusieurs coupes consécutives, il s'agit généralement de séries de coupes qui sont concernées.

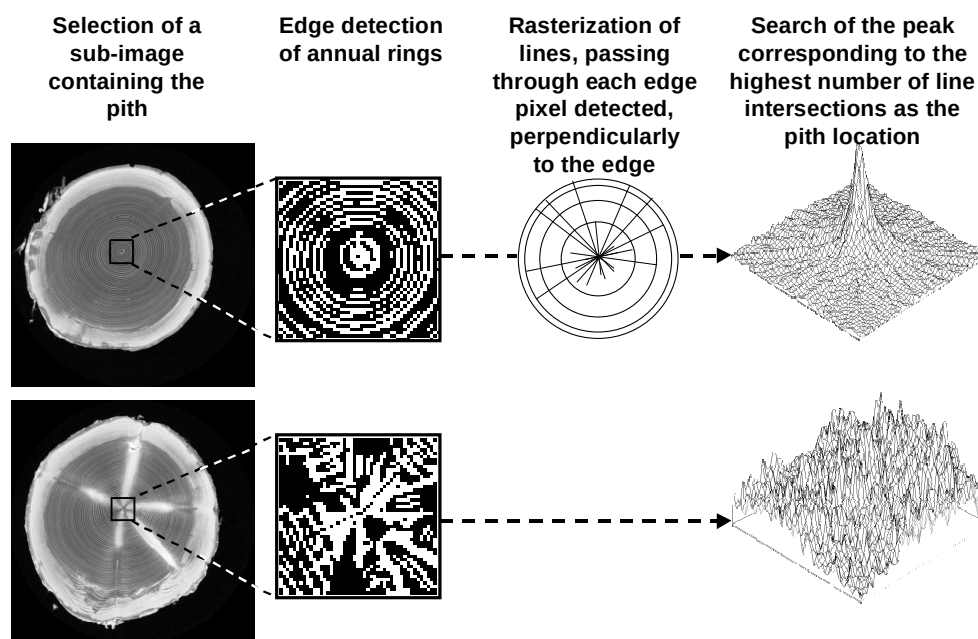


Figure 17 : Description de la phase (a) et résultat obtenu en sortie de la transformée de Hough pour une coupe sans nœud (en haut) et avec nœuds (en bas).

Fig. 17. Description of the step (a) and obtained results as output of the Hough transform for a slice without any knot (above) and with knots (below).

L'étape (b) consiste à recalculer la position de la moelle sur les coupes contenant des nœuds à partir des coupes situées de part et d'autre et sur lesquelles la détection a bien fonctionné. L'estimation se fait par interpolation linéaire.

Un pointage manuel de la moelle sur les images a permis de valider l'algorithme développé. Les résultats de la validation sont présentés dans l'**article I**. L'erreur moyenne de la détection automatique est de inférieure au millimètre, ce qui est comparable à la précision obtenue par un pointage manuel et évaluée par un test de reproductibilité. L'algorithme donne de très bons résultats en présence de branches et/ou de forte excentricité ou ellipticité. A titre informatif, la **Figure 18** permet la comparaison sur un billon (le même que celui utilisé pour la comparaison des méthodes, § 3.1.1.1) de notre algorithme avec la méthode originale proposée par Wu & Liew (2000). L'erreur moyenne de détection sur le billon considéré (400 coupes) est de 1.07 (0.73)¹¹mm (résultat obtenu pour la méthode C, cf. **Tableau 16**) avec la méthode de base et de 0.56(0.35)mm avec notre algorithme. L'amélioration apportée par notre algorithme pour la détection de la moelle dans ce billon est significative et a été mise en évidence par un test T apparié ($p < 0.0001$).

¹¹ Le chiffre entre parenthèses est l'écart-type de l'erreur de détection.

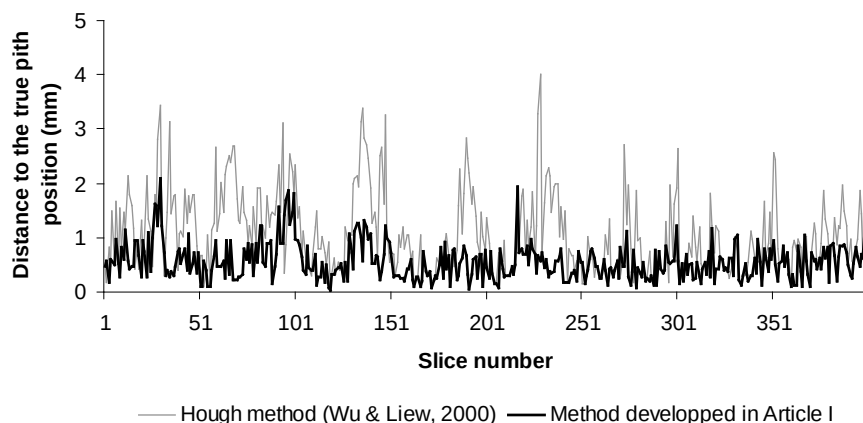


Figure 18 : Mise en évidence sur le billon 31-1-3 des améliorations apportées par notre algorithme (profil en noir) par rapport à la méthode de base décrite dans Wu & Liew (2000) (profil gris déjà présenté Figure 16, méthode C).

Fig. 18. Illustration on log 31-1-3 of enhancements due to our algorithm (black profile) compared to the basic method described in Wu & Liew (2000) (grey profile already presented on Fig. 16, method C).

Les éventuelles fentes de cœur ne posent pas de problème particulier car la structure circulaire des cernes de croissance permet toujours une bonne détection de la moelle, l'étape (b) n'est pas nécessaire dans ce cas.

La situation pouvant engendrer une difficulté est la présence de morts d'apex¹² dans nos billons. Cependant, même dans ce cas, les résultats restent satisfaisants. La **Figure 19** illustre les résultats obtenus dans un verticille présentant une mort d'apex. Les positions de la moelle sur les images b), c), d) et e) ont été calculées par interpolation linéaire (étape (b) de l'algorithme) à partir des positions détectées à l'étape (a) sur les coupes a) et f) situées de part et d'autre. La présence de mort d'apex se traduit par une forte variation de la position de la moelle dans le plan transversal, sur des distances longitudinales relativement courtes, en raison de la prise de relais par une branche latérale. A titre d'exemple, la moelle s'est déplacée de 3cm entre sa position sur la coupe a) et sa position sur la coupe f)¹³, ces deux coupes étant espacées longitudinalement de 10cm. La détection des morts d'apex permet la mise en évidence de zones de rupture dans le processus de croissance en hauteur. Elle fournit une information importante en ce qui concerne l'architecture des arbres car, d'un point de vue biologique, il ne s'agit plus de l'axe principal mais d'un élément d'ordre 2 qui a pris le relais.

¹² Il s'agit de la mort du bourgeon terminal d'une tige. Cela entraîne généralement une prise de relais par un bourgeon latéral, d'où la présence de deux moelle observables sur les sections concernées.

¹³ $\sqrt{(308-265)^2 + (258-254)^2} * 350 / 512 = 29.5\text{mm}$

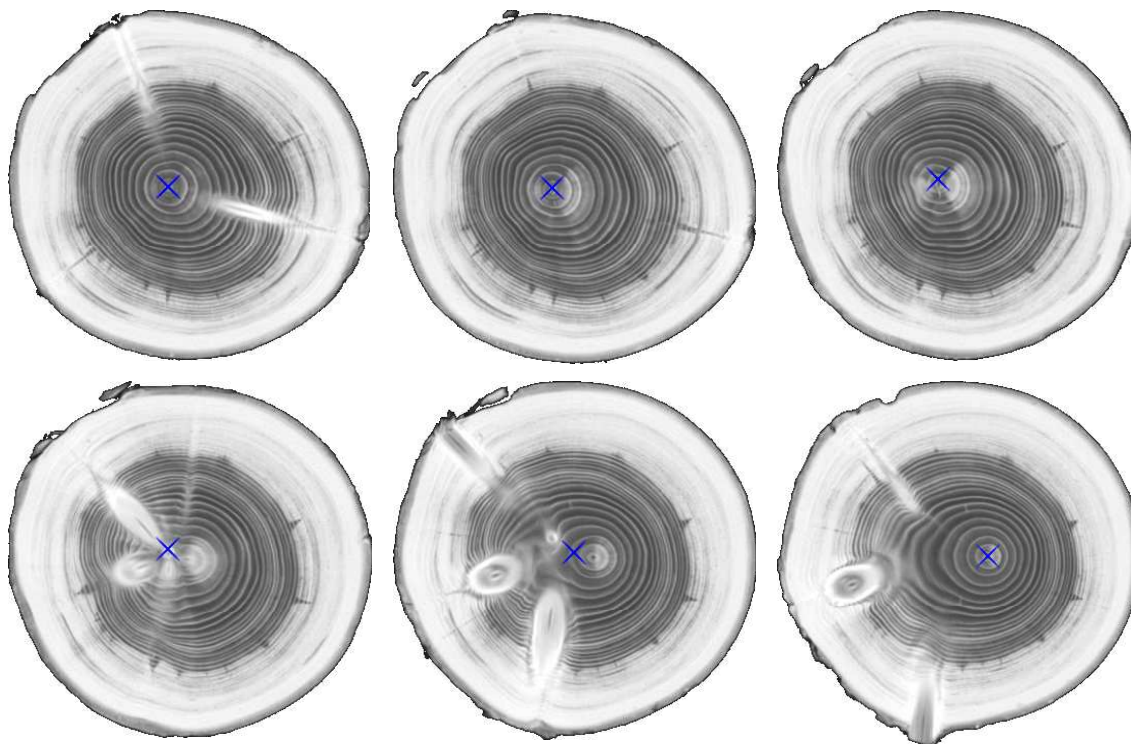


Figure 19 : Détection automatique de la moelle (mise en évidence par des croix) en présence d'une mort d'apex. Les résultats sont affichés pour une coupe sur deux appartenant au verticille concerné afin de limiter le nombre d'images présentées ; l'espace entre deux coupes est donc de 2cm. (coupes n°215, 217, 219, 221, 223 et 225 du billon 31-2-2).

Fig. 19. Automatic detection of pith (crosses) when apex death occurred. Results are presented every two slices belonging to the whorl; thus, the space between two slices is 2cm.

La **Figure 20** est la reconstruction 3D du profil de la moelle détectée dans un billon contenant des morts d'apex.

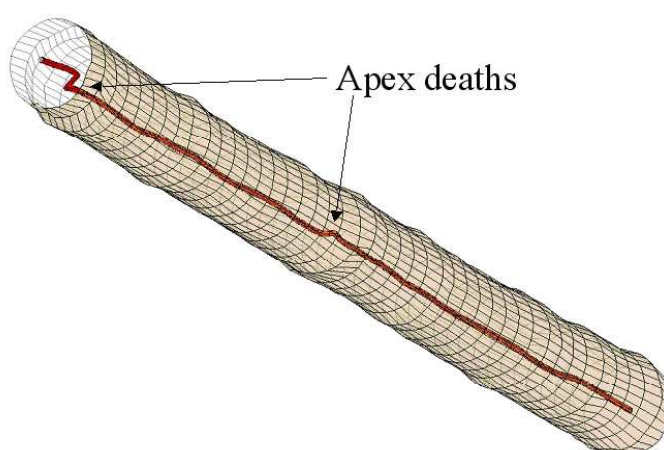


Figure 20 : Reconstruction 3D du profil de la moelle dans un billon contenant des morts d'apex (la moelle a été grossie pour la rendre plus visible).

Fig. 20. 3D reconstruction of the pith profile in a log showing apex deaths.

3.1.2. Variations longitudinales du diamètre et de la densité de la moelle

A l'occasion de ce travail, nous avons pu observer sur les images scannées des variations longitudinales du diamètre et de la densité de la moelle dans un billon. Lors du passage dans un verticille, le diamètre de la moelle semblait se rétrécir tandis que sa densité semblait au contraire augmenter. La **Figure 21** illustre une coupe longitudinale passant par la moelle reconstruite à partir des images tomographiques d'un de nos billons. La diminution du diamètre est visible au niveau des verticilles. Cependant cette observation pouvait très bien être un artefact lié à la présence de plusieurs branches très denses à proximité de la moelle à la base du verticille. De plus, la résolution des images tomographiques était insuffisante pour permettre une analyse précise de ces variations. En effet, dans les verticilles de certains billons du bas, la moelle était à peine voire pas visible du tout et la densité à cet endroit, étant le résultat d'une moyenne avec les branches voisines, était difficilement interprétable.

Les références sont rares concernant les caractéristiques géométriques ou de densité de la moelle. Quelques études (Edelin, 1993; Heuret et al., 2000) mentionnent cependant une variation de son diamètre avec un rétrécissement entre deux UC (**Figure 22**) ainsi qu'une variation de sa couleur chez certaines essences telles que le chêne sessile (Heuret et al., 2000). Ces marqueurs peuvent être utilisés a posteriori pour rendre compte de la cinétique d'allongement des arbres étudiés (Caraglio & Barthélémy, 1997). Dans la pratique, la variation du diamètre de la moelle est souvent utilisée car la limite entre deux UC ne peut pas toujours être déterminée de façon certaine à partir des cicatrices de bourgeons visibles sur l'enveloppe externe d'une pousse, surtout dans la partie basse des arbres âgés où ces marqueurs externes s'estompent. Pour cela, les tiges de bois étudiées sont fendues longitudinalement au niveau de la moelle, cependant, cette opération n'est réalisable que pour des tiges de faible diamètre et pour des essences qui se fendent facilement au niveau de la moelle. L'analyse de la moelle par analyse tomographique à rayons X présente donc un intérêt certain.

Afin de vérifier cette observation, nous avons réalisé des analyses complémentaires sur des sections d'une planche contenant la moelle. En particulier, nous nous sommes intéressée aux valeurs de densité de la moelle dans et en dehors des verticilles. Deux méthodes ont été mises en œuvre : la radiographie X (terminé) et l'analyse de coupes microscopiques (en cours).

Des coupes transversales de 1.9mm d'épaisseur, espacées de 2cm en longitudinal, ont été réalisées dans une planche contenant la moelle. La longueur ainsi étudiée est de 1m et contient deux verticilles. Ces coupes ont ensuite été radiographiées. Deux exemples d'images obtenues sont donnés **Figure 23**. Sur ces radiographies, les différences de diamètre et de niveaux de gris sont clairement visibles.

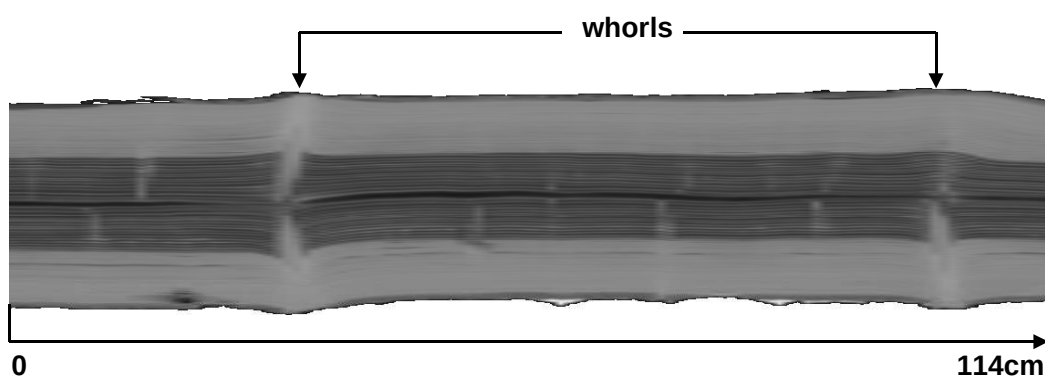


Figure 21 : Reconstruction d'une coupe longitudinale passant par la moelle à partir des images tomographiques (billon 31-3-3). La résolution du scanner pour ce billon était de 0.68mm/pixel.

Fig. 21. Reconstruction of a longitudinal cut containing the pith from CT slices (log 31-3-3). The scanner resolution was 0.68mm/pixel.

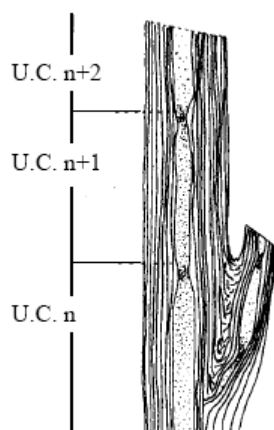


Figure 22 : Variation du diamètre de la moelle (extrait de Edelin (1993)).

Fig. 22. Variation of the pith diameter (from Edelin (1993)).

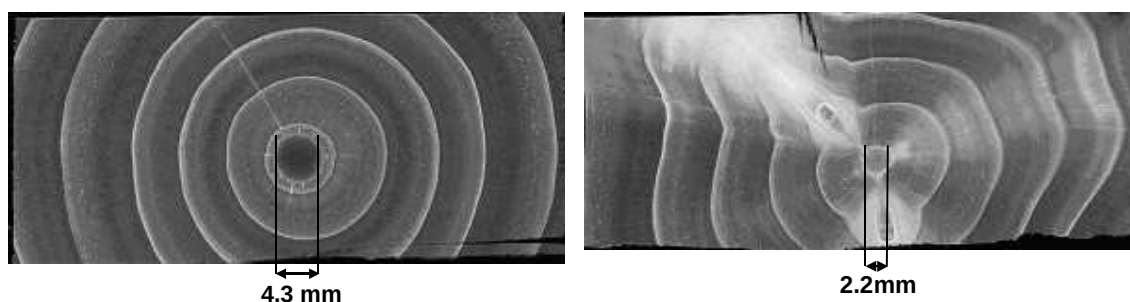


Figure 23 : Radiographies de coupes de 1.9 mm d'épaisseur contenant la moelle. La coupe de gauche a été échantillonnée entre deux verticilles, vers le milieu de l'UC; celle de droite appartenait au verticille situé directement au dessous de la coupe de gauche.

Fig. 23. Radiographs of 1.9 thick slices containing the pith. The left slice was sampled between two whorls, in the middle of the growth unit; the right one belonged to the whorl immediately above of the left slice.

Les niveaux de gris des images ont été calibrés à l'aide d'un étalon en Kemetal (polyoxyméthylène) à trois niveaux d'épaisseur. Ce matériau a une composition atomique et une densité voisines de celles de la matière ligneuse. Une régression polynomiale permet ainsi d'interpréter les niveaux de gris comme des densités. Cependant la composition exacte de la moelle étant inconnue ici, les densités obtenues à partir des niveaux de gris observables dans la moelle pourront être légèrement différentes des densités réelles. Pour cette raison nous parlerons plutôt de pseudo-densités. Par ailleurs, nous sommes d'avantage intéressée par les variations de densité que par leurs valeurs exactes. A partir de ces images, le diamètre et la densité de la moelle ont été mesurés sur une série de 52 coupes consécutives espacées de 2cm. Les résultats obtenus sont présentés **Figure 24**. Les étranglements du diamètre sont visibles au niveau des limites d'UC. Le long d'une UC, le diamètre semble diminuer de façon progressive, de manière similaire à l'évolution d'un profil de tige. En ce qui concerne la densité, des pics importants se produisent dans les verticilles.

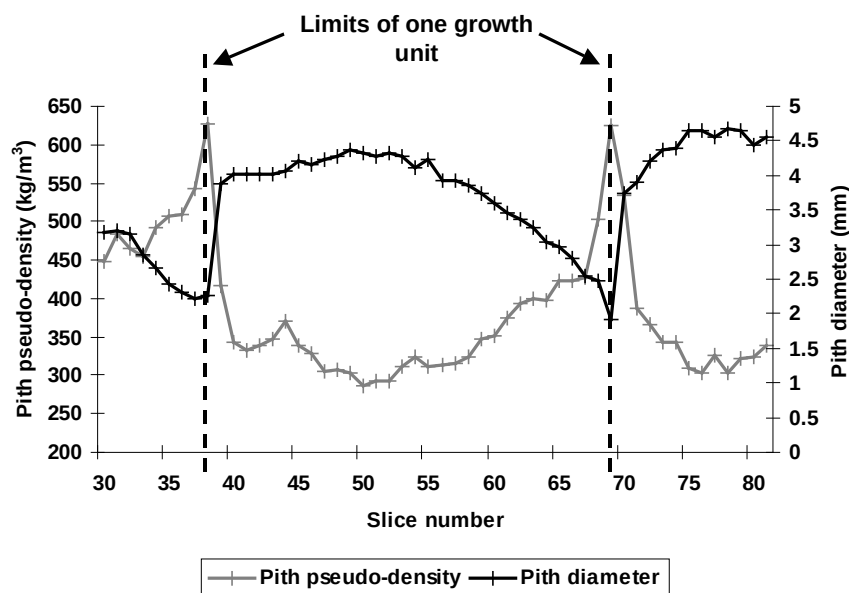


Figure 24 : Evolution longitudinale de la densité et du diamètre de la moelle.

Fig. 24. Longitudinal evolution of pith density and diameter.

Une coupe longitudinale, épaisse de 1.9mm, contenant la moelle a également été radiographiée (**Figure 25**). La trace noire dans la direction transversale à la tige, au niveau du rétrécissement de la moelle, matérialise l'arrêt de croissance hivernal passé sous forme de bourgeon. Cependant il est difficile de contenir la moelle à l'intérieur d'une faible épaisseur du fait des variations de sa position. Il n'est pas garanti que sur les 1.9mm d'épaisseur nous ayons 1.9mm de moelle partout en raison des variations de son diamètre. Les résultats, bien que concordants avec les observations précédentes, sont donc à interpréter avec précaution.

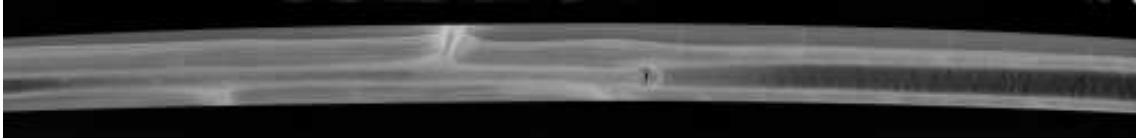


Figure 25 : Radiographie d'une coupe longitudinale de moelle.

Fig. 25. Radiographs of a longitudinal pith cut.

Enfin des coupes microscopiques de moelle, transversales et longitudinales, ont été effectuées dans la planche étudiée afin de compléter l'analyse au niveau cellulaire. Une analyse au microscope (comptage des cellules, épaisseur des parois) ainsi que des colorations (safranine, bleu astra, vert d'iode) devraient apporter un éclaircissement sur l'agencement des cellules, leur taille et sur la composition du tissu. Cette partie du travail est encore en cours à l'heure actuelle.

Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ces variations de densité : une orientation différente des cellules de la moelle au niveau des verticilles, une taille plus petite des cellules de la moelle dans la zone proche de l'arrêt de la croissance en hauteur, une possible lignification de la moelle, une compression de la moelle dans les verticilles.

3.2. L'aubier et le duramen

3.2.1. Détection de la limite aubier/duramen

L'**article II** a été consacré à la mise au point d'une méthode de détection automatique de la limite aubier/duramen dans les billons. L'aubier a été détecté sur la base de sa teneur élevée en eau, les billons ayant été scannés à l'état "vert".

Dans la littérature, la segmentation de l'aubier est souvent mentionnée comme une étape nécessaire des algorithmes de détection des branches (Grundberg & Grönlund, 1992; Andreu & Rinnhofer, 2003b). Cependant les méthodes mises en œuvre sont très peu détaillées et, quand elles le sont, le cas de la présence de branches sur les images n'est pas traité alors que l'on sait qu'il pose problème du fait de la densité voisine entre l'aubier et les branches au moins pour certaines essences dont l'Epicéa. Il est donc apparu nécessaire de développer notre propre méthode de détection de cette frontière afin de pouvoir poursuivre avec la détection des branches notamment. Par ailleurs, la quantification de l'aubier dans les arbres présente un intérêt certain pour l'étude du fonctionnement des arbres avec notamment l'analyse de la distribution et du transport de l'eau dans le tronc.

Un simple seuillage sur les niveaux de gris permet l'identification de cette frontière sur une image ne présentant ni branche, ni poche de résine, ni bois de compression. La difficulté réside donc essentiellement dans l'identification des coupes verticillaires et dans leur traitement.

Comme pour la détection de la moelle, l'algorithme présenté ci-dessous se décompose en deux étapes : (a) une détection de la limite aubier/duramen sur toutes les coupes du billon ; (b) une phase de correction pour les coupes contenant des éléments de haute densité dans le duramen perturbant la détection.

Lors de la phase (a), un lissage Gaussien (Cocquerez & Philipp, 1995) de l'image permet d'atténuer les variations de densité liées à la présence de bois de printemps et de bois d'été dans les cernes de croissance. Des rayons issus de la moelle sont ensuite rasterisés avec un pas de 1° et le 1^{er} saut de densité rencontré sur chaque rayon permet d'établir la frontière aubier/duramen. En présence de branches dans le duramen, le pic de densité intervient lors du passage du duramen dans la branche et ne correspond donc plus à la limite recherchée.

La phase (b) consiste à résoudre ce problème en mettant en œuvre une interpolation dans la direction longitudinale. Pour un angle donné, de 0 à 360° , la distance radiale entre le pic de densité détecté à l'étape (a) et la moelle est analysée en fonction du numéro de la coupe dans le billon. En cas de présence d'un élément de densité élevée dans le duramen, une cassure est observée sur le profil. Sur la **Figure 26**, quatre cassures sont ainsi observées. Ces zones sont détectées à partir d'une dérivée

seconde¹⁴ (pic indiqué par une flèche sur la **Figure 26**) du profil puis interpolées (entre les deux minima indiqués par des flèches noires de part et d'autre du pic sur la **Figure 26**). D'autres méthodes que la dérivée seconde ont été testées, cependant, elles ne permettaient pas une identification aussi précise de la zone à corriger, notamment lorsque la limite aubier/duramen est déformée par la présence de branches vivantes comme c'est le cas sur la **Figure 27**.

La **Figure 28** illustre le résultat de la détection de la limite aubier/duramen à partir d'une reconstruction 3D (à gauche), d'une coupe transversale (au milieu) et d'une coupe longitudinale (à droite).

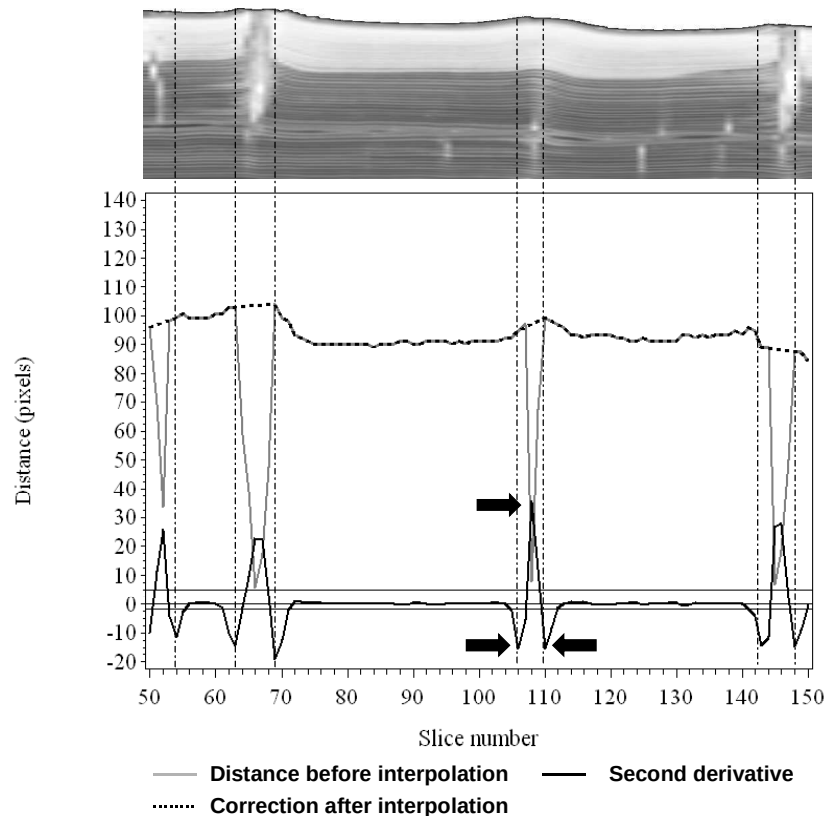


Figure 26 : Exemple de profil de distance entre la moelle et la limite aubier/duramen (angle 330°, billon 34-5-5).

Fig. 26. Example of a profile showing the distance between the pith and the sapwood/heartwood limit (angle 330°, log 34-5-5).

¹⁴ La dérivée seconde est calculée ici par convolution du profil avec un masque mono-dimensionnel de la dérivée seconde d'une Gaussienne.

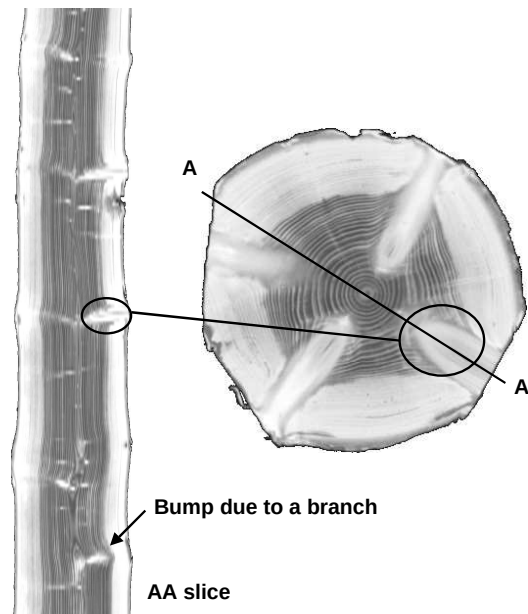


Figure 27 : Déformation du duramen due à la présence de branches vivantes sur une planche“ virtuelle” (à gauche) et sur une coupe transversale (à droite) (billon 34-4-5, coupe n°180).

Fig. 27. Heartwood deformations due to living branches in a top log on a longitudinal plane (on the left) and on a transversal section (on the right) (log 34-4-5, slice n°180).

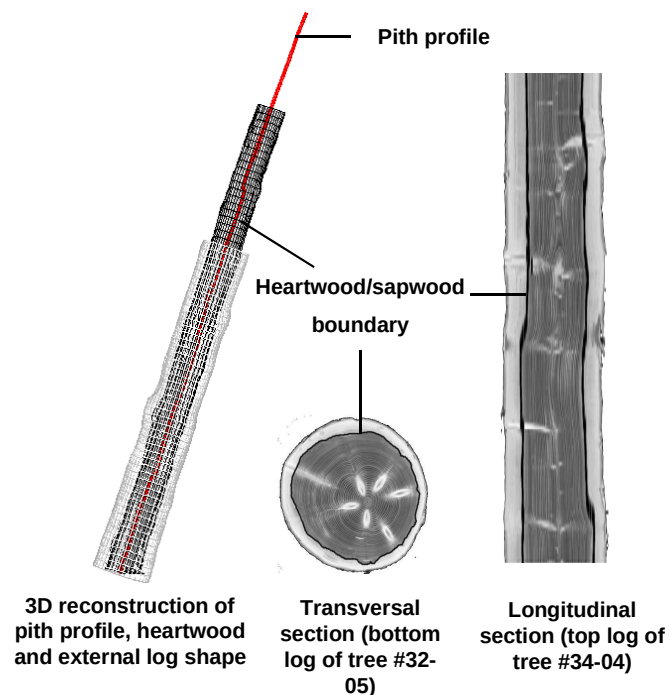


Figure 28 : Visualisation des résultats de la détection automatique de la limite aubier/duramen.

Fig. 28. Visualisation of the results of the automatic detection of the heartwood/sapwood limit.

Des détourages manuels sur 32 planches “virtuelles” de 4m de long ont permis de valider la détection automatique. La limite aubier/duramen était parfois difficile à localiser visuellement avec

précision en raison d'altérations (zones humides pouvant être assez hétérogènes), d'un séchage prématuré de l'aubier dû à un morceau d'écorce manquant ou bien d'autres singularités. Un seuillage sur les variations des détourages manuels d'un opérateur à l'autre a été fixé pour déterminer ces zones d'incertitude¹⁵; et dans ce cas, en l'absence d'une frontière de référence, la précision de la détection automatique n'a pu être évaluée. Finalement, l'erreur médiane sur le diamètre du duramen est de 1.8 mm, elle est respectivement de 0.8% et de 1.3% relativement aux diamètres de la section et du duramen. La précision observée était meilleure dans la partie basse des arbres et pour les peuplements les plus âgés (n°32 et 34). En effet, dans la partie basse des arbres, les branches sont de diamètre plus petit, de plus, elles sont le plus souvent élaguées et recouvertes et, par conséquent, la limite aubier/duramen est beaucoup moins perturbée par le passage de branches du duramen vers l'aubier.

3.2.2. Analyse de variabilité

Le travail précédent a été complété par une analyse de variabilité de la quantité d'aubier présentée dans l'**article III**. Des investigations intra- et inter-arbres ont été menées sur l'ensemble des 24 arbres échantillonnés à partir de la détection automatique de leur limite aubier/duramen. Pour des raisons pratiques, les largeurs d'aubier étudiées dans cet article ont été calculées comme différences entre les rayons sur écorce de la section et les rayons du duramen ; aucun algorithme de détection automatique de la largeur d'écorce n'était disponible au moment des analyses.

Au niveau intra-arbre, la largeur d'aubier (SWW) était relativement constante dans le tronc dans la partie située au-dessus de l'empatement et en dessous du houppier. Chaque arbre pouvait ainsi être caractérisé par une largeur d'aubier qui lui était propre. Les largeurs d'aubier calculées à partir de la détection automatique sont présentées dans le **Tableau 17** pour les 24 arbres de notre échantillon. En conséquence de la largeur d'aubier constante et du défilement, la surface d'aubier était quant-à elle décroissante entre le bas et le haut de l'arbre. Cela a donné lieu à une discussion dans l'**article III** à propos du "pipe model" (Shinozaki et al., 1964a, 1964b), ce dernier, largement utilisé, faisant l'hypothèse d'une surface d'aubier constante le long du tronc sous le houppier.

¹⁵ Avec ce critère le nombre de diamètres étudiés est passé de 12707 à 12566.

Tableau 17 : Largeur d’aubier et diamètre à 1.30m pour les 24 arbres échantillonnés.

Table 17. Sapwood width and diameter at 1.30m height (DBH) for the 24 sampled trees.

<i>Peuplement (Stand)</i>	<i>Dominés (Suppressed trees)</i>		<i>Co-dominants (Co-dominants trees)</i>		<i>Dominants (Dominants trees)</i>	
	<i>SWW (cm)</i>	<i>DBH (cm)</i>	<i>SWW (cm)</i>	<i>DBH (cm)</i>	<i>SWW (cm)</i>	<i>DBH (cm)</i>
31	3.6	27	7.1	33	6.9	42
	4.5	28	6.0	37	4.5	42
32	2.8	32	2.4	34	5.0	40
	3.1	32	4.4	34	2.6	37
33	2.8	24	4.3	33	4.2	40
	2.4	28	4.4	33	4.5	42
34	2.8	33	3.0	38	4.9	43
	3.4	34	4.2	39	3.4	43

Au niveau inter-arbre, l’analyse du **Tableau 17** permet quelques observations préliminaires. La largeur d’aubier est plus élevée chez les arbres du peuplement n°31. Il s’agit du peuplement le plus jeune mais également de la sylviculture la plus intensive car sa densité est plus faible que celles des peuplements plus âgés. Nous notons également que, généralement, les arbres dominants et co-dominants ont une largeur d’aubier du même ordre (4.5cm en moyenne), tandis qu’elle semble plus faible chez les arbres dominés (3.2cm en moyenne).

Plusieurs modèles ont été testés afin d’expliquer les variations de la largeur d’aubier en fonction de variables mesurées sur les arbres lors de l’échantillonnage (§ 2.1) telles que le diamètre à 1.30m, la hauteur de la 1^{ère} branche vivante, la hauteur du 1^{er} verticille vert, la surface cumulée des sections de branches vivantes (ALB), etc. Bien qu’un effet significatif des variables précédentes ait été mis en évidence, la plus explicative était de loin la variable ALB, représentative de l’importance du houppier.

Dans le premier modèle (**Équation 10**), la largeur d’aubier (SWW) était partiellement expliquée par la surface cumulée des sections de branches vivantes (ALB). Les relations ont été établies pour chaque peuplement s avec à chaque fois l’estimation d’un intercept μ_s et d’une pente α_s . Pour chaque peuplement, la pente était significativement positive ($R^2=0.82$).

$$SWW_t = \mu_s + \alpha_s \cdot ALB_t + \varepsilon_t, \quad \text{Équation 10}$$

où t et s sont des indices identifiant respectivement l’arbre et le peuplement.

La variable ALB n’étant pas facile à mesurer et dans le but de fournir un modèle plus largement applicable (formulation ne dépendant pas du peuplement), nous avons cherché à prédire la largeur d’aubier uniquement à partir de variables d’inventaires¹⁶ (**Équation 11**). Les variables retenues dans ce modèle ($R^2 = 0.72$) étaient : le rapport hauteur sur diamètre à 1.30m (HDR) et la hauteur

relative du 1^{er} verticille vert (RH1GW). Nous avons vérifié que ces deux variables n'étaient pas corrélées entre elles pour les arbres de notre échantillon (corrélation de Pearson égale à 0.294, $p = 0.1632$). La largeur d'aubier décroissait de façon significative quand ces deux variables, HDR et RH1GW, augmentaient.

$$SWW_t = \mu + \alpha \cdot HDR_t + \beta \cdot RH1GW_t + \varepsilon_t,$$

Équation 11

où t est l'indice identifiant l'arbre.

Le nombre de cernes de duramen en fonction de l'âge cambial de la section a également été étudié dans cet article. D'après la répartition des points du nuage, nous avons choisi d'ajuster une relation linéaire ($R^2 = 0.8415$) (**Équation 12**). L'âge d'initiation du duramen a ainsi été estimé à 17 ans à partir de nos données. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus par plusieurs modèles non-linéaires (un polynôme de degré 2 est généralement utilisé) proposés dans la littérature aussi bien pour l'Epicéa que pour d'autres essences (Pin maritime, Pin sylvestre et Sapinette noire). Bien qu'ils s'ajustent mieux aux données, l'inconvénient des polynômes de degré 2 est qu'ils ne permettent pas toujours d'interpréter l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses comme étant l'âge d'initiation du duramen. En particulier, l'ajustement d'un polynôme de degré 2 sur nos données aurait conduit à un âge d'initiation négatif.

$$HWNBR = 0.6615 \cdot \text{âge} - 11.077$$

Équation 12

Cette étude illustre un exemple d'investigation qu'il est possible de conduire à partir de la détection automatique de l'aubier et du duramen sur des images tomographiques. D'autres analyses seraient envisageables à partir de ces données telles que, par exemple, l'étude de la variation radiale de la forme du duramen dans l'arbre (régularité de la forme (duramen parfois étoilé) ; La limite du duramen suit-elle les cernes de croissance ? En cas d'excentricité, le duramen est-il également excentré et si oui, dans quelle mesure ?). Stokes & Berthier (2000) se sont intéressés à ces questions pour le Pin maritime. D'un point de vue physiologique, il serait également intéressant d'étudier la variation radiale de la largeur d'aubier en fonction de la pente du terrain ou de l'orientation des arbres.

¹⁶ Variables mesurées sur les arbres sur pied

3.3. L'écorce

Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons à l'écorce qui est une caractéristique visible et donc potentiellement détectable sur les images tomographiques de nos billons. Dans le cadre de notre travail, sa détection n'avait d'intérêt que pour l'analyse de variabilité de la largeur d'aubier présentée au paragraphe 3.2.2., c'est pourquoi nous ne nous y sommes intéressée que tardivement.

L'écorce est le tissu situé en périphérie du billon à l'extérieur de la zone d'aubier. D'après les images étudiées, les densités observées dans cette zone sont nettement inférieures à celles observées dans l'aubier et très supérieures à celles du fond, ce qui a naturellement orienté le choix vers une segmentation par seuillage.

Un traitement simple, détaillé ci-dessous et illustré **Figure 29**, permet de segmenter l'écorce dans la plupart des cas. Sa détection s'effectue par seuillage sur les niveaux de gris des images et donc sur la base de sa densité et de sa teneur en eau. Tout d'abord une image A, représentant le bois versus le fond, est obtenue par seuillage des pixels de valeur supérieure à 300 (seuil A)¹⁷. Il s'agit d'une image binaire : le bois (écorce + aubier + duramen + branches) et le fond sont respectivement codés à 1 et à 0. L'image B est obtenue en 2 étapes : (1) Un seuillage des pixels de valeur supérieure à 800 (seuil B) est effectué afin d'identifier la zone d'aubier bordant la section. Dans le cas de la **Figure 29**, une branche a également été mise en évidence par ce seuillage; (2) La zone située à l'intérieur de l'aubier, correspondant au duramen, est bouchée (algorithme de "bouchage des trous"¹⁸) afin d'aboutir à une image binaire représentant le bois sauf l'écorce (codé à 1) versus le fond + l'écorce (codé à 0). Finalement la soustraction des images A et B permet de segmenter l'écorce de la section. Cependant, quelques points restent encore à traiter en vue d'obtenir une méthode robuste et précise.

Tout d'abord, l'écorce était rarement intacte sur toute la longueur des billons scannés, cela étant probablement dû à des chocs pendant l'abattage ou le transport. L'absence de morceaux d'écorce conduit à un séchage prématuré de l'aubier dans les secteurs concernés. La détection de l'écorce est donc plus difficile dans ce cas. La **Figure 30** (image de gauche) montre une image de section sur laquelle l'écorce est abîmée et où l'aubier a commencé à sécher. En effet, si la couronne d'aubier, détectée par le seuillage à 800 (étape B de l'algorithme), n'est pas fermée, le bouchage de la zone de duramen située à l'intérieur ne peut s'effectuer correctement. C'est précisément ce qui a conduit à l'erreur de détection de l'écorce sur l'image présentée **Figure 30** (image de droite). Les images

¹⁷ Le seuil A de 300 permet une bonne détection de la section et de sa frontière avec le fond, cependant, à l'intérieur, des éléments de faible densité tels que la moelle ou les fentes peuvent présenter des valeurs inférieures. Afin de segmenter la section dans sa totalité, c'est-à-dire sans trou, un remplissage de la zone inférieure à 300 à partir des bords de l'image a été effectué.

comme celle-ci devraient être facilement identifiables en utilisant par exemple un critère sur le pourcentage de pixels appartenant à l'écorce par rapport à l'ensemble des pixels de la section. A titre indicatif, l'écorce de l'image A-B de la **Figure 29** représente 4% de la section (image A), alors que celle de l'image A-B de la **Figure 30** en représente 60%. L'écorce d'une section voisine qui aurait été correctement détectée pourrait alors être utilisée en remplacement de la détection ayant échoué.

La présence d'éléments extérieurs (boue, neige, glace, cailloux, morceaux de métal) sur ou bien dans l'écorce est également possible. La fréquence de ces présences sur nos billons n'a pas été déterminée et nous ne pouvons pas dire à l'heure actuelle si un traitement particulier sera nécessaire.

Le choix des seuils, A à 300 pour segmenter le duramen, l'aubier et l'écorce versus le fond et B à 800 pour segmenter l'aubier, est illustré **Figure 31**. Cette figure montre un profil de niveaux de gris passant par le duramen, l'aubier, l'écorce et le fond. Les limites déterminées par les seuils sont représentées (rectangles rouges) sur l'image en niveau de gris d'un morceau de section. Le choix de la limite entre l'aubier et l'écorce n'est pas évident, une calibration serait nécessaire pour l'ajustement de ce seuil.

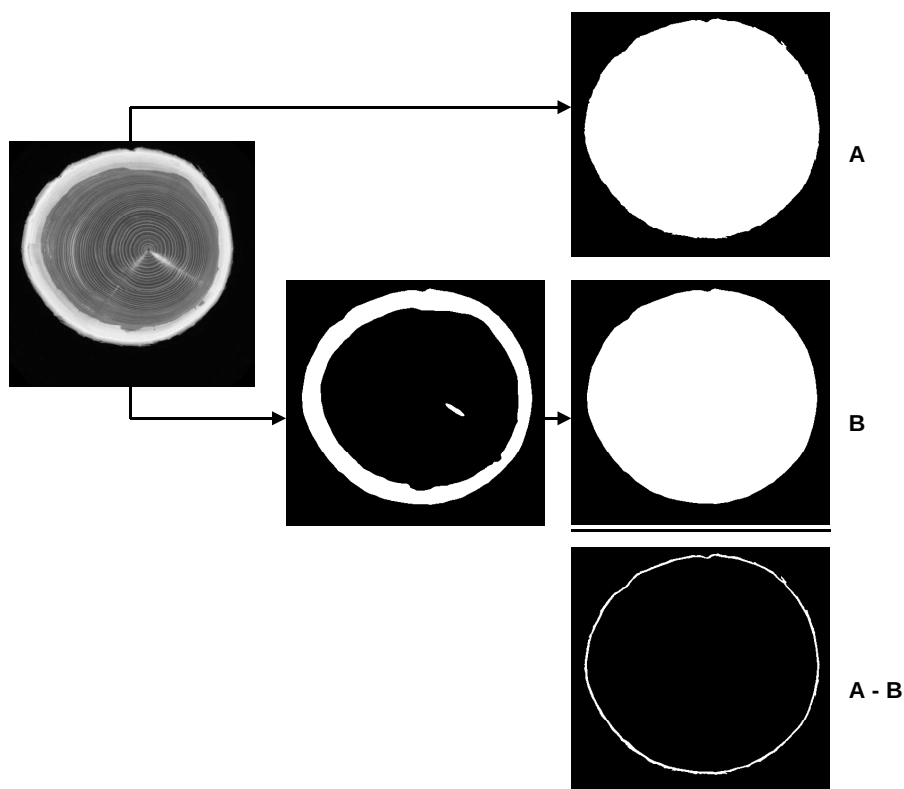


Figure 29 : Traitement de base pour l'identification de l'écorce sur une section (coupe n°76 du billon 32-5-2).

Fig. 29. Basic processing for the bark detection on a CT slice (slice n°76 of log 32-5-2).

¹⁸ Le bouchage des trous s'effectue ici par un remplissage du fond à partir des bords de l'image par un "algorithme à germe"(Lévy & Conreux, 1999) (le fond et l'aubier sont donc codés à 1 et le trou à 0), puis par

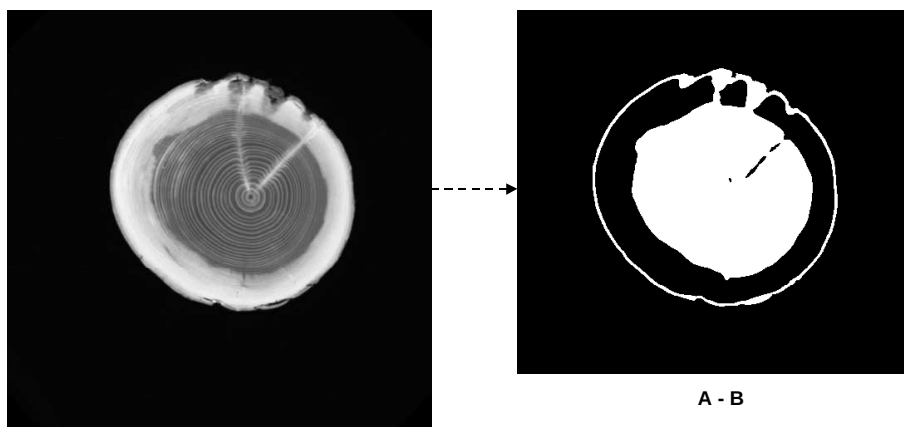


Figure 30 : Exemple d'échec de la détection automatique de l'écorce dû à une dégradation de cette dernière (billon 32-5-5, coupe 68) : Image originale (à gauche) ; Résultat de la segmentation (à droite).

Fig. 30. Example where the automatic detection of the bark failed due to bark damages (log 32-5-5, slice 68): Original image (on the left) ; Result of the segmentation (on the right).

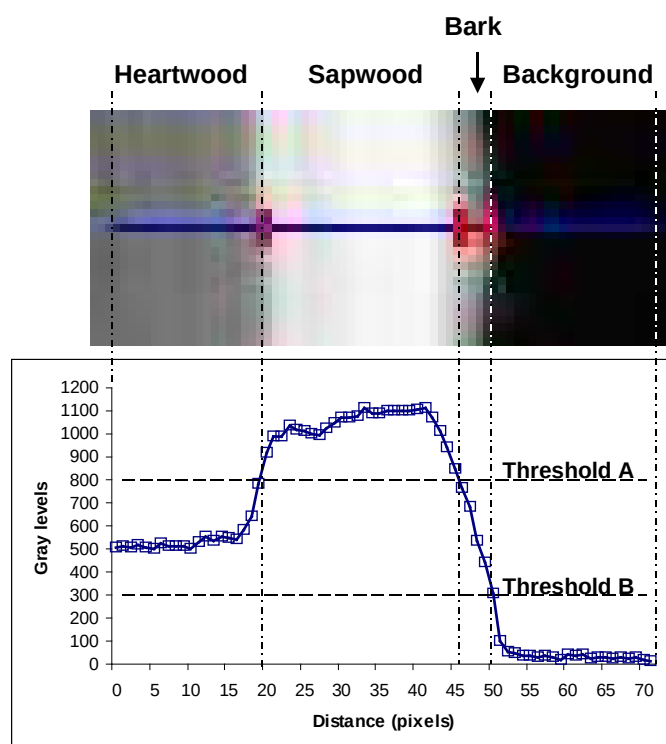


Figure 31 : Choix des seuils A et B utilisés dans l'algorithme (billon 32-5-2, coupe 76).

Fig. 31. Choice of thresholds A and B used in the algorithm (log 32-5-2, slice 76).

Nous ne disposons pas d'échantillon de bois appartenant aux billons scannés qui nous auraient permis d'effectuer des mesures d'épaisseur d'écorce indépendamment de la détection automatique sur les images tomographiques. Ces mesures auraient notamment été utiles pour calibrer

addition des deux images (le fond est alors à 1, l'aubier à 2 et le trou à 0).

le choix des seuils A et B utilisés dans l'algorithme. Sur l'image finale A-B de la **Figure 29**, l'épaisseur d'écorce est de l'ordre de 4 à 5 pixels correspondant à environ 3mm. Cela n'est pas en contradiction avec la largeur moyenne de 4.8mm (écart-type = 1.2) mesurée sur 72 épicéas et présentée dans un rapport sur la modélisation de la largeur d'écorce (Jourez & Leclercq, 1993). Dans la même étude, des variations de la largeur d'écorce en fonction de la hauteur dans l'arbre, de la productivité du site, de l'intensité des éclaircies et du statut social des arbres ont été montrées. Selon les mêmes critères, des variations de la densité ou de la teneur en eau de l'écorce sont possibles. Une calibration de l'algorithme reste donc nécessaire pour un ajustement des seuils prenant en compte ces éventuelles variations.

La résolution la plus élevée de nos images est de 350mm pour 512 pixels soit environ 0.7mm par pixel. La largeur d'écorce étant de l'ordre de quelques millimètres, cette résolution permettra des mesures de précision limitée. Pour une largeur d'écorce de 4.8mm, la précision serait de 15% avec cette résolution. Cependant si l'objectif est de fournir une meilleure estimation de la largeur d'aubier calculée au paragraphe 3.2.2, alors cette résolution apparaît suffisante.

La détection de l'écorce n'étant pas prioritaire par rapport à la détection des autres caractéristiques, nous avons choisi de ne pas la traiter dans le cadre de la thèse. Les améliorations à apporter à l'algorithme visant à le rendre notamment plus robuste en présence d'écorce endommagée seront effectuées ultérieurement.

3.4. Les branches

3.4.1. Localisation des verticilles

L'**article IV** concerne la détection des verticilles dans des billons d'Epicéa. Deux dispositifs ont été utilisés : un scanner optique 3D multi-points (Saint-André, 1998) donnant une description précise de la forme externe des billons et un scanner médical qui fournit une information additionnelle sur la densité interne. Une méthode de détection a été développée pour chacun de ces systèmes d'acquisition.

La méthode "optique" se base sur l'augmentation du diamètre (ou de la surface) des sections du billon pour mettre en évidence la présence d'un verticille. En effet la présence de verticilles crée une déformation visible sur l'enveloppe externe du billon (bourrelet cicatriciel) (**Figure 32**). L'effet est d'autant plus marqué que l'on se rapproche de la base du houppier, car les branches y sont de diamètre plus important (Colin, 1992) et sont moins recouvertes. Cette méthode peut se transposer sans problème aux données de forme externe obtenues par le scanner médical.

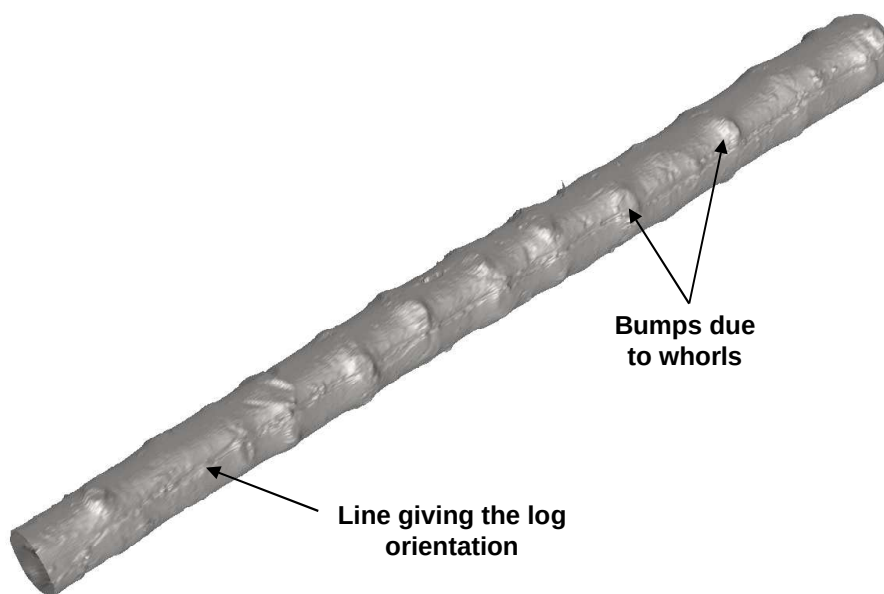


Figure 32 : Bosses verticillaires visibles sur la surface externe du billon.

Fig. 32. Bumps due to whorls visible on the external log envelop.

La méthode utilisant le scanner à rayons X utilise quant-à elle les variations d'un profil de densité longitudinal. Une densité moyenne dans la zone de duramen est calculée pour chaque coupe tomographique. Les branches étant de densité élevée, elles sont à l'origine de pics dans le profil de densité longitudinal et permettent la localisation des verticilles. Cette méthode présente un avantage considérable pour les billes de pied. En effet, dans cette partie de l'arbre les bourrelets cicatriciels des

verticilles sont bien moins visibles, voire absents. Cela s'explique soit par l'élagage naturel des branches, soit par leur faible diamètre relativement au diamètre du tronc.

La présence de pousses d'août (*lammas shoots*) était fréquente dans les arbres de notre échantillon. Il s'agit d'un verticille supplémentaire mis en place la même année que le verticille "normal" séparant deux UC. La méthode "optique" s'est montrée moins sensible à la présence de pousses d'août que la méthode "rayons X". Les deux types de verticilles étaient identifiables de façon manuelle par un comptage des cernes sur les images tomographiques des sections. Aucun critère sur le nombre ou la taille des branches ou bien sur la distance entre deux verticilles n'a permis d'identifier de façon automatique les verticilles de pousses d'août. Une combinaison des méthodes "optique" et "rayons X" serait envisageable afin d'isoler les verticilles de pousses d'août dans les billons du haut des arbres. En effet, la méthode "optique" est efficace dans les billons du haut et permet de détecter le nombre d'unités de croissance dans un billon plus précisément que la méthode "rayons X", tandis que cette dernière permet de détecter tous les verticilles (pousses d'août comprises) ; une soustraction des sorties des deux méthodes permettrait une estimation du nombre de pousses d'août et éventuellement leur localisation.

3.4.2. Détection des branches

Ce chapitre est plus détaillé que les précédents car, la méthode étant en cours de développement, elle n'a pas encore donné lieu à une publication. L'objectif était de segmenter les nœuds dans nos billons afin (i) de les reconstituer en 3D et (ii) d'en estimer des paramètres (quantité, taille, orientation, inclinaison).

La **Figure 33** représente de façon schématique la répartition dans l'arbre des zones sans nœud, avec nœuds non-adhérents et avec nœuds adhérents¹⁹. Le duramen a également été superposé sur ce schéma pour illustrer la localisation des nœuds à une hauteur donnée dans l'arbre par rapport à la limite aubier/duramen. Dans le bas de l'arbre, les branches n'atteignent pas la surface du tronc, elles sont mortes et ont été recouvertes (des nœuds à la fois adhérents et non-adhérents sont présents dans le duramen essentiellement), alors que plus haut dans l'arbre, des branches vivantes sont présentes jusque dans l'aubier.

Le problème de l'identification des branches dans l'aubier pour certaines essences a déjà été mentionné précédemment, cela étant dû à la forte teneur en eau de celui-ci. Dans un premier temps, une approche par segmentation de l'histogramme des niveaux de gris a été tentée. L'algorithme de segmentation automatique de Fisher²⁰ minimisant la somme des inerties intra-classe a été testé pour 3

¹⁹ Un nœud adhérent est un nœud dit "vivant" dont les couches annuelles extérieures sont en continuité avec le bois environnant sur au moins les $\frac{3}{4}$ du périmètre (AFNOR) (Métro, 1975).

²⁰ Algorithme disponible dans la bibliothèque de programmes mise à disposition par l'INRIA.

classes (nœuds + aubier, duramen, fond) puis pour 4 classes dans l'espoir de pouvoir distinguer les nœuds de l'aubier par leurs niveaux de gris. Ce seuillage s'est malheureusement révélé inefficace, les densités de l'aubier et des nœuds étant du même ordre et se recouvrant.

Des traitements distincts se sont avérés nécessaires pour la détection des nœuds dans le duramen d'une part et dans l'aubier d'autre part. Dans un premier temps, nous avons traité la segmentation des branches dans le duramen (§ 3.4.2.2.1), c'est-à-dire là où elles sont le plus contrastées. Une piste est ensuite proposée pour leur détection dans l'aubier (§ 3.4.2.2.2) mais elle n'a malheureusement pas pu être poursuivie dans le cadre de la thèse.

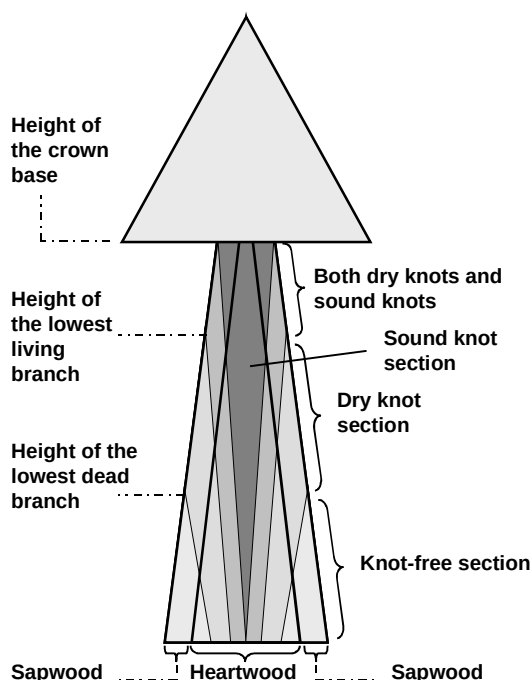


Figure 33 : Distribution des zones de nœuds dans l'arbre (zone sans nœud, zones avec nœuds non-adhérents et avec nœuds adhérents).

Fig. 33. Knot distribution in the tree (knot-free section, dead knot section and sound knot section).

3.4.2.1. Exemple de mise en œuvre d'un algorithme de la littérature pour le traitement de nos images

En particulier, nous avons testé sur quelques uns de nos billons (au moins 4) la méthode de détection des branches par soustraction coupe à coupe dont il est question dans Som et al. (1993) puis dans Jaeger et al. (1999). Cette méthode nous avait semblée intéressante car elle permettait de s'affranchir de la présence de l'aubier sur les images, ce dernier devant être éliminé par la soustraction. L'algorithme devait donc nous permettre de détecter correctement les nœuds présents dans le duramen.

Soit B_1 le billon d'origine à l'intérieur duquel on cherche à détecter les branches, on note $B_1[i]$ la coupe n°i de B_1 . Tout d'abord, nous effectuons un lissage Gaussien (masque 17 x 17 et écart-type de la distribution gaussienne égal à 1.5) de toutes les sections afin d'éliminer les cernes de croissance : $B_1 \rightarrow B_1'$. Puis, la soustraction coupe à coupe est effectuée afin de mettre en évidence des objets tels que les nœuds appartenant à une même branche qui ne sont pas à la même position d'une coupe à l'autre. La **Figure 34** illustre le déplacement des nœuds de la moelle vers l'écorce sur trois coupes consécutives $B_1[i-1]$, $B_1[i]$ et $B_1[i+1]$. Les résultats de la soustraction sont stockés dans un billon B_2 tel que : $B_2[i]=B_1'[i+1]-B_1'[i]$ et $B_2[i-1]=B_1'[i]-B_1'[i-1]$. Un nœud présent sur la coupe i de B_1 se traduira, si il n'est pas présent au même endroit sur les coupes situées de part et d'autre, par une tâche noire (valeurs <0) sur la coupe i de B_2 et par une tâche blanche (valeurs >0) sur la coupe i-1 de B_2 . Les images $B_2[i-1]$ et $B_2[i]$ obtenues à partir des coupes de la **Figure 34** sont présentées **Figure 35** (sur ces images, les zones blanches et noires résultant de la soustraction sont bien visibles). La dernière étape pour mettre en évidence les branches consiste à seuiller les images des différences : $B_2 \rightarrow B_3$. Au début, nous n'avions gardé que les différences <0 mais les résultats étaient meilleurs en considérant à la fois les différences négatives sur la coupe i et positives sur la coupe i-1. La moyenne des différences est proche de 0 et la distribution est symétrique. Les seuils choisis pour les valeurs négatives et positives respectivement étaient $m-3*std$ et $m+3*std$ où m est la moyenne des différences et std l'écart-type. L'image seuillée $B_3[i]$ correspondant à la section $B_1[i]$ est présentée **Figure 35**.

Pour les billons du bas des arbres les résultats semblaient assez satisfaisants (**Figure 35**, $B_3[i]$). Quelques traitements tels que des opérations de morphologie mathématique permettraient d'améliorer encore le résultat en éliminant les pixels isolés. En ce qui concerne les billons du haut, les résultats étaient moins convaincants; les branches étant de diamètre plus important, elles ont tendance à être présentes au même endroit sur plusieurs coupes consécutives (exemple de la branche horizontale sur la **Figure 36**), ce qui conduit à des trous dans l'image binarisée de la soustraction (**Figure 37**, $B_3[i]$). Par ailleurs, cette méthode permettrait sans doute une détection correcte de la position des branches (position longitudinale et azimuth) mais pas de leur contour (**Figure 37**, $B_3[i]$), des traitements additionnels seraient nécessaires pour cela. C'est pourquoi, nous avons choisi de nous orienter vers d'autres traitements plus efficaces pour l'extraction de la forme des branches notamment.

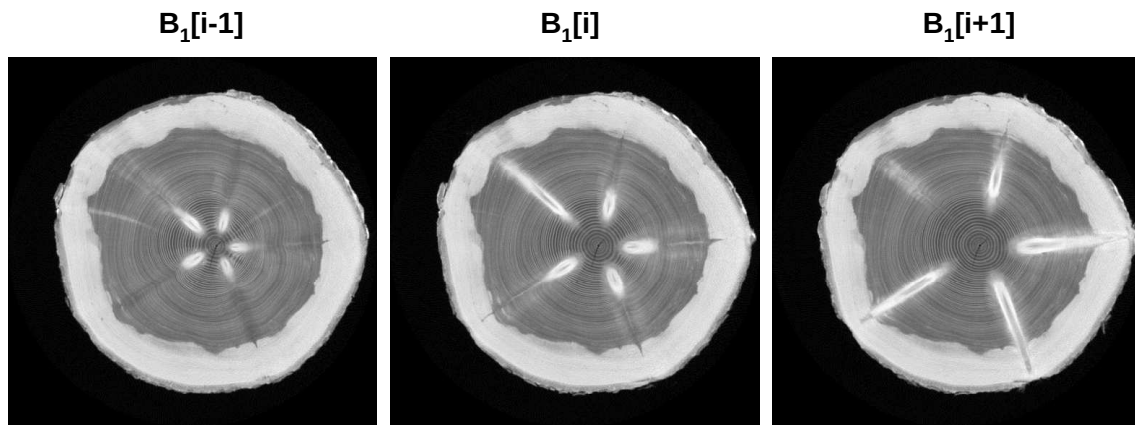


Figure 34 : Trois coupes consécutives prises au niveau d'un verticille de cinq branches dans un billon du bas (billon 34-4-1, coupes 110, 111 et 112).

Fig. 34. Three consecutive slices taken in a five knot whorl from a bottom log (log 34-4-1, slices 110, 111 and 112).

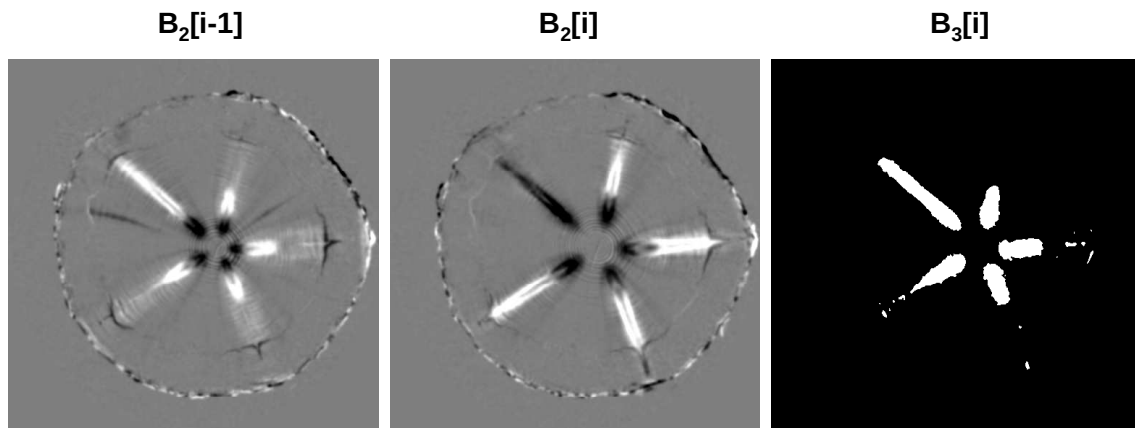


Figure 35 : $B_2[i-1]$ et $B_2[i]$ sont les images résultantes de la soustraction des coupes présentées Figure 34. L'image $B_3[i]$ a été obtenue comme la réunion du seuillage de $B_2[i-1]$ et du seuillage de $B_2[i]$.

Fig. 35. $B_2[i-1]$ and $B_2[i]$ are resulting images from the subtraction of slices presented in Fig. 34. $B_3[i]$ image was obtained as the union of $B_2[i-1]$ and $B_2[i]$ thresholding.

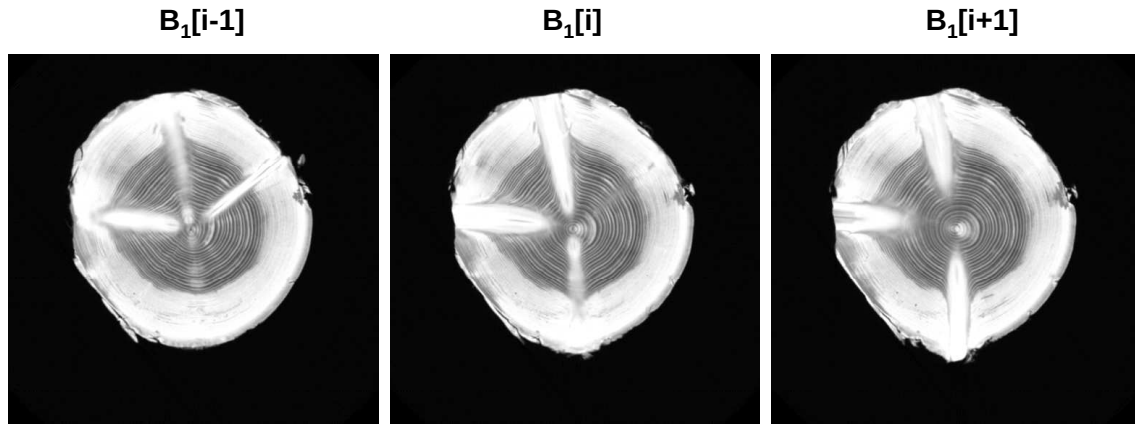


Figure 36 : Trois coupes consécutives prises au niveau d'un verticille de trois branches dans un billon du haut ; il s'agit du billon correspondant au billon du bas dont sont extraites les coupes de la Figure 34 (billon n°34-4-5, coupes 80, 81 et 82).

Fig. 36. Three consecutive slices taken in a three knot whorl from a top log; it is the log corresponding to the bottom log containing slices of Fig. 34 (log 34-4-5, slices 80, 81 and 82).

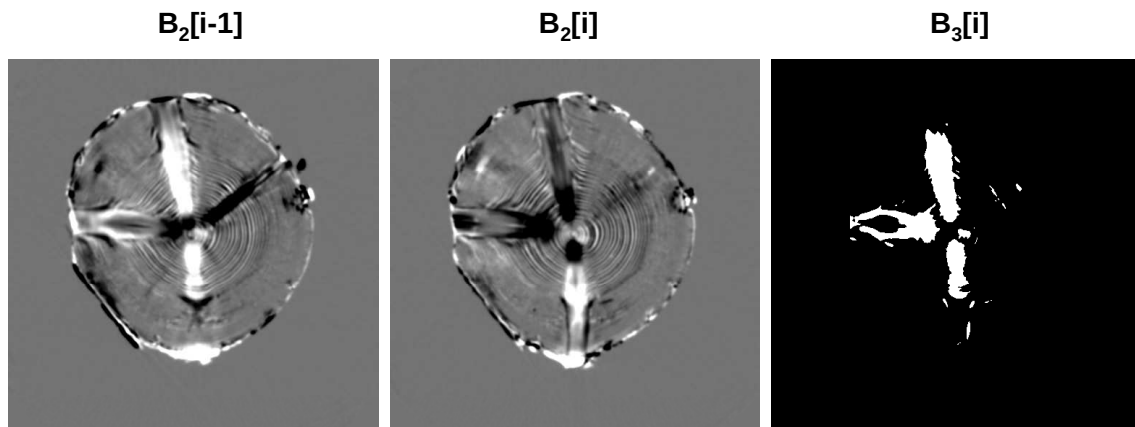


Figure 37 : $B_2[i-1]$ et $B_2[i]$ sont les images résultantes de la soustraction des coupes présentées Figure 36. L'image $B_3[i]$ a été obtenue comme la réunion du seuillage de $B_2[i-1]$ et du seuillage de $B_2[i]$.

Fig. 37. $B_2[i-1]$ and $B_2[i]$ are resulting images from the subtraction of slices presented in Fig. 36. $B_3[i]$ image was obtained as the union of $B_2[i-1]$ and $B_2[i]$ thresholding.

3.4.2.2. Description de notre procédure de détection des branches

3.4.2.2.1. Détection de la partie des branches incluse dans le duramen

Description de l'algorithme

L'algorithme mis en œuvre est décrit ci-dessous. Il se décompose en une segmentation des nœuds sur les images tomographiques 2D suivie d'une connexion de ces éléments en 3D afin de pouvoir identifier les morceaux d'une même branche sur plusieurs coupes consécutives. L'idée générale est la

même que celle précédemment mise en œuvre par Bhandarkar et al. (1996; 1999) puis par Andreu & Rinnhofer (2003a) mais les traitements sont différents dans le but d'affiner la détection.

- 1- **Détection automatique de la moelle** sur toutes les coupes de billon (**article I**).
- 2- **Lissage Gaussien** (masque 29 x 29) des images pour atténuer la structure des cernes annuels de croissance et régler certains problèmes posés par la présence de bois de compression ou de poches de résine (**Figure 38b**).
- 3- **Détection automatique de la limite aubier/duramen** dans le billon. Pour plus de détails sur les traitements se reporter à l'**article II**.

Les étapes 1 à 3 correspondent à la procédure complète de détection de la limite aubier/duramen décrite dans l'**article II**.

- 4- Tous les pixels n'appartenant pas au duramen sont mis à 0 (**Figure 38c**).
- 5- **Seuillage de l'image** (**Figure 38d**). L'algorithme de seuillage automatique de Fisher a été testé pour 3 classes (nœuds, duramen, aubier + fond) mais dans notre cas, il ne s'est pas révélé plus efficace qu'un seuil fixe pour la segmentation des branches dans le duramen. Cependant, il est possible que pour l'application à d'autres essences un seuillage automatique trouve son utilité. Finalement, un seuillage en 2 classes limité à la région du duramen a été retenu. Les pixels ayant des valeurs supérieures à un seuil fixe de 950 sont mis à 1 et les autres à 0. L'image résultante est donc une image binaire, les éléments codés à 1 étant susceptibles d'être des nœuds.
- 6- **Bouchage des trous** (**Figure 38e**). Les branches ont souvent une zone moins dense en leur centre (moelle et duramen des branches), ce qui se traduit par des zones de pixels à 0 entourées de pixels à 1 après le seuillage (étape n°5 ci-dessus). Pour remédier à cela, un algorithme de bouchage des trous (Lévy & Conreux, 1999) est appliqué. Cependant, il ne permet de boucher que les trous entièrement fermés, c'est-à-dire entièrement entourés de pixels à 1.
- 7- **Composantes connexes** (**Figure 38f**). Les zones de pixels connexes en 2D (8-connexité) sont identifiées (Cocquerez & Philipp, 1995). A l'issue de cette étape, pour chaque coupe, le nombre de composantes connexes qu'elle contient est connu. Ce nombre vaut 0 pour une coupe sur laquelle aucun pixel n'est à 1.

La **Figure 38** illustre les étapes 2 à 7 décrites ci-dessus. La zone de densité plus faible au centre des branches est bien visible sur ces images. A la fin de la procédure, les quatre branches présentes sur la section sont bien segmentées. Elles sont représentées par quatre couleurs différentes sur l'image f).

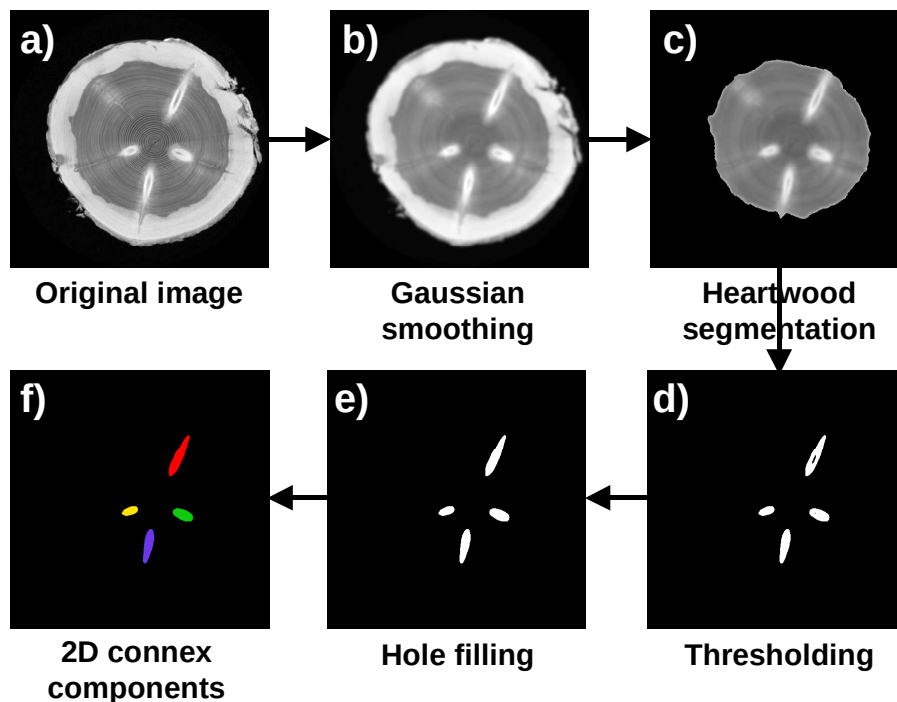


Figure 38 : Etapes 2 à 7 de l’algorithme de segmentation des branches en 2D dans un billon du bas.

Fig. 38. Steps 2 to 7 of the 2D segmentation algorithm for knots in bottom log.

Cependant, dans certains cas, la détection ne se passe pas aussi bien (un problème dans la détection de la limite aubier/duramen peut par exemple faire apparaître des morceaux d’aubier en plus des branches recherchées) et des traitements complémentaires sont alors nécessaires pour s’assurer que les régions détectées correspondent effectivement à des nœuds, d’où l’existence de l’étape 8 détaillée ci-dessous.

8- Identification des nœuds en 2D. Pour chaque région connexe précédemment identifiée, une série de critères est calculée permettant de décider si il s’agit ou non d’une branche.

a- Taille minimale

Les régions de trop petite taille vont être éliminées. Cela nécessite le choix d’un seuil que nous avons fixé à 50 pixels. Cette valeur permet de garder de petits nœuds tout en éliminant du bruit comme d’éventuels pixels isolés.

Pour chaque région de taille suffisante, son axe d’inertie (direction dans laquelle la variance du nuage est maximale ou encore 1^{er} axe d’une analyse en composantes principales (ACP)) est calculé (Saporta, 1978). Soient $A = [X \ Y]$ la matrice $n \times 2$ des coordonnées des n pixels de la

région et A_c la matrice A centrée. La matrice de variance-covariance des coordonnées du nuage s'écrit alors $V = A_c^t D_n A_c$ avec $D_n = \frac{1}{n} I_n$, I_n étant la matrice identité de taille $n \times n$.

Soient λ_1 et λ_2 les valeurs propres associées à la matrice V , elles correspondent respectivement à la variance dans la direction où celle-ci est maximale et à la variance dans la direction perpendiculaire à cette direction de variance maximale. L'axe d'inertie principal du nuage a pour vecteur directeur le vecteur propre $\vec{u}$ associé à la plus grande valeur propre λ_1 .

b- Allongement du nuage

Les nœuds sur les images 2D ont une forme elliptique plus ou moins allongée. On peut donc calculer un critère d'étirement du nuage : $a = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, comme le rapport des variances dans les deux directions perpendiculaires décrites ci-dessus. λ_1 étant la variance maximale du nuage, a sera donc toujours inférieur à 1 et d'autant plus proche de 0 que le nuage sera allongé. A l'état d'avancement actuel la valeur seuil a a été fixé à 0.5. Les régions jugées non suffisamment allongées sont éliminées car (i) elles ne peuvent a priori pas correspondre à des nœuds ; (ii) il ne serait pas correct de calculer une orientation du nuage si celui-ci n'était pas suffisamment allongé.

c- Orientation

Ce critère, calculé sur les régions restant après application des critères a- et b-, doit permettre de vérifier que l'axe d'inertie des régions détectées passe à proximité de la moelle comme c'est le cas pour les branches. Pour chaque région, l'orientation du vecteur directeur $\vec{u} = (u_x, u_y)$ de son axe d'inertie est comparée à celle du vecteur "moelle – barycentre" de la région, noté $\vec{v} = (v_x, v_y)$. Ces deux orientations sont illustrées **Figure 39**. En pratique, la valeur du cosinus de l'angle entre $\vec{u}$ et $\vec{v}$ a été utilisée pour effectuer la comparaison. Le cosinus a été calculé de la façon suivante : $\cos(\vec{u}, \vec{v}) = \frac{u_x v_x + u_y v_y}{\|\vec{u}\| \|\vec{v}\|}$. La région est labélisée comme branche si la valeur absolue du cosinus est suffisamment proche de 1 de façon à permettre une tolérance de l'ordre de 10° entre les deux axes. La valeur absolue est utilisée car seule l'orientation des axes nous intéresse ici, les vecteurs comparés peuvent être opposés.

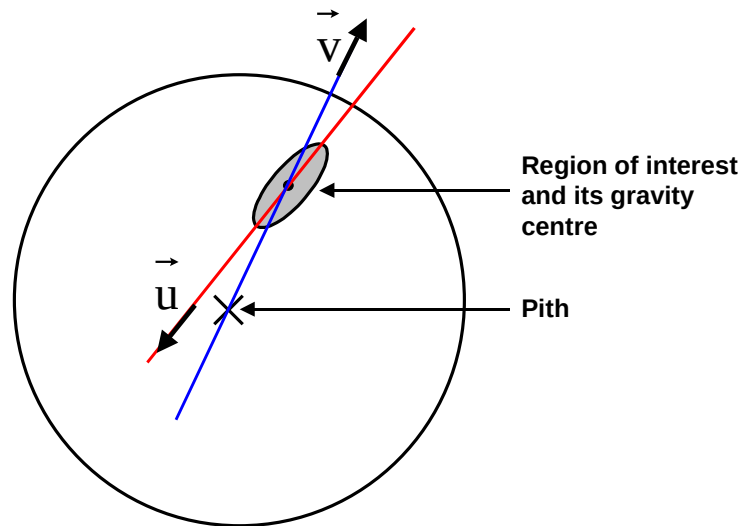


Figure 39 : Illustration des deux orientations à comparer : celle de l’axe d’inertie de la région (en rouge) et celle du vecteur moelle – barycentre (en bleu).

Fig. 39. Illustration of the two orientations to be compared: the one for the inertia axis (red) and the one of the “pith-gravity centre” vector (blue).

9- Connexion 3D. Il reste à regrouper entre eux les morceaux appartenant à une même branche qui ont été détectés sur plusieurs coupes consécutives. Ici ce sont les vecteurs “moelle – barycentre” qui vont être comparés deux à deux d’une coupe à l’autre pour trouver d’éventuelles correspondances. Le cosinus de l’angle θ formé par deux vecteurs “moelle – barycentre” est calculé à partir du produit scalaire comme à l’étape précédente, à la différence qu’ici les vecteurs doivent avoir même orientation mais également même direction. La condition pour connecter deux régions est que le cosinus soit suffisamment proche de 1 de façon à permettre une tolérance de 10° entre les deux vecteurs comparés.

L’étiquetage 3D est géré au fur et à mesure de façon à ce que la 1^{ère} branche en partant du bas du billon soit numérotée à 1 et la dernière à n , n étant le nombre de branches détectées dans le billon. La **Figure 40** illustre avec des couleurs la correspondance des morceaux de branches en 3D sur quatre coupes consécutives appartenant à un verticille.

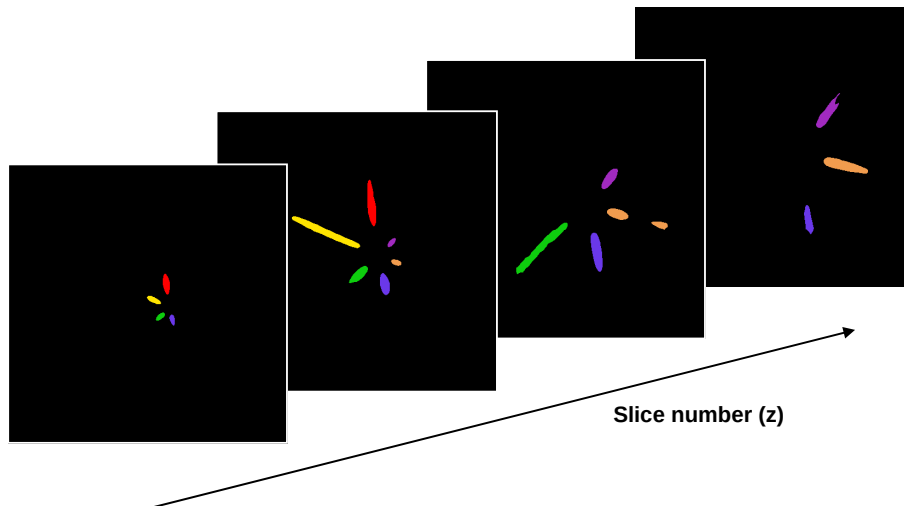


Figure 40 : Connexion des branches en 3D sur quatre coupes consécutives (exemple d'un verticille dans un billon du bas).

Fig. 40. Connection of branches in 3D for four consecutive slices (example of a whorl from a bottom log).

Visualisation 3D des branches dans le duramen

Afin de juger du résultat de la détection décrite précédemment, une étape préliminaire de visualisation des branches en 3D a été entreprise. Il s'agit de représenter un squelette des branches (ce n'est pas une représentation de leur enveloppe externe) dans le billon afin de juger de leur courbure et de leur position (hauteur et azimuth).

Grunberg & Grönlund (1992) ont développé, entre autres, un modèle permettant de décrire la position longitudinale des branches dans des billons de Pin. Ce modèle exprime la position longitudinale z de la branche dans le plan longitudinal radial (LR) en fonction de la distance radiale à la moelle r (**Équation 13**).

$$z = a + b\sqrt{r}$$

Équation 13

Oja (1996) s'est intéressé à la validation de ce modèle sur des billons d'Épicéa et a proposé une formulation plus complexe, à base de fonctions tangente et logarithme, a priori plus adaptée. Cependant aucune différence significative de précision n'a pu être mise en évidence entre les deux modèles.

Le modèle le plus simple de Grunberg & Grönlund (1992) a donc été privilégié. Ce modèle a été ajusté pour chaque branche détectée à partir des centres de gravité des régions 2D (intersection entre la branche et les coupes tomographiques) appartenant à cette même branche. La **Figure 41** montre un exemple pour une branche appartenant à un billon du bas de l'arbre. Cette branche était présente et a été détectée sur quatre coupes consécutives sur les images tomographiques, les centres de gravité des quatre régions 2D sont représentés par des points bleus sur le graphe. Toujours sur la

figure, la zone verticillaire (zone où les branches appartenant au verticille sont visibles sur les images) a été délimitée. Le modèle s'ajuste parfaitement à nos données, toutefois, on peut remarquer que pour des distances proches de la moelle l'ajustement passe en dessous de la zone verticillaire délimitée.

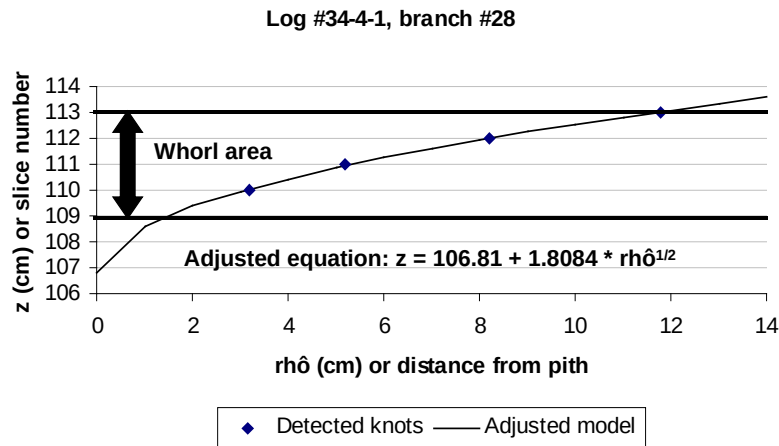


Figure 41 : Ajustement du modèle (Équation 13) pour une branche d'un billon provenant du bas d'un arbre (billon 34-4-1, 28^{ème} branche détectée).

Fig. 41. Model adjustment for a branch coming from a bottom log (log 34-4-1, 28th detected branch).

La **Figure 42** permet, à partir du modèle ci-dessus, de visualiser le résultat de la détection des branches dans un billon pris à la base du tronc. Les branches sont représentées uniquement dans la zone de duramen (bleu). Rien ne nous aurait empêché de prolonger ces branches dans l'aubier si ce n'est que nous ne sommes pas en mesure de savoir où elles s'arrêtent. Les couleurs permettent de vérifier que les branches sont bien segmentées notamment dans un verticille donné.

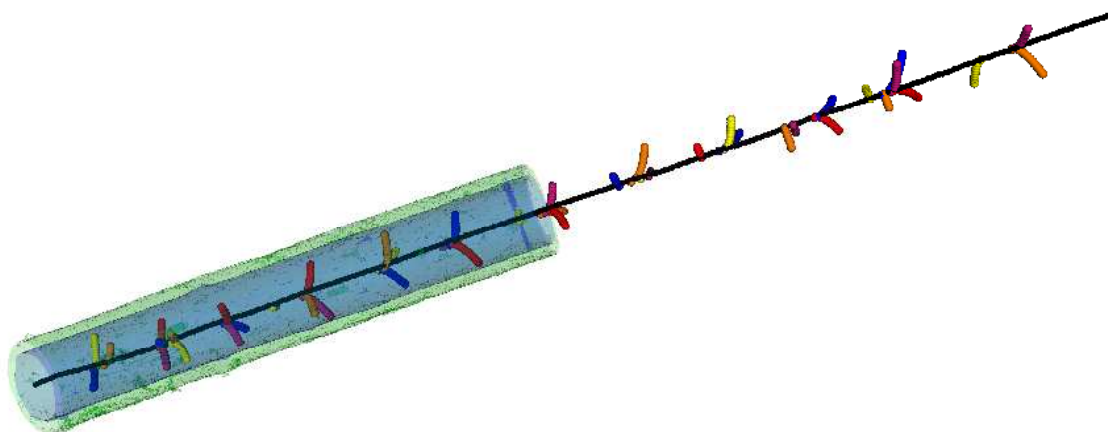


Figure 42 : Visualisation 3D des résultats de l’ajustement du modèle pour chaque branche (billon 34-4-1). Des sphères ont été représentées le long de l’axe des branches (VTK).

Fig. 42. 3D visualisation of the results of the model adjustment for every branch (log 34-4-1).

Limitations et améliorations à apporter

Il s’agit pour l’instant d’un travail préliminaire, l’algorithme n’a été testé que sur 3 billons (deux du haut et un du bas). Les seuils utilisés ont été choisis en fonction des sorties auxquelles ils aboutissaient. Il conviendrait de conduire des investigations supplémentaires pour affiner ces choix. Par exemple, le seuil de 950 pour la segmentation des branches dans le duramen mériterait d’être calibré en fonction de la hauteur dans l’arbre. Sachant que le diamètre des branches est plus élevé dans les billons du haut, le seuil sur la taille minimum des régions pourrait être adapté selon le cas.

Il conviendrait d’améliorer l’étape n°6 du traitement. En effet l’algorithme de “bouchage des trous” ne permet de boucher que les trous complètement fermés, cependant ce n’est pas toujours le cas sur nos images (**Figure 43**, image de gauche). Pour remédier à cela, une enveloppe convexe ou une ellipse (l’intersection d’une branche avec le plan transversal peut être assimilée à une ellipse) pourrait être calculée pour chaque branche (**Figure 43**, image de droite). Cette étape serait à placer après l’étape n°8 d’identification des nœuds en 2D pour limiter le traitement aux régions d’intérêt. Ces tests préliminaires ont été réalisés avec ImageJ, les ellipses sont ajustées de façon à garder la même aire, la même orientation et le même barycentre que les régions de départ. Les algorithmes d’ajustement d’ellipses sont nombreux dans la littérature et certains seraient sans doute mieux adaptés à notre problème, c’est-à-dire non basés sur la surface mais plutôt sur le contour des régions.



Figure 43 : Exemple de deux trous ouverts (à gauche). Ajustement d'ellipses pour chaque branche de l'image de gauche (à droite).

Fig. 43. Example of two open holes (on the left). Adjustment of ellipses for each branch of the left image (on the right).

En ce qui concerne l'étape n°7 de l'algorithme, la détection de composantes connexes a également été testé en 3D²¹ (26-connexité). Cependant d'une coupe à l'autre les morceaux d'une même branche ne sont pas toujours bien connectés (**Figure 44**). Des traitements complémentaires comme une dilatation radiale de la moelle vers l'écorce auraient été nécessaires pour rendre ces régions connexes. Dans un 1^{er} temps, nous avons préféré retenir la piste 2D. Cependant, cette méthode en 3D serait à finaliser car elle permettrait de s'affranchir de l'étape, assez lourde, de "connexion 3D" dans l'algorithme présenté ci-dessus.

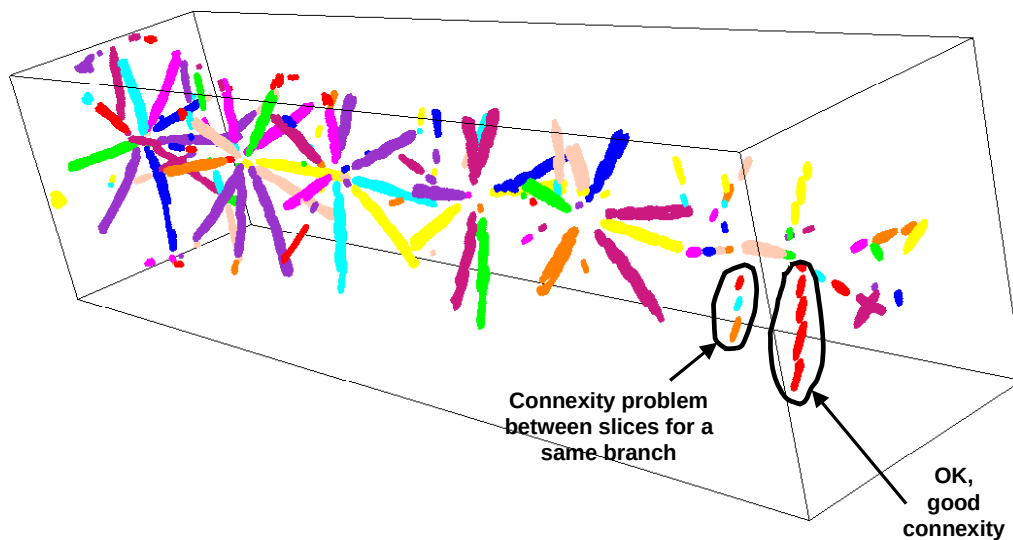


Figure 44 : Résultat de l'algorithme des composantes connexes en 3D sur un billon du bas (reconstruit avec Geomview).

Fig. 44. Result of the 3D connex component algorithm for a bottom log.

²¹ Adaptation en 3D de l'algorithme 2D décrit dans Cocquerez & Philipp (1995).

Les paramètres mesurables pour l'instant à partir de la détection automatique sont le nombre de branches détectées dans le billon ainsi que la localisation de chaque branche (position en hauteur et azimuth). Les paramètres de forme (diamètre, angle d'inclinaison) ne sont pas encore extraits de façon automatique des images.

Une autre limitation réside dans la taille des branches à détecter. Le pas longitudinal du scanner est de 1cm entre les coupes avec une épaisseur de faisceau de 5mm. Par conséquent il reste un espace de 5mm qui n'est pas scanné entre chaque coupe (**Figure 8**). Les branches de petite taille faiblement inclinées peuvent être mal représentées, elles peuvent n'être présentes que sur une seule coupe (absence de support 3D) ou bien ne pas être visibles du tout dans le pire des cas. En l'absence de support 3D nous ne pouvons récupérer aucune information sur l'inclinaison de la branche.

Sur la base de tests préliminaires, l'algorithme décrit précédemment semble fonctionner plus efficacement sur les billons pris dans le bas des arbres plutôt que dans le haut. La **Figure 45** présente deux coupes longitudinales radiales (LR), dans les séries d'images tomographiques et des intervalles non scannés, passant chacune dans une branche : la 1^{ère} branche (coupes tomographiques n°79 à 84) appartient à un billon du haut (34-4-5) et la 2^{de} (coupes n°108 à 114) appartient au billon de la base du même arbre (34-4-1), il s'agit de la même branche qui a servi à l'ajustement du modèle **Figure 41**. Les deux coupes LR sont à la même échelle et les proportions sont respectées. Les croix sur la **Figure 45** représentent les centres de gravité des régions 2D (intersection de la branche avec les coupes tomographiques) détectées par l'algorithme et présentée **Figure 46** (là encore les échelles et les proportions sont respectées).

Une première observation, qui apparaît bien sur la **Figure 45**, est que les branches dans les billons du haut peuvent être suivies sur des distances radiales plus courtes que dans le bas des arbres, le rayon du duramen diminuant avec la hauteur dans l'arbre. Ainsi, pour l'exemple présenté, nous disposons de quatre points pour ajuster le modèle sur la branche du bas mais de deux points seulement pour celle du haut. De plus, dans les billons du haut, les régions 2D atteignent souvent la limite aubier/duramen et sont tronquées, ce qui leur confère une forme plus ou moins triangulaire (**Figure 46b**) contrairement au bas des arbres où les régions 2D ont plutôt une forme elliptique. Cette forme triangulaire a pour effet de tirer le centre de gravité vers l'extérieur de la région. Sur la **Figure 45**, les centres de gravité (1') et (2') se retrouvent ainsi beaucoup plus proches radialement que ceux de la branche du bas. Après ajustement du modèle sur cette branche (**Figure 47**), l'origine de la branche ($r = 0$) se retrouve ainsi beaucoup plus basse (entre les coupes n°70 et 71) qu'elle ne devrait l'être, c'est-à-dire dans la zone verticillaire délimitée.

Par ailleurs, nous savons que les caractéristiques de branchaison varient longitudinalement dans l'arbre (Colin, 1992) : (i) l'angle d'insertion des branches²² devient plus ouvert plus la distance à l'apex est importante ; (ii) le diamètre des branches augmente entre le bas de l'arbre et la base du houppier, puis il diminue dans le houppier. Cette dernière observation a notamment été vérifiée sur les arbres de notre échantillon et serait peut-être également à prendre en considération.

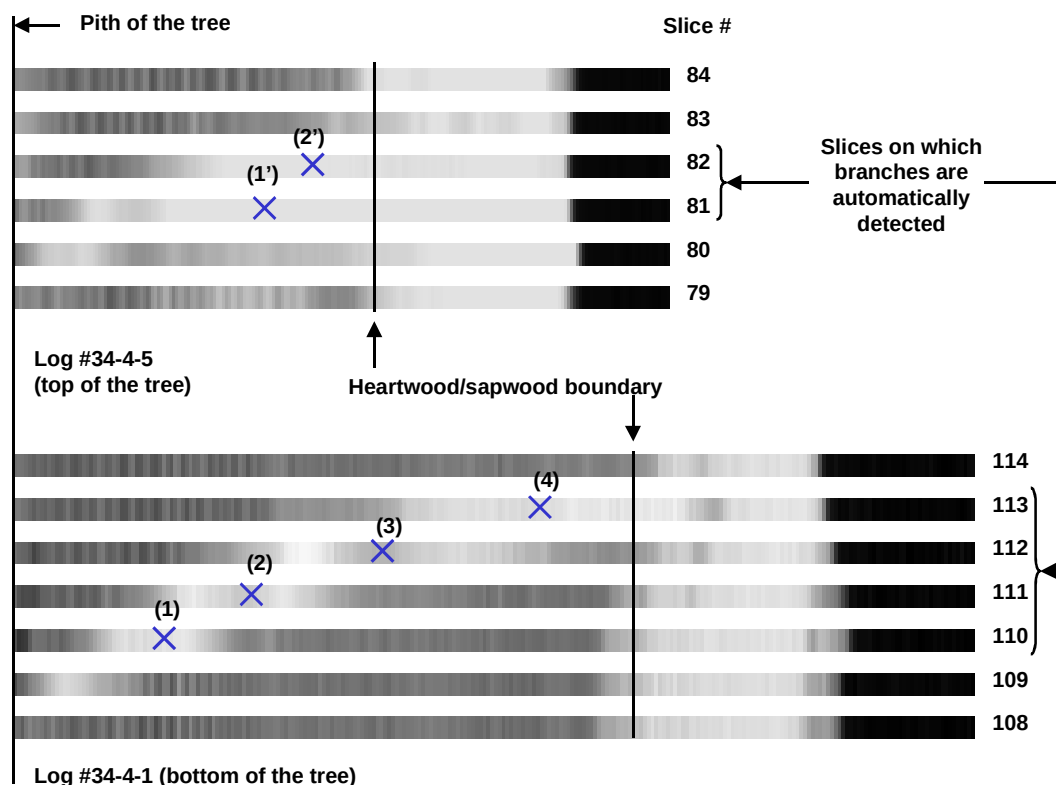


Figure 45 : Deux coupes LR (pour un billon du bas (image du bas) et pour le billon du haut correspondant (image du haut) passant au travers des séries d'images tomographiques et des intervalles non scannés. Chacune des deux coupes passe dans une branche. Les croix représentent les centres de gravité des nœuds détectés sur les images tomographiques.

Fig. 45. Two longitudinal-radial cuts (for a bottom log (below) and for the corresponding top log (above)) passing through CT image stacks. Each of the two cuts passes through a branch. Crosses represent gravity centre of detected knots on the CT images.

²² L'angle d'insertion est défini comme l'angle mesuré au dessus de la face supérieure de la branche entre sa direction d'émission et l'axe du tronc (Colin 1992).

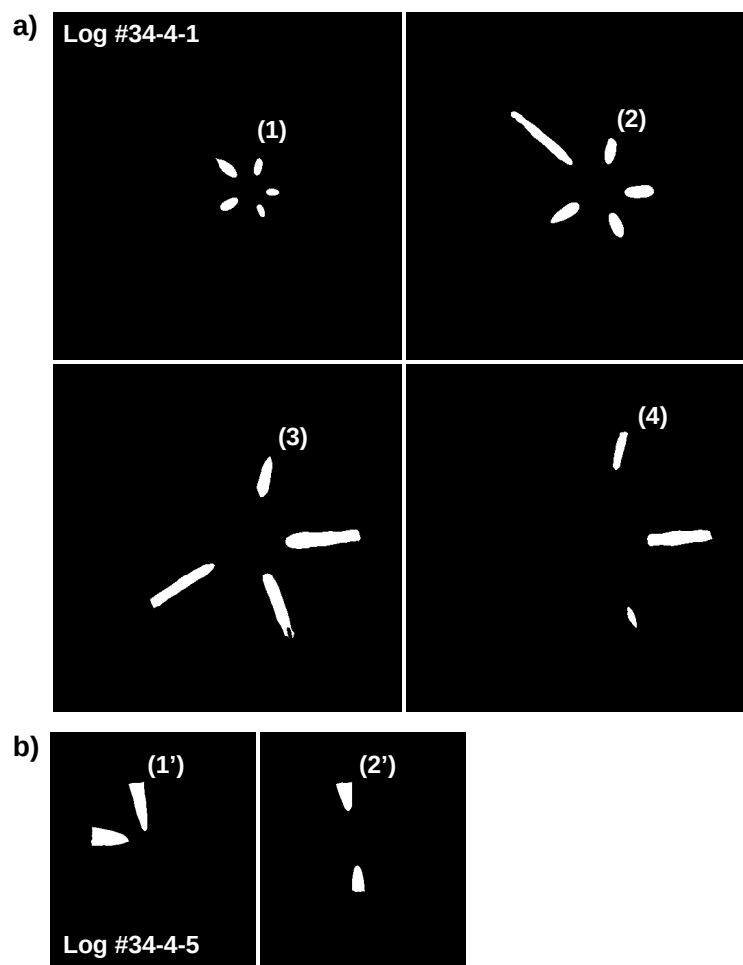


Figure 46 : Coupes transversales montrant la segmentation 2D des morceaux de branches dont il est question **Figure 45 : a)** pour le billon du bas ; **b)** pour le billon du haut correspondant.

Fig. 46. Cross section showing the 2D knot segmentation (knots from Fig. 45): a) for the bottom log; b) for the corresponding top log.

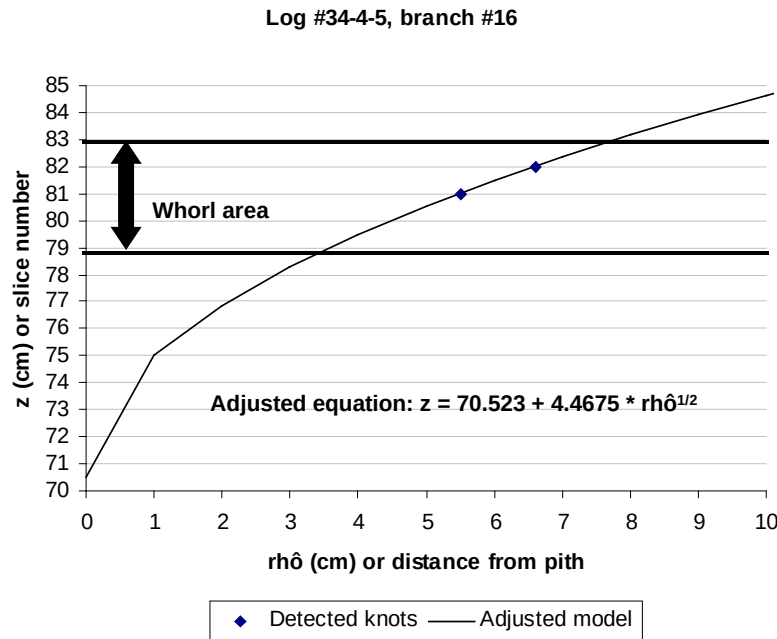


Figure 47 : Ajustement du modèle (Équation 13) pour une branche d’un billon provenant du haut d’un arbre (billon 34-4-5, 16^{ème} branche détectée).

Fig. 47. Model adjustment for a branch coming from a top log of a tree (log 34-4-5, 16th detected branch).

Aucune étape proprement dite de validation n’a encore été menée, les résultats ont été évalués par des contrôles visuels : soit par comparaison de la segmentation obtenue sur les coupes 2D avec les images tomographiques d’origine (**Figure 46**), soit par jugement sur la reconstruction 3D (**Figure 42**).

Des planches issues de billons étudiés sont à notre disposition (cf. § 2.1). Ces planches, destinées à la base à une autre utilisation, nous permettraient éventuellement de conduire cette étape de validation par rapport à des échantillons de bois. Cependant, il n’est pas immédiat de trouver une correspondance visuelle entre la surface de ces planches et celle de planches “virtuelles” reconstruites à partir de nos images. Plusieurs facteurs rendent cette tâche délicate : le trait de scie, la déformation des planches au séchage, la surface de taille réduite (largeur 9.5cm), le positionnement du sciage virtuel au même endroit que le sciage réel en se basant sur la génératrice et sur la position de la moelle dans le billon.

Une autre approche est envisageable. De telles validations par comparaison avec des coupes de bois “réelles” (sections ou planches), destinées précisément à cela, ont déjà été effectuées lors d’autres études (Taylor et al., 1984; Funt, 1985; Oja, 2000). Ainsi, une validation des sorties de notre algorithme par comparaison à des détourages manuels effectués sur les images tomographiques serait suffisante.

Par ailleurs, des validations basées sur le nombre de branches détectées dans les billons, sur leur position (hauteur, azimuth) et sur leurs caractéristiques de forme (inclinaison, diamètre) seraient

sans doute beaucoup plus facile à mettre en œuvre. D'autant plus que nous disposons de ces mesures de branchaison pour une UC sur deux dans les billons (§ 2.1).

Cette première approche avait pour objectif de détecter la partie des branches présente dans le duramen des billons et de reconstruire une vue 3D de leur squelette. Plutôt que d'utiliser le centre de gravité des régions 2D pour ajuster les modèles, il serait peut-être préférable de s'intéresser directement à l'enveloppe externe des branches, c'est à dire de se baser sur les frontières des zones de nœuds détectées. Afin d'aboutir à une meilleure estimation de la forme des branches, notamment dans la partie haute des arbres, un couplage avec une détection de la partie incluse dans l'aubier serait à effectuer.

Enfin, le traitement d'un nombre plus important de billons serait nécessaire pour détecter d'éventuels cas particuliers et pour mieux tenir compte de la variabilité des caractéristiques de la branchaison, notamment entre le bas et le haut des arbres.

3.4.2.2.2. Détection de la partie des branches incluse dans l'aubier

La méthode utilisée pour la détection des nœuds dans le duramen est basée sur un contraste élevé, cette méthode ne peut donc pas s'appliquer dans l'aubier qui est de densité trop proche de celle des branches pour qu'un simple seuillage permette de les distinguer (**Figure 48**). Ce problème de la détection dans l'aubier se pose d'avantage pour les billons du haut qui ont une proportion d'aubier beaucoup plus importante que dans les billons du bas (**Figure 33**).

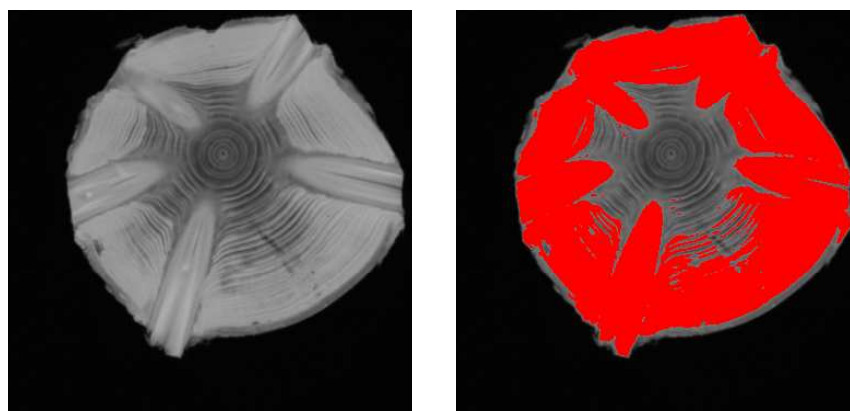


Figure 48 : Coupe CT provenant d'un billon du haut (à gauche) ; Seuillage de l'image (à droite) : les densités les plus élevées sont représentées en rouge.

Fig. 48. CT slice of a top log (on the left); Thresholding (on the right): higher densities are represented in red.

Nous allons présenter ici une piste pour la détection des branches dans l'aubier. Cette partie n'est pratiquement pas abordée dans la littérature, seule l'équipe suédoise^[4] semble s'y être intéressée (Grundberg & Grönlund, 1992). La méthode qu'ils décrivent permet de prédire, mais pas de détecter, la position des nœuds dans l'aubier à partir de leur position dans le duramen.

D'après les images, les branches semblent présenter une certaine homogénéité radiale de leurs niveaux de gris tandis que les variations tangentielles sont plus élevées (**Figure 48**, image de gauche). En revanche, dans les zones où les cernes de croissance sont visibles sur la section, c'est exactement le contraire : une forte variabilité radiale associée à une faible variabilité tangentielle. En s'inspirant des travaux de Sliwa et al. (2003) pour la détection des cernes de croissance sur des photos de sections, nous avons calculé un rapport des écarts-types radiaux et tangentiels. Le traitement de l'image est le suivant :

1- Détection automatique de la moelle (article I).

2- **Transformation de l'image en coordonnées polaires (Figure 49)** en prenant pour centre la moelle et en rastérisant des rayons (360 ici). De l'information est perdue lors de la transformation du fait de la discrétisation, en effet, plus la distance à la moelle augmente, plus l'écart entre deux rayons devient important d'où la perte de l'information contenue dans les pixels non traversés par des rayons. Cependant cette représentation de l'image est commode car elle rend la structure des cernes horizontale et celle des branches verticale. L'utilisation de filtres horizontaux et verticaux, plus classiques, est alors possible.

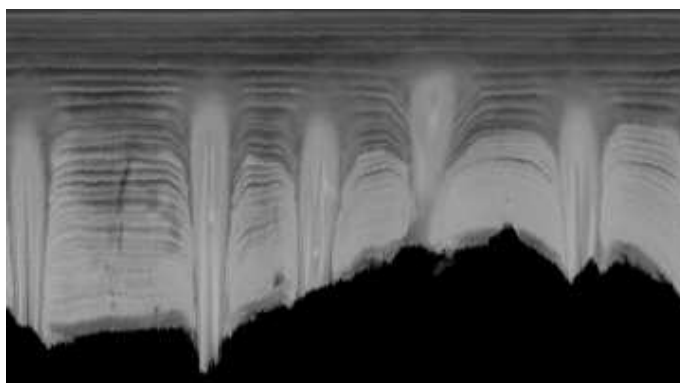


Figure 49 : Représentation polaire de l'image de la **Figure 48**. Le pas angulaire choisi est de 1° et le rayon de 200 pixels ce qui résulte en une image de taille 360 x 200.

Fig. 49. Polar transformation of the image of Fig. 48. The angular step is equal to 1° and the radius is equal to 200 pixels, resulting in a 360 x 200 image.

3- Calcul du rapport des écarts-types.

Pour chaque pixel de l'image, un écart-type horizontal ($ET_{\text{horizontal}}$) et un écart-type vertical (ET_{vertical}) sont calculés dans des voisinages, respectivement horizontaux et verticaux, de 11 pixels centrés sur le

pixel courant. Le rapport R_{ET} de ces écarts-types est ensuite calculé tel que $R_{ET} = \frac{ET_{vertical}}{ET_{horizontal}}$. Les

$ET_{vertical}$ et $ET_{horizontal}$ de l'image en polaires correspondent respectivement aux écarts-types radial et tangentiel de l'image d'origine. Les hypothèses que l'on peut faire sont :

$R_{ET} < 1$ dans les branches ;

$R_{ET} > 1$ dans les zones où les cernes de croissance sont visibles, notamment dans le duramen ;

$R_{ET} \approx 1$ dans les zones plus homogènes comme l'aubier et le fond.

Le but étant d'identifier les branches, les valeurs de R_{ET} supérieures à 1 sont ramenées à 1 afin de se concentrer sur l'intervalle de variation $[0,1]$, les valeurs de R_{ET} ainsi modifiées sont représentées en niveaux **Figure 50**. Les zones sombres sur la **Figure 50** permettent de localiser les branches.



Figure 50 : Image des R_{ET} . Les valeurs sont codées de 0 (le plus sombre) à 1 (en blanc).

Fig. 50. Image of R_{ET} . Values are coded from 0 (black pixels) to 1 (white pixels).

4- Seuillage sur l'image des R_{ET} pour segmenter les branches. Un filtre médian 3×3 est appliqué pour débruiter l'image. Puis les contours des régions restantes, de tailles suffisamment importantes, sont identifiés (**Figure 51**). D'autres critères sont calculés pour chaque région : centre de gravité, aire, orientation. Sur la **Figure 51** on peut remarquer que les régions 1 et 6 apparaissent disjointes bien qu'elles appartiennent à la même branche. Une dilatation dans la direction horizontale ou un critère de positionnement sur l'axe des abscisses permettrait de résoudre assez facilement ce type de problème. Cette étape n°4 a été réalisée avec le logiciel ImageJ.



Figure 51 : Détection des contours des régions susceptibles d’être des nœuds.

Fig. 51. Edge detection of knot regions.

Afin de juger de la détection des nœuds dans l’aubier nous avons détourné à la main (**Figure 52**) la limite aubier/duramen (en rouge), l’écorce (en bleu) ainsi que chaque branche (en vert). Bien que la forme des branches détectées (régions numérotées en noir) ne correspondent pas parfaitement à la forme des branches détournées (en vert), la méthode semble donner une bonne localisation des branches dans l’aubier. Il serait envisageable de coupler cette méthode avec celle de détection dans le duramen afin de déterminer l’endroit où s’arrête la branche. Les investigations doivent donc être poursuivies.

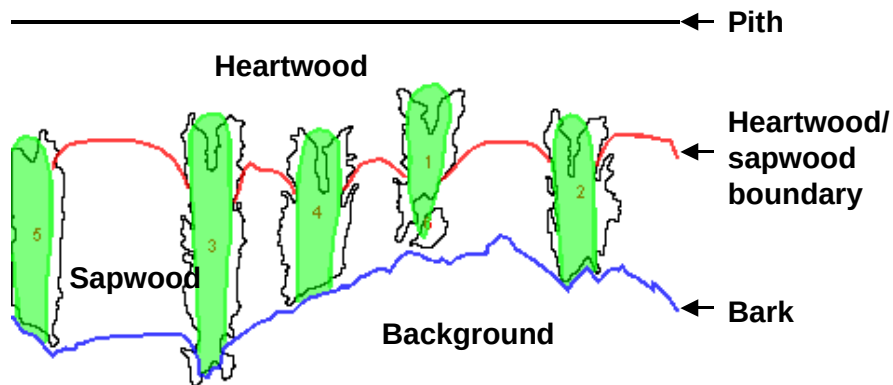


Figure 52 : Superposition de la détection automatique et du détournage manuel (en vert). Les positions de la moelle (en noir), de la limite aubier/duramen (en rouge) et de l’écorce (en bleu) sont également représentées.

Fig. 52. Superposition of automatic (in black) and manual detections (in green). Locations of pith (in black), heartwood/sapwood limit (in red) and bark (in blue) are also represented.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce travail était le développement de procédures de détection automatique de caractéristiques internes de billons d'Epicéa à partir d'images tomographiques. La méthode d'investigation est non destructive (tomographie X à partir d'un scanner médical) et la mise au point de tels algorithmes devait permettre d'acquérir une description 3D détaillée (distribution et dimension) des objets étudiés en des temps raisonnables, à des fins d'analyse scientifique. Les billons ont été scannés à l'état frais et les niveaux de gris des images analysées dépendent de la densité du bois mais également de sa teneur en eau.

Un premier apport de ce travail est la mise au point de méthodes de détection robustes et précises de caractéristiques observables sur les images tomographiques. Les principaux résultats obtenus sont :

- 1- la détection de la moelle à partir d'une procédure faisant intervenir une transformée de Hough. L'erreur de positionnement (distance à la position de la moelle observée) est inférieure au millimètre ;
- 2- la détection de la limite aubier/duramen, l'aubier étant détecté sur la base de sa teneur en eau élevée. L'erreur sur le diamètre du duramen est de 1.8mm (valeur médiane) soient des erreurs relatives de 0.8% et 1.3% en proportion respectivement des diamètres de la section et du duramen ;
- 3- la localisation longitudinale des verticilles dans le billon, avec un taux de détection de 99.5%. Cependant, en raison d'un polycyclisme important chez les arbres étudiés, une partie des verticilles détectés correspondait en fait à des pousses d'août. Une comparaison avec une méthode optique (acquisition par un dispositif laser multi-points) basée sur les variations de la forme externe du billon (bourrelets cicatriciels) a également été réalisée : la méthode optique était moins sensible à la présence de pousses d'août mais parvenait moins bien que la méthode par rayons X à détecter les verticilles notamment dans le bas des arbres ;
- 4- en ce qui concerne la détection des branches individuelles et leur mesure, les investigations en cours fournissent des résultats encourageants. Notre méthode permet de segmenter les nœuds sur les images tomographiques (2D) et d'identifier ceux appartenant à une même branche sur plusieurs sections consécutives (3D). L'algorithme fournit le nombre de branches dans un billon ainsi que la position longitudinale et l'azimut de chaque branche. Cependant, aucun élément de validation n'est disponible à l'heure actuelle et les travaux doivent être poursuivis afin notamment d'extraire de façon précise des paramètres tels que le diamètre ou l'inclinaison des branches.

Une application directe des travaux ci-dessus est l'analyse des composantes ainsi détectées. Dans le cadre de la thèse, nous avons particulièrement étudié :

- 1- les variations longitudinales du diamètre et de la densité de la moelle. Suite à l'observation sur les images tomographiques d'une augmentation de la densité de la moelle et d'un rétrécissement de son diamètre au niveau des verticilles, nous avons cherché à vérifier qu'il ne s'agissait pas d'un artefact en analysant plus en détail ces variations. De premières investigations, portant sur des radiographies 2D, ont confirmé les variations observées. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de référence sur les variations de densité de la moelle. En revanche, les variations de diamètre sont connues puisqu'elles sont utilisées pour la détection des limites d'UC quand les bourrelets cicatriciels ne sont plus visibles sur la surface externe des tiges (sur des arbres âgés par exemple). Dans ce cas, l'accès aux variations de diamètre se fait de façon destructive en fendant la tige longitudinalement au niveau de la moelle ; la tomographie permettrait d'y accéder de façon non destructive ;
- 2- les variations intra- et inter-arbres des quantités d'aubier et de duramen. Un premier résultat a été de constater que la largeur d'aubier était constante dans le tronc au dessus de l'empatement et en dessous de la base du houppier. Dans un deuxième temps, une analyse inter-arbres a permis d'étudier les relations entre la largeur d'aubier et des variables du peuplement ou mesurées sur l'arbre. Une forte corrélation entre la largeur d'aubier et la surface cumulée des sections de branches a notamment été mise en évidence, ce qui est cohérent avec les résultats de précédentes études ayant mis en relation la quantité d'aubier avec des variables telles que la biomasse foliaire.

Les algorithmes mis au point dans cette étude ont été calibrés pour de l'Epicéa ayant poussé dans le nord-est de la France. Une adaptation à d'autres essences et/ou à d'autres conditions de croissance est envisageable avec éventuellement un réajustement des paramètres utilisés dans les algorithmes. Pour la détection de la moelle, la méthode devrait être transposable en l'état, à condition de pouvoir distinguer les cernes sur des images tomographiques, c'est-à-dire que la différence de densité entre le bois de printemps et le bois d'été soit suffisamment marquée pour être mise en évidence par une détection de contour. La détection de l'aubier reste possible à condition que sa densité à l'état vert permette de le distinguer du duramen par seuillage. A titre informatif, nous disposons de deux billons de Pin (billon du bas et billon du haut d'un même arbre) et de deux billons de Bouleau sur lesquels nous avons appliqué nos algorithmes de détection de la moelle et de la limite aubier/duramen. Les arbres desquels étaient issus ces billons, présentaient des largeurs de cernes très faibles et la résolution des images n'était pas toujours suffisante pour distinguer tous les cernes. Toutefois, les résultats obtenus pour la détection de la moelle, en conservant les mêmes paramètres que pour l'Epicéa, étaient très satisfaisants, aussi bien sur le Pin que sur le Bouleau. Une légère modification de certains des paramètres, afin d'augmenter le nombre de points de contour, a donné des résultats encore meilleurs. L'algorithme de détection de la limite aubier/duramen a été testé sur les

billons de Pin et a conduit également à de bons résultats. Sur le Bouleau scanné à l'état frais, la limite aubier/duramen n'était pas visible sur les images. Nous n'avons pas testé notre méthode de détection des nœuds sur d'autres essences. Cependant, étant donné l'apparence des branches sur les images des billons de Pin, leur détection ne devrait pas poser de problème majeur.

Les méthodes développées dans la thèse permettent l'acquisition rapide et non destructive d'un volume important de données. Ces données devraient permettre de conduire de nombreuses investigations : des analyses architecturales des arbres avec le suivi de la moelle et la détection des prises de relais sur l'axe principal de la tige ; des analyses de variabilité intra- et inter-arbres des quantités d'aubier et de duramen en relation avec des aspects physiologiques tels que la zone de conductivité de tronc, la taille du houppier vert ; des analyses de branchaison (position, orientation, taille, quantité des branches).

Pour des échantillonnages futurs, il serait intéressant de prévoir du matériel supplémentaire pour la calibration des seuils utilisés dans les procédures de détection ainsi que pour leur validation. Celle-ci pourrait concerner la comparaison des frontières des objets détectés à partir des images tomographiques (rendant compte de la densité et de l'humidité du matériau) avec celles des mêmes objets observables sur des photos numériques de rondelles ou de planches de bois (les photos devant être réalisées à l'état frais afin d'éviter les problèmes de déformation dus au séchage).

La thèse étant orientée vers la conduite ultérieure d'analyses scientifiques plutôt que vers l'industrie, la priorité a été mise sur la robustesse et la précision des algorithmes. Pour une utilisation en industrie, une optimisation des algorithmes serait indispensable afin d'augmenter la vitesse des traitements.

A court terme, plusieurs points abordés dans cette étude mériteraient des analyses complémentaires : (i) analyser les coupes microscopiques prélevées dans la moelle (§ 3.1.2) pour comprendre les variations de diamètre et de densité observées. Il serait intéressant de scanner d'autres essences que l'Epicéa, peut-être à une résolution plus élevée, pour voir si ces variations permettraient une délimitation non destructive des UC à partir d'images tomographiques ; (ii) compléter et valider l'algorithme de détection de l'écorce présenté au § 3.3 ; (iii) compléter la méthode de détection des branches en couplant la détection dans le duramen (§ 3.4.2.2.1) avec celle dans l'aubier (§ 3.4.2.2.2). Mesurer des caractéristiques de la branchaison telles que le diamètre des branches ou bien leur inclinaison. Reconstruire l'enveloppe des branches en 3D afin de pouvoir par exemple simuler des sciages dans les billons. Enfin, une validation de la méthode de détection mise au point devra être menée ; elle pourra porter par exemple sur des mesures statistiques de la nodosité dans les billons étudiés : nombre de nœuds, distribution des diamètres, etc.

A plus long terme, il s'agira d'étendre l'analyse à d'autres caractéristiques. En vue d'évaluer la qualité des produits sciés, la largeur de cernes est une caractéristique importante car elle détermine la densité du bois et donc ses propriétés mécaniques. Par ailleurs, la reconstruction de l'empilement des cernes permettrait de décrire la croissance passée de l'arbre. Sous réserve que la résolution des images le permette, la détection des cernes dans la zone de duramen est envisagée. Des tests préliminaires ont été effectués à partir de transformées de Fourier et les investigations doivent être poursuivies. Des modèles de largeurs de cernes pourraient être ajustés à partir des cernes détectés dans le duramen, puis utilisés pour la prédiction des largeurs de cernes dans la zone d'aubier.

Par ailleurs, il serait intéressant de coupler nos procédures de détection à un logiciel d'optimisation du sciage afin de pouvoir par exemple raisonner sur d'autres critères tels que la valeur des produits sciés ou bien leur volume. Nous pourrions ajuster une forme sur nos branches (tronc de cône par exemple) mais il faudrait utiliser un logiciel qui permette de tenir compte de leur taille, de leur position et de leur orientation.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alkan, S.**, 2002. Internal log defect model using CT images. Phase I : Self-recognizing and visualizing log. *Fourth Workshop of IUFRO Working Party S5.01-04 "Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Softwares"*, September 8-15, Harrison Hot Springs, British Columbia, Canada, 162-166.
- Andersson, C., Walter, F.**, 1995. Classification of compression wood using digital image analysis. *Forest Products Journal*, 45(11/12), 87-92.
- Andreu, J.P., Rinnhofer, A.**, 2003a. Modeling knot geometry in Norway spruce from industrial CT images. Bigün, J., Gustavsson, T. (eds). *Proceedings of Image Analysis, 13th Scandinavian Conference (SCIA)*, June 29 - July 2, Halmstad, Sweden, 786-791.
- Andreu, J.P., Rinnhofer, A.**, 2003b. Modeling of Internal Defects in Logs for value Optimization based on Industrial CT Scanning. *Fifth International Conference on Image Processing and Scanning of Wood*, March, 23-26, Bad Waltersdorf, Austria, 141-150.
- Andreu, J.-P., Rinnhofer, A.**, 2001. Automatic detection of pith and annual rings on industrial computed tomography log images. *ScanTech*, Seattle, Washington, USA, 37-47.
- Andreu, J.-P., Rinnhofer, A.**, 2002. Enhancement of annual rings on industrial CT images of logs. *16th International Conference on Pattern Recognition*, 11-15 August, Quebec City, Canada, 261-264.
- Anon.**, 2000. X-Ray Log Scanner, FAIR-CT95-1188, Final Report Abstract.
- Anon.**, 2005a. Optimizing Log Breakdown By Computed Tomography Assessment of Inner Quality - Joanneum Research Institute of Digital Image Processing (Austria).
- Anon.** Wikipédia, L'encyclopédie libre. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>, 2005b.
- Anon.** CT generation. GE Healthcare, Bio-Sciences, Europe. Medcyclopaedia.com, 2005c.
- Bauch, J., Koch, G.**, 2001. Biologische und chemische Untersuchungen über Holzverfärbungen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* [L.]) und Möglichkeiten vorbeugender Maßnahmen [Biological and chemical analyses about wood discolourations of Common beech (*Fagus sylvatica* [L.]) and possibilities of preventing measures]. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Universität Hamburg, 66 pp.
- Benson-Cooper, D.M., Knowles, R.L., Thomson, F.J., Cown, D.J.**, 1982. Computed tomographic scanning for the detection of defects within logs. *FRI Bulletin, Forest Research Institute, New Zealand*. 1982. No. 8, 9 pp. 6 ref.
- Bhandarkar, S., Faust, T.D., Tang, M.**, 1996. A System for Detection of Internal Log Defects by Computer Analysis of Axial CT Images. *Third IEEE Workshop on Applications of Computer Vision WACV'96*, December 2-4, Sarasota, Florida, USA, 258-263.
- Bhandarkar, S.M., Faust, T.D., Tang, M.**, 1999. CATALOG: a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography. *Machine Vision and Applications*, 11(4), 171-190.
- Birkeland, R., Han, W.**, 1991. Ultrasonic scanning for internal log defects. *Proceedings of the 4th International Conference on Scanning Technology in the Wood Industry*, San Francisco, CA.
- Björklund, L.**, 1999. Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data. *Silva Fennica*, 33(2), 119-129.

- Björklund, L., Petersson, H.**, 1999. Predicting knot diameter of *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(4), 376-384.
- Bresenham, J.**, 1965. Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*, 4(1), 25-30.
- Bucur, V.**, 2003a. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. 354 pp. Springer Verlag. ISBN: 3540438408.
- Bucur, V.**, 2003b. Techniques for high resolution imaging of wood structure: a review. *Measurement Science & Technology*, 14(12), R91-R98.
- Caraglio, Y., Barthélémy, D.**, 1997. Revue critique des termes relatifs à la croissance et à la ramification des tiges des végétaux vasculaires. Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux. Paris: Sciences Update/ Editions INRA. 79 pp.
- Chalifour, A., Nouboud, F., Deprost, B., Okana, S.**, 2001. Automatic Detection of Tree-Rings on Wood Disc Images. *5th International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, may 21-23, Le Creusot, France, 348-352.
- Chang, S.J., Olson, J.R., Wang, P.C.**, 1989. NMR imaging of internal features in wood. *Forest Products Journal*, 39(6), 43-49.
- Chang, S.J.**, 1990. Imaging hardwood logs with the NMR scanner. *IAWA Bulletin*, 11(2), 121.
- Chang, S.J.**, 1992. External and Internal Defect Detection to Optimize Cutting of Hardwood Logs and Lumber. *Transferring Technologies for Industry n°3*.
- Chiorescu, S., Grundberg, S.**, 2001. The influence of missing bark on measurements performed with a 3D log scanner. *Forest Products Journal*, 51(9), 78-86.
- Cocquerez, J.-P., Philipp, S.**, 1995. Analyse d'images: filtrage et segmentation. Masson. ISBN 2-225-84923-4.
- Colin, F.**, 1992. Analyse et modélisation de la branchaison de l'épicéa commun en vue de prédire la qualité de la ressource. Unpublished Ph.D. dissertation, Sciences Forestières, INRA-ENGREF, 278 pp.
- Conner, W.S., Schowengerdt, R.A.**, 1998. Design of a computer vision based tree ring dating system. *IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, April 5-7, Tucson, Arizona.
- Conner, W.S., Schowengerdt, R.A., Munro, M., Hughes, M.K.**, 2000. Engineering design of an image acquisition and analysis system for dendrochronology. *Optical Engineering*, 39(2), 453-463.
- Constant, T.**, 1999. Characterisation of Growth Parameters in Dried Battens, Improved Spruce Timber Utilization, STUD FAIR CT 96-1915, SUBTASK B6-2, STUD.INRA.FR.B62.01 (Methods), INRA Team Partner P3.
- Contreras, I., Guesalga, A., Fernandez, M.P., Guarini, M., Irarrazaval, P.**, 2002. MRI fast tree log scanning with helical undersampled projection acquisitions. *Magnetic Resonance Imaging*, 20(10), 781-787.
- Cruvinel, P.E., Naime, J.M., Borges, M., Macedo, A., Zhang, A.**, 2003. Detection of beetle damage in forests by x-ray CT image processing. *Revista Árvore*, 27(5), 747-752.
- Danielsson, P.-E., Ye, Q.-Z.**, 1988a. A new procedure for line enhancement applied to fingerprints. *Pattern recognition and artificial intelligence*, 49-61.
- Danielsson, P.-E., Ye, Q.-Z.**, 1988b. Rotation-Invariant Operators Applied to Enhancement of Fingerprints. *Proceedings of the 8th ICPR*, Rome, Italy, 329-333.
- Daquitaine, R., Saint-Andre, L., Leban, J.M.**, 1998. Improved stem taper and ring width modelling based on standard tree measurements (pages 3-23) In "Modelling stem properties distribution", Final report of

- Subtask A2.1. STUD research project, FAIR CT-96-1915. Leban, J.-M., Hervé, J.-C. ed. Document interne de l'Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois, Champenoux, France, 68 pp.
- Davis, J., Wells, P.**, 1992. Computer tomography measurements on wood. *Industrial Metrology*, 2, 195-218.
- Di Placido, J., Gastine, F., Deleuze, C.**, 2002. L'Epicéa commun en France : alternatives sylvicoles pour l'essence. *Fiches Informations-Forêt de l'AFOCEL*, 654, 29pp.
- Duda, R.O., Hart, P.E.**, 1972. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Communications of the ACM*, 15(1), 11-15.
- Edelin, C.**, 1993. Aspects morphologiques de la croissance rythmique chez les arbres tropicaux. *Compte rendu du Séminaire du groupe d'Etude de l'Arbre: Le rythme de croissance, base de l'organisation temporelle de l'arbre*, 25-26 mars, Angers, 13-23.
- Ekevad, M.**, 2004. Method to compute fiber directions in wood from computed tomography images. *Journal of Wood Science*, 50(1), 41-46.
- Flood, K., Danielsson, P.-E., Seger, M.M.**, 2003. On 3D Segmentation of Knots in 3D-volume data Acquired from X-ray Linear Cone-Beam Scanning. *Fifth International Conference on Image Processing and Scanning of Wood*, March, 23-26, Bad Waltersdorf, Austria, 151-160.
- Fromm, J.H., Sautter, I., Matthies, D., Kremer, J., Schumacher, P., Ganter, C.**, 2001. Xylem water content and wood density in spruce and oak trees detected by high-resolution computed tomography. *Plant Physiology*, 127(2), 416-425.
- Funt, B.V.**, 1985. A computer vision System that analyzes CT-scans of sawlogs. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 9-13, San Francisco, California, 175-177.
- Funt, B.V., Bryant, E.C.**, 1987. Detection of internal log defects by automatic interpretation of computer tomography images. *Forest Products Journal*, 37(1), 56-62.
- Grace, L.A.**, 1993. Exploring the potential of using optical log scanners for predicting lumber grade. *Forest Products Journal*, 43:10, 45-50.
- Grönlund, A., Grundberg, S., Grönlund, U.**, 1994. The Swedish Stembank - an Unique Database for Different Silvicultural and Wood Properties. *Workshop Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares. IUFRO WP S5.01.04*, June 13-17, Hook Sweden, 71-77.
- Grundberg, S., Grönlund, A.**, 1991. Methods for reducing data when scanning for internal log defects. *Proceedings of the 4th International Conference on Scanning Technology in the Wood Industry.*, San Francisco, USA.
- Grundberg, S., Grönlund, A.**, 1992. Log scanning - extraction of knot geometry. *The 1st International Seminar/Workshop on Scanning Technology and Image Processing on Wood*, Aug. 30-Sep. 1, Skellefteå, Sweden.
- Grundberg, S.**, 1999. An X-ray LogScanner - A tool for control of the sawmill process. Doctoral thesis, Division of wood Technology, Lulea University of Technology, ISSN 1402-1544.
- Gupta, N.K., Schmoldt, D.L., Isaacson, B.**, 1999. Tangential scanning of hardwood logs: developing an industrial computer tomography scanner. *Proceedings, 11th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, September, 9-11, 1998, Madison, Wisconsin, 131-139.
- Habermehl, A.**, 1982a. A new non-destructive method for determining internal wood condition and decay in living trees. II: Results and further developments. *Arboricultural Journal*, 6(2), 121-130.
- Habermehl, A.**, 1982b. A new non-destructive method for determining internal wood condition and decay in living trees. Part 1. Principles, method and apparatus. *Arboricultural Journal*, 6(1), 1-8.

- Habermehl, A., Ridder, H.W.**, 1993. Application of Computed-Tomography for Non-Destroying Investigations on Wood of Living Trees - Forestry Studies. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 51(1), 1-6.
- Habermehl, A., Ridder, H.W.**, 1996. Computer-Tomographie in der Forstwirtschaft und Baumpflege (Teil 1). *ZFP-Zeitung*.
- Habermehl, A., Ridder, H.W.**, 1997. Computer-Tomographie in der Forstwirtschaft und Baumpflege (Teil 2). *ZFP-Zeitung*.
- Habermehl, A., Ridder, H.W., Seidl, P.**, 1999. Computerized tomographic systems as tools for diagnosing urban tree health. *Acta Horticulturae*, 496, 261-268.
- Hailey, J.R., Morris, P.I.**, 1987. Application of scanning and imaging techniques to assess decay and wood quality in logs and standing trees. In: Application of scanning and imaging techniques to assess decay and wood quality in logs and standing trees., pp. 48. Forestry Canada/Alberta Forest Service (Canada-Alberta Forest Resource Development Agreement), Edmonton, Alberta Canada.
- Harless, T.E.G., Wagner, F.G., Steele, P.H., Taylor, F.W., Yadama, V., McMillin, C.W.**, 1991. Methodology for locating defects within hardwood logs and determining their impact on lumber-value yield. *Forest Products Journal*, 41(4), 25-30.
- Hattori, Y., Kanagawa, Y.**, 1985. Non-Destructive Measurement of Moisture Distribution in Wood with a Medical X-Ray CT Scanner I. Accuracy and influencing factors. *Mokuzai Gakkaishi*, 31(12), 974-980.
- Hauffe, P.**, 2001. Weiterentwicklung der automatisierten Rundholzvermessung hinsichtlich der Erfassung und Quantifizierung äusserer und innerer Holzeigenschaften (Poursuite des développements de mesure automatisée des bois ronds en vue d'une détection et d'une quantification des propriétés externes et internes du bois).
- He, J.**, 1997. A Comparison of Artificial Neural Network Classifiers for Analysis of CT Images for the Inspection of Hardwood Logs. Unpublished Master Thesis, Faculty of the Bradley Department of Electrical and Computer Engineering of Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Heuret, P., Barthelemy, D., Nicolini, E., Atger, C.**, 2000. Analysis of the components of height growth and stem formation of sessile oak, *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. (Fagaceae) under active silviculture. *Canadian Journal of Botany*, 78(3), 361-373.
- Hodges, D.G., Anderson, W.C., McMillin, C.W.**, 1990. The economic potential of CT scanners for hardwood sawmills. *Forest Products Journal*, 40(3), 65-69.
- Hough, P.V.C.**, 1962. Method and means for recognizing complex patterns. *U.S. Patent 3,069,654*, December, 18.
- Jaeger, M., Leban, J.-M., Borianne, P., Chemouny, S., Saint-André, L.**, 1999. 3D stem reconstruction from CT scan exams. From log external shape to internal structures. *Workshop IUFRO*, September, 5-12, La Londe-Les-Maures.
- Johansson, J., Hagman, O., Fjellner, B.A.**, 2003. Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber. *Journal of Wood Science*, 49(4), 312-316.
- Jourez, B., Leclercq, A.**, 1993. Modelling bark thickness in the tree in relation to silvicultural treatment. Final Report of the Task 6. EED Forest Project. Silvicultural control and non-destructive assessment of timber quality in plantation grown Spruces and Douglas fir. Contract n° MA2B-0024. Ministère de la région Wallone. Station de Recherches Forestières Gembloux.
- Kaestner, A.P., Baath, L.B.**, 2000. Microwave Polarimetry Based Wood Scanning. *12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, September, 13-15, University of Western Hungary, Sopron, Hungary.

- Karsulovic, J.T., Dinator, M.I., Morales, R.,** 2002. Nondestructive gamma radiation methods for detection of central rot in logs of Lenga (*Nothogagus pumilio*). *Forest Products Journal*, 52(11/12), 87-93.
- Larsson, B., Bengtsson, B., Gustafsson, M.,** 2004. Nondestructive detection of decay in living trees. *Tree Physiology*, 24(7), 853-858.
- Lemieux, H., Samson, M., Usenius, A.,** 1997a. Shape and Distribution of Knots in a Sample of *Picea abies* Logs. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12, 50-56.
- Lemieux, H., Usenius, A., Samson, M.,** 1997b. A method for the characterization of knots in logs. *Forest Products Journal*.
- Levi, C., Cray, J.E., McCullough, E.C., Hattery, R.R.,** 1982. The unreliability of CT-numbers as absolute values. *American Journal of Radiology*, 139, 443-447.
- Lévy, B., Conreux, S.,** 1999. Cours de DESS - Cours d'infographie (GAG).
- Lindgren, L.O.,** 1991a. Medical CAT-scanning: X-ray absorption coefficients, CT-numbers and their relation to wood density. *Wood Science and Technology*, 25, 341-349.
- Lindgren, L.O.,** 1991b. The accuracy of medical CAT-scan images for non-destructive density measurements in small volume elements within solid wood. *Wood Science and Technology*, 25(6).
- Lindgren, O., Davis, J., Wells, P., Shadbolt, P.,** 1992. Nondestructive Wood Density Distribution Measurements Using Computed-Tomography. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(7-8), 295-299.
- Lister, P.F.,** 2004. Applications of X-ray Computed Tomography in the Wood Products Industry. *16th WCNDT 2004 - World Conference on NDT*, Aug 30 - Sep 3, Montreal, Canada.
- Lohmann, J., Becker, G.,** 1993. Xylem-Conductive Area of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) of Different Age and Vitality. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 51(2), 93-100.
- Lundgren, C.,** 2000. Predicting log type and knot size category using external log shape data from a 3D log scanner. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(1), 119-126.
- Macedo, A., Vaz, C.M.P., Pereira, J.C.D., Naime, J.M., Cruvinel, P.E., Crestana, S.,** 2002. Wood Density Determination by X- and Gamma-Ray Tomography. *Holzforschung*, 56(5), 535-540.
- Magnusson Seger, M., Danielsson, P.-E.,** 2003. Scanning of logs with linear cone-beam tomography. *Computers and Electronics in Agriculture*, 41(1-3), 45-62.
- Mahler, G., Höwecke, B.,** 1991. Verkernungserscheinungen bei der Buche in Baden-Württemberg in Abhängigkeit von Alter, Standort und Durchmesser [Occurrence of heartwood of beech in Baden-Württemberg depending on age, site and diameter]. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 142(5), 375-390.
- Mahler, G., Hauffe, P.,** 2000. Evaluation of Internal Log Quality using X-ray and Ultrasound. *Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, September, 13-15, University of Western Hungary, Sopron.
- Métro, A.,** 1975. Dictionnaire forestier multilingue. Terminologie forestière. Sciences forestières, technologie, pratiques et produits forestiers. (Version française). 432 pp. ISBN 2-85319-018-8.
- Morales, S., Fernandez, P., Guesalaga, A., Irrarrazaval, P.,** 2002. 3D internal tree structure modeling using Magnetic Resonance Imaging (MRI): Automatic growth ring reconstruction. *Fourth Workshop of IUFRO Working Party S5.01-04 "Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Softwares"*, september, 8-15, Harrison Hot Springs British Columbia, Canada.

- Morales, S., Guesalaga, A., Fernandez, M.P., Guarini, M., Irarrazaval, P.,** 2004. Computer reconstruction of pine growth rings using MRI. *Magnetic Resonance Imaging*, 22, 403-412.
- Nicolotti, G., Socco, L.V., Martinis, R., Godio, A., Sambuelli, L.,** 2003. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 29(2), 66-78.
- Nordmark, U.,** 2002. Knot identification from CT images of young *Pinus sylvestris* sawlogs using artificial neural networks. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(1), 72-78.
- Nordmark, U.,** 2003. Models of Knots and Log Geometry of Young *Pinus sylvestris* Sawlogs Extracted from Computed Tomographic Images. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 18, 168-175.
- Nyström, J., Kline, D.E.,** 2000. Automatic classification of compression wood in green southern yellow pine. *Wood and Fiber Science*, 32(3), 301-310.
- Ohman, M., Nystrom, J.,** 2002. Measurement of green plank shape for prediction and elimination of compression wood. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(4), 377-384.
- Oja, J.,** 1996. Validation of Knot Models on Norway Spruce. *Second IUFRO Workshop WP S 5.01-04. "Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software"*, August 26-31, South Africa.
- Oja, J.,** 1997. A comparison between three different methods of measuring knot parameters in *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12, 311-315.
- Oja, J., Temnerud, E.,** 1999. The appearance of resin pockets in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holz als Roh-und Werkstoff*, 57, 400-406.
- Oja, J.,** 2000. Evaluation of knot parameters measured automatically in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). 58(5), 375 - 379.
- Parziale, G., Rinnhofer, A.,** 2003. Resin Pocket Enhancement through Anisotropic Diffusion. *Fifth International Conference on Image Processing and Scanning of Wood*, March, 23-26, Bad Waltersdorf, Austria, Europe, 161-170.
- Petutschnigg, A.J., Flach, M., Katz, H.,** 2002. Decay recognition for spruce in CT-images. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 60(3), 219-223.
- Pinto, I., Pereira, H., Usenius, A.,** 2003. Analysis of log shape and internal knots in twenty Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems based on visual scanning and computer aided reconstruction. *Annals of Forest Science*, 60(2), 137-144.
- Pinto, I., Pereira, H., Usenius, A.,** 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. *Trees-Structure and Function*, 18(3), 284-294.
- Polge, H.,** 1964. Délimitation de l'aubier et du bois de coeur par analyse densitométrique de clichés radiographiques. *Annales des Sciences Forestieres*, 21, 605-623.
- Polge, H.,** 1966. Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants - Applications dans les domaines technologique et physiologique. Thèse de Doctorat ès-Sciences Appliquées, Université de Nancy I, Station de Recherches sur la Qualité des Bois, INRA-CRF, Nancy-Champenoux, 215 pp.
- Radon, J.,** 1917. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte längs gewisser mannigfaltigkeiten. *Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften, Leipzig, Math.-Phys. Kl.*, 69, 262-277.
- Rauschkolb, M.R.,** 1994. Algorithms for automatic tree ring identification and measurement. Thesis Submitted to the Faculty Mississippi State University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of science in the Department of Computer Science, Faculty of Mississippi State University, 70 pp.

- Rust, S.**, 1999. Comparison of three methods for determining the conductive xylem area of Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Forestry*, 72(2), 103-108.
- Saint-André, L.**, 1998. Modélisation tridimensionnelle des profils de largeur de cerne dans un billon d'Epicéa commun (*Picea abies* Karst.) compte tenu de la mesure de son enveloppe externe et des caractéristiques dendrométriques usuelles de l'arbre d'origine. Doctoral thesis, Sciences Forestières et du Bois.
- Saint-André, L., Daquitaine, R., Leban, J.-M.**, 1999. Modelling the pith location and the ring shape in the stem using the external tree profile. Case study on Norway spruce. *Workshop IUFRO 1999*, September, 5-12, La Londe-Les-Maures.
- Saint-André, L., Hervé, J.C., Leban, J.M.**, 2000. Modelling the number of rings in individual logs of Norway spruce. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(1), 35-143.
- Saint-André, L., Leban, J.M.**, 2000. An elliptical model for tree ring shape in transverse section. Methodology and case study on Norway Spruce. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 58(5), 368-374.
- Saint-André, L., Leban, J.M.**, 2001. A model for the pith position and ring eccentricity in transverse sections of Norway spruce logs. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 59, 137-144.
- Saporta, G.**, 1978. Théories et méthodes de la statistique. Editions Technip, Paris. 388 pp.
- Sarigul, E., Abbott, A.L., Schmoldt, D.L.**, 2003. Rule-driven defect detection in CT images of hardwood logs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 41, 101-119.
- Schad, K.C., Schmoldt, D.L., Ross, R.J.**, 1996. Nondestructive Methods for Detecting Defects in Softwood Logs.
- Schmoldt, D.L., He, J., Abbott, A.L.**, 1998. Classifying features in CT imagery: accuracy for some single and multispecies classifiers. *The 3rd International Seminar/Workshop on Scanning Technology and Image Processing on Wood*, Aug. 17-19, Skelleftea, Sweden.
- Schmoldt, D.L., Occena, L.G., Abbott, A.L., Gupta, N.K.**, 1999. Nondestructive evaluation of hardwood logs: CT scanning, machine vision and data utilization. *Journal of Nondestructive Testing and Evaluation*, 15, 279-309.
- Schmoldt, D.L., He, J., Abbott, A.L.**, 2000a. Automated labeling of log features in CT imagery of multiple hardwood species. *Wood and Fiber Science*, 32(3), 287-300.
- Schmoldt, D.L., Scheinman, E., Rinnhofer, A., Occena, L.G.**, 2000b. Internal Log Scanning: Research to Reality. *Twenty-eighth Annual Hardwood Symposium*, May 11-13, Davis, West Virginia, 103-114.
- Schwartz-Spornberger, V.**, 1990. Untersuchungen an Bäumen mit Hilfe eines Computer-Tomographen. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde des Fachbereichs Biologie der Philipps-Universität Marburg/Lahn.
- Seeling, U., Becker, G., Schwarz, C.**, 1999. Stand der Buchenrotkernforschung und zerstörungsfreie Erfassung des Rotkerns bei Buche (*Fagus sylvatica* L.) [State of the research on beech red heart and nondestructive detection of red heart of beech (*Fagus sylvatica* L.)]. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, 62 pp.
- Sepulveda, P., Oja, J., Grönlund, A.**, 2002. Predicting spiral grain by computed tomography of Norway spruce. *Wood Science*, 48, 479-483.
- Sepulveda, P., Kline, D.E., Oja, J.**, 2003. Prediction of fiber orientation in Norway spruce logs using an X-ray log scanner: A preliminary study. *Wood and Fiber Science*, 35(3), 421-428.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T.**, 1964a. A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory, I. basic analysis. *Japanese Journal of Ecology*, 14, 97-105.

- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T.,** 1964b. A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory, II. Further evidence of the theory and its application in forests ecology. *Japanese Journal of Ecology*, 14, 133-139.
- Sjöberg, P.-J.,** 2001. Image analysis of annual ring pattern for prediction of wood quality. LiTH-ISY-EX-3094.
- Sjöberg, P.-J., Danielsson, P.-E., Seger, M.M.,** 2001. Image analysis of annual ring pattern for prediction of wood quality. *Proceedings SSAB'01, Symposium on Image Analysis*, March 14-15, Norrköping, Sweden.
- Sliwa, T., Brunet, P., Voisin, Y., Morel, O., Stolz, C., Diou, A.,** 2003. Détection automatique des stries de croissance des arbres par transformée en ondelettes. *The 16th International Conference on Vision Interface*, June 11-13.
- Soile, P., Misson, L.,** 2001. Tree ring area measurements using morphological image analysis. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 31(6), 1074-1083.
- Som, S., Davis, J., Wells, P., Svalbe, I.,** 1993. Morphology Methods for Processing Tomographic Images of Wood. *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, 8-10 December, Sydney, Australia, 564-571.
- Som, S., Svalbe, I., Davis, J., Grant, J., Gold, E., Tsui, K., Wells, P.,** 1995. Internal Scanning of Logs for Grade Evaluation and Defect Location. *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, 6-8 December, Brisbane, Australia, 408-413.
- Stokes, A., Berthier, S.,** 2000. Irregular heartwood formation in *Pinus pinaster* Ait. is related to eccentric, radial, stem growth. *Forest Ecology and Management*, 135(1-3), 115-121.
- Taylor, A.M., Gartner, B.L., Morrell, J.J.,** 2002. Heartwood Formation and Natural Durability A Review. *Wood and Fiber Science*, 34(4), 587-611.
- Taylor, F.W., Wagner, F.G., Jr., McMillin, C.W., Morgan, I.L., Hopkins, F.F.,** 1984. Locating knots by industrial tomography - a feasibility study. *Forest Products Journal*, 34(5), 42-46.
- Temnerud, E., Oja, J.,** 1998. A preliminary study on unbiased volume estimation of resin pockets using stereology to interpret CT-scanned images from one spruce log. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 56(3), 193-200.
- Thawornwong, S., Occena, L.G., Schmoldt, D.L.,** 2000. Investigation of the Effect of Reducing Scan Resolution on Simulated Information-Augmented Sawing. Kline, D.E., Abbott, A.L. (eds). *Proceedings of the 4th International Conference on Image Processing and Scanning of Wood IPSW 2000*, Mountain Lake Resort, Mountain Lake, Virginia, USA.
- Thawornwong, S., Occena, L.G., Schmoldt, D.L.,** 2003. Lumber value differences from reduced CT spatial resolution and simulated log sawing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 41(1-3), 23-43.
- Tognetti, R., Raschi, A., Beres, C., Fenyvesi, A., Ridder, H.W.,** 1996. Comparison of sap flow, cavitation and water status of *Quercus petraea* and *Quercus cerris* trees with special reference to computer tomography. *Plant Cell and Environment*, 19(8), 928-938.
- Tsai, C.M., Cho, Z.H.,** 1976. Physics of contrast mechanism and averaging effect of linear attenuation coefficients in a computerized transverse axial tomography (CTAT) transmission scanner. *Physics in Medicine and Biology*, 21, 544-559.
- Wagner, F.G., Taylor, F.W., Ladd, D.S., McMillin, C.W., Roder, F.L.,** 1989. Ultrafast CT scanning of an oak log for internal defects. *Forest Products Journal*, 39(11-12), 62-64.
- Walter, M., Kucera, L.J.,** 1991. Vorkommen und Bedeutung verschiedener Kernformen bei der Buche (*Fagus sylvatica* L.) [Occurrence and importance of different heartwood types of beech (*Fagus sylvatica* L.)]. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 142(5), 391-406.

- Wang, X., Divos, F., Pilon, C., Brashaw, B.K., Ross, R.J., Pellerin, R.F.,** 2004. Assessment of Decay in Standing Timber Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-147. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 12 pp.
- Warensjoe, Mats, Nylinder, Walter, Fredrik,** 2002. Modelling compression wood using data from a 3D-laser scanner. *Fourth Workshop of IUFRO Working Party S5.01-04 "Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Softwares"*, Harrison Hot Springs, British Columbia, Canada.
- Wells, P., Som, S., Davis, J.,** 1991. Automated Feature Extraction From Tomographic Images of Wood. *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, 4-6 December, Melbourne, Australia.
- Wilson, C.R.,** 1980. Quantitative computed tomography. In: Fullerton, G.D., Zagzebski, J.A. (eds). Medical physics of CT and ultrasound-tissue imaging and characterization. New York: American Inst. of Physics.
- Wu, J., Liew, D.,** 2000. A Computer Vision Method for Detection of External Log Cracks and Pith in Log Cross-Section Images. *World Automation Congress: International Symposium on Intelligent Automation and Control (ISIAC)*, June 11-16, Maui, Hawaii, USA.
- Zhu, D.P., Conners, R.W., Araman, P.A.,** 1991a. CT Image Sequence Processing for Wood Defect Recognition. *The Twenty-third Southeastern Symposium on System Theory*, March 10-12, Columbia, South Carolina.
- Zhu, D.P., Conners, R.W., Araman, P.A.,** 1991b. 3-D Signal Processing in a Computer Vision System. *International Conference on Systems Engineering*, August 1-3, Fairborn, Ohio, USA.
- Zhu, D.P., Conners, R.W., Lamb, F., Araman, P.A.,** 1991c. A Computer Vision System for Locating and Identifying Internal Log Defects Using CT Imagery. *Fourth International Conference on Scanning Technology in the Wood Industry*, October 28-29, Burlingame, California.
- Zhu, D.P., Conners, R.W., Schmoldt, D.L., Araman, P.A.,** 1996. A Prototype Vision System for Analyzing CT Imagery of Hardwood Logs. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics--Part B*, August.
- Zu Castell, W., Schrödl, S., Seifert, T.,** 2005. Volume interpolation of CT images from tree trunks. *Plant Biology*, 7, 737-744.
- Zycha, H.,** 1948. Über die Kernbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche [About the heartwood formation and similar processes in the wood of Common beech]. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 67(2), 80-109.

Résumé

La tomographie par rayons X permet un accès direct aux caractéristiques internes des billons scannés par l'intermédiaire des variations de densité et de teneur en eau.

L'objectif de ce travail est de démontrer la faisabilité de la détection automatique de caractéristiques dans des billons à des fins d'analyses scientifiques. Nous disposons pour cela d'une base d'images tomographiques de 24 épicéas communs (*Picea abies* (L.) Karst.) obtenues avec un scanner médical. Les arbres sont représentatifs de différents statuts sociaux et proviennent de quatre peuplements du nord-est de la France, eux-mêmes sont représentatifs de plusieurs classes d'âge, de densité et de fertilité. Les procédures de détection développées sont les suivantes :

- détection de la moelle dans les billons, y compris en présence de nœuds et/ou d'excentricité des cernes. La précision de la localisation est inférieure au millimètre ;
- détection de la limite aubier/duramen dans les billons, y compris en présence des nœuds (principale source de difficulté). L'erreur sur le diamètre du duramen est de 1.8mm soit une erreur relative de 1.3% ;
- détection de la localisation des verticilles et une comparaison à une méthode optique ;
- détection des nœuds individualisés. Cette procédure permet de compter les nœuds dans un billon et de les localiser (hauteur dans le billon et azimuth) ; cependant, la validation de la méthode et l'extraction du diamètre et de l'inclinaison des branches reste à effectuer.

Une application de ce travail a été l'analyse de la variabilité de la quantité d'aubier dans le tronc : en intra-arbre, la largeur d'aubier était constante sous la base du houppier ; en inter-arbre, une forte corrélation avec la quantité de branches vivantes a notamment été mise en évidence.

De nombreuses analyses sont envisageables à partir des résultats de notre travail, parmi lesquelles : l'étude architecturale des arbres avec le suivi de la moelle dans les billons et l'occurrence des prises de relais sur l'axe principal, l'analyse des variations radiales de la forme du duramen, l'analyse de la distribution des nœuds dans les billons.

Mots-clés : *Picea abies*, tomographie, détection automatique, moelle, aubier, duramen, verticilles, nœuds.

Abstract

Computerized tomography allows a direct access to internal characteristics of scanned logs on the basis of density and moisture content variations.

The objective of this work is to assess the feasibility of an automatic detection of internal characteristics with the final aim of conducting scientific analyses. The database is constituted by CT images of 24 spruces (*Picea abies* (L.) Karst.) obtained with a medical CT scanner. Studied trees are representative of several social status and are coming from four stands located in North-Eastern France, themselves are representative of several age, density and fertility classes. The automatic processing developed are the following:

- pith detection in logs dealing with the problem of knot presence and ring eccentricity. The accuracy of the localisation was less than one mm;
- detection of the sapwood/heartwood limit in logs dealing with the problem of knot presence (main source of difficulty). The error on the diameter was 1.8mm which corresponds to a relative error of 1.3%;
- detection of the whorls location and comparison with an optical method;
- detection of individualised knots. This process allows to count knots and to locate them in a log (longitudinal position and azimuth); however, the validation of the method and extraction of branch diameter and inclination are still to be developed.

An application of this work was a variability analysis of the sapwood content in the trunk: at the within-tree level, the sapwood width was found to be constant under the living crown; at the between-tree level, a strong correlation was found with the amount of living branches.

A great number of analyses are possible from our work results, among others: architectural analysis with the pith tracking and the apex death occurrence; analysis of radial variations of the heartwood shape; analysis of the knot distribution in logs.

Keywords: *Picea abies*, tomography, automatic detection, pith, sapwood, heartwood, whorls, knots.