



HAL
open science

Segmentation robuste de nœuds à partir de coupes tangentielles issues d'images tomographiques de bois

Adrien Krähenbühl, Jean-Romain Roussel, Bertrand Kerautret, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric Mothe, Fleur Longuetaud

► To cite this version:

Adrien Krähenbühl, Jean-Romain Roussel, Bertrand Kerautret, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric Mothe, et al.. Segmentation robuste de nœuds à partir de coupes tangentielles issues d'images tomographiques de bois. Reconnaissance de Formes et Intelligence Artificielle (RFIA) 2014, Institut National des Sciences Appliquées Rouen Normandie (INSA Rouen). FRA., Jun 2014, Reims, France. hal-00989126

HAL Id: hal-00989126

<https://hal.science/hal-00989126v1>

Submitted on 9 May 2014

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.

Segmentation robuste de nœuds à partir de coupes tangentielles issues d'images tomographiques de bois

Adrien Krähenbühl¹
Isabelle Debled-Rennesson¹

Jean-Romain Roussel²
Frédéric Mothe^{2,3}

Bertrand Kerautret¹
Fleur Longuetaud^{2,3}

¹ LORIA, UMR CNRS 7503, Université de Lorraine, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy.

² INRA, UMR1092 LERFoB, 54280 Champenoux, France. ³ AgroParisTech, UMR1092 LERFoB, 54000 Nancy, France.

adrien.krahenbuhl@loria.fr

Résumé

Cet article présente une méthode rapide, précise et automatique pour segmenter les nœuds de bois à partir d'images volumiques de troncs d'arbres obtenues par scanner à rayons X. La segmentation des nœuds est un problème récurrent où les techniques classiques produisent des résultats non satisfaisants. Un premier travail nous a permis de développer une méthode capable d'isoler chaque nœud. Quelques approches ont été proposées pour la segmentation de ces nœuds isolés mais elles ne sont pas entièrement satisfaisantes en présence de zones humides. Nous présentons ici une nouvelle approche pour répondre à ce problème, basée sur l'idée originale de coupes tangentes aux cernes. Elles permettent de suivre la trajectoire du nœud de la moelle du tronc jusqu'à l'écorce. Les nœuds sont segmentés par détection d'ellipses discrètes dans chaque coupe tangentielle. Une implémentation complète de la méthode est proposée dans le logiciel TKDetection, disponible librement.

Mots-clefs

Segmentation, bois, tomographie à rayons X, analyse volumique, contraintes géométriques

Abstract

This paper proposes a fast, accurate and automatic method to segment wood knots from volume images obtained by X-Ray Computed Tomography. Wood knot segmentation is a recurrent problem and classical techniques produce unsatisfactory results. A previous work proposes a method to isolate each knot. Some approaches were proposed to segment these knots but they are not entirely satisfactory in the presence of wet areas. This paper presents a novel approach for the knot segmentation, based on the original idea considering slices tangent to the growth rings. They allow to track knot trajectory from the log pith to the bark. Knots are segmented by discrete ellipse detection in each slice. A complete implementation of the method is proposed in TKDetection software, available online.

Keywords

Segmentation, wood, X-Ray CT scanner, volumic analysis, geometrical constraints

1 Introduction

En dehors des applications médicales classiques, la tomographie à rayons X peut être utilisée pour l'analyse de la structure interne du bois. Dans ce contexte, les nœuds représentent les plus grosses structures observables. Les chercheurs en sciences du bois et les scieries sont tout particulièrement intéressés par une telle analyse. Les premiers souhaitent obtenir des mesures précises des caractéristiques nodales tandis que les scieries désirent une localisation en temps réel des nœuds pour optimiser la chaîne de découpe des planches.

En présence de zones humides, la segmentation des nœuds est un sujet de recherche actif. Une décomposition 3D de bois à partir d'images tomographiques contenant un aubier humide est illustré sur la Fig. 1. Deux parties peuvent être distinguées : une partie interne peu humide (le duramen, à gauche) et une partie externe plus humide (l'aubier, au centre). La difficulté de la segmentation des nœuds dans l'aubier est due à une densité similaire des nœuds et de l'aubier humide. Comme illustré sur la Fig. 2(a), des algorithmes récents comme Power Watershed [7] sont peu efficaces pour segmenter précisément les nœuds, malgré une initialisation manuelle du seuil arrière plan/premier plan (plus d'expérimentations dans [10]). Plusieurs stratégies originales ont été envisagées : un modèle de nœud par Andreu et Rinnhofer [3], un modèle déformable dans les travaux d'Aguilera et al. [2] ou l'exploitation de réseaux de neurones par Nordmark [12]. Même si les résultats de ces approches semblent satisfaisants, leur robustesse par rapport aux zones humides n'a pas été évaluée par les auteurs. Au cours d'un premier travail [10], nous avons proposé une première solution pour résoudre le problème de la segmentation des nœuds dans l'aubier humide (nommée CKD). Elle commence par détecter des zones de nœuds [11] puis exploite les informations géométriques, comme les points dominants ou la courbure [8], pour estimer la trajectoire des nœuds dans l'aubier. Comme illustré sur la Fig. 2(b),

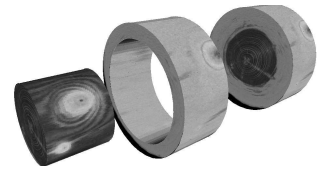


FIGURE 1 – Image 3D de bois humide avec dissociation de l'aubier et de du duramen.

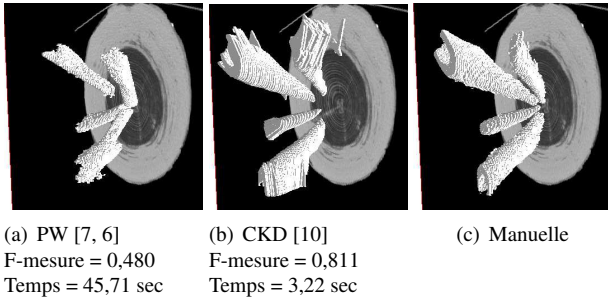


FIGURE 2 – Limites de l’algorithme PW (a) pour la segmentation de nœuds dans l’aubier humide comparativement à la méthode CKD (b) et à une segmentation manuelle (c).

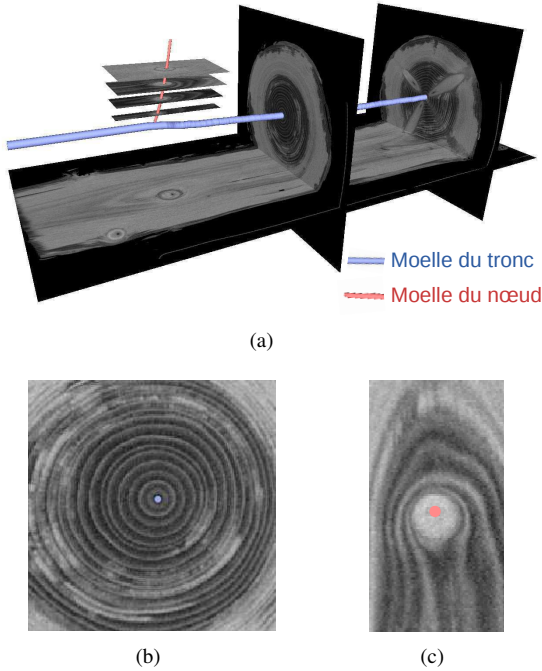


FIGURE 3 – Extraction de la moelle d’un tronc (en bleu) à partir des coupes initiales (b), et de la moelle d’un nœud (en rouge) à partir de coupes tangentielles (c).

CKD est robuste aux zones d’aubier humide et améliore la qualité de la segmentation par rapport aux approches classiques. Les mesures de rappel/précision et F-mesure, obtenues à partir de segmentations manuelles, montrent une amélioration de la qualité de la segmentation et un temps d’exécution. Bien que CKD présente des avancées significatives, elle demeure améliorabile à plusieurs niveaux. En particulier, les formes des nœuds segmentés obtenues présentent des artéfacts sur quelques coupes 2D (voir les différences entre les images (b) et (c) de la Fig. 2). De tels artéfacts n’ont pas forcément d’influence significative pour la F-mesure mais peuvent être critiques pour l’estimation de mesures géométriques telles que la courbure.

Les résultats semblent difficilement améliorables en conservant la stratégie coupe-par-coupe de CKD. La direction des coupes orthogonales à l’axe principal du tronc ne permet pas d’ajouter de nouvelles contraintes géométriques simples. Partant de ce constat, utiliser des coupes tangen-

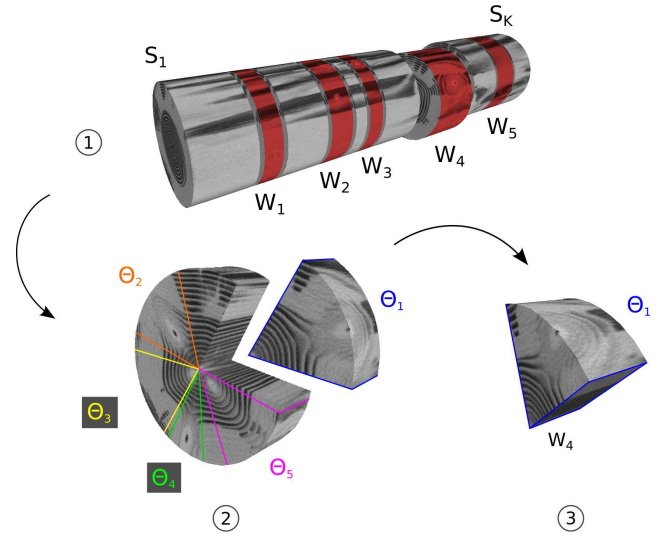


FIGURE 4 – Détection des zones de nœud dans un tronc vu comme un ensemble de coupes S_k . ① identifie les verticilles W_1 à W_5 . ② isole chaque nœud des verticilles dans un intervalle angulaire. ③ est une zone de nœud résultant de l’application de ① et ②.

tielle aux cernes (voir Fig. 3(c)) apparaît plus adapté pour inclure et exploiter des informations de forme a priori dans le processus de segmentation. Une telle stratégie, proposée dans un travail récent [13], permet de suivre la moelle des nœuds comme illustré Fig. 3(a) permettant un calcul plus facile des caractéristiques de la forme des nœuds.

En résumé, cet article propose un processus de segmentation entièrement automatisé pour extraire l’ensemble des voxels appartenant à chaque nœud. La première étape s’appuie sur la détection des zones de nœuds [11] résumée dans la section suivante. L’extraction des coupes tangentielles est présentée à la Sec. 4, avant de décrire l’algorithme de suivi de moelle à la Sec. 5. La segmentation se conclue par une analyse elliptique des coupes tangentielles, détaillée à la Sec. 6.

2 Détection des zones de nœuds

La méthode proposée dans [11] permet d’isoler chaque nœud d’un tronc à l’intérieur d’une zone de nœud. Basée sur la notion de z-mouvement, elle suppose que les nœuds sont les structures internes de l’arbre avec les plus grands mouvements visibles lorsqu’on fait défiler les coupes. Une première phase identifie les ensembles de coupes contenant un verticille¹ de nœuds. Une seconde phase, appliquée à un verticille, isole individuellement chaque nœud par une analyse angulaire du z-mouvement.

2.1 Z-mouvement

Le z-mouvement, introduit dans [11], considère un tronc comme une séquence de coupes $(S_k)_{1 \leq k \leq K}$ prises le long de l’axe z, telles que $S_k \in \mathbb{Z}^2$. Lorsque les coupes défilent, les nœuds se “déplacent” visuellement entre la moelle du tronc et l’écorce. La coupe de z-mouvement Z_k pour $2 \leq$

1. verticille : groupe de nœuds répartis circulairement autour de la moelle à une même hauteur du tronc (exemple Fig. 2).

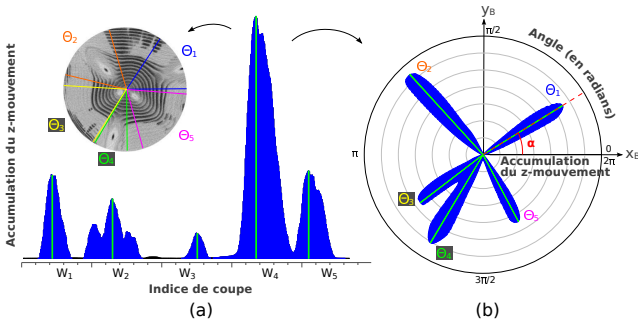


FIGURE 5 – Accumulateur de z-mouvement (a) par coupe et (b) par secteur angulaire. En (a), l’algorithme de détection d’intervalles permet d’obtenir l’ensemble des intervalles de coupes $(W_i)_{1 \leq i \leq 5}$ contenant un verticille. En (b), le même algorithme appliqué à W_4 détecte les intervalles angulaires $(\Theta_j)_{1 \leq j \leq 5}$. L’angle α correspond à la direction de s_α , segment orthogonal aux coupes tangentielles de la zone de nœud définie à partir de W_4 et Θ_1 (voir Sec. 4.1).

$k \leq K$ est calculée comme la différence absolue pixel-à-pixel de deux coupes consécutives :

$$Z_k = |S_k - S_{k-1}|$$

2.2 Zones de nœud

Une zone de nœud est un sous-domaine du tronc contenant un et un seul nœud. Deux étapes similaires basées sur l’analyse du z-mouvement sont nécessaires pour définir une zone de nœud. Elles utilisent toutes deux un accumulateur de z-mouvement [10] qui détecte les fortes densités de z-mouvement (voir Fig. 4).

Conformément à l’organisation verticillaire des nœuds, la première étape identifie les sous-ensembles W_i de coupes qui contiennent un verticille (voir étape ① sur la Fig. 4) à partir d’un accumulateur de z-mouvement calculé par coupe qui fournit la somme du z-mouvement présent sur chaque coupe Z_k (Fig. 5(a)). Les intervalles de coupes contenant un verticille sont localisés sur la représentation de l’accumulateur par un algorithme de détection d’intervalles (voir détails dans [10]).

La seconde étape est appliquée à chaque intervalle de coupes W_i (② Fig. 4). Elle requiert de connaître la position de la moelle sur chaque coupe. Les coupes sont divisées en secteurs angulaires centrés sur la moelle du tronc. Un accumulateur de z-mouvement par secteur angulaire fournit pour la somme du z-mouvement de chaque secteur sur l’ensemble des coupes de l’intervalle. Les intervalles Θ_j de secteurs angulaires contenant un nœud sont localisés par le même algorithme de détection d’intervalle qu’à la première étape (voir Fig. 5(b)).

Finalement, chaque zone de nœud obtenue, de forme similaire à l’étape ③ de la Fig. 4, contient un et un seul nœud. Elles seront la base de la segmentation tangentielle présentée dans la section suivante.

3 Aperçu de l’approche tangentielle

La segmentation tangentielle est construite sur une unique hypothèse : la section d’un nœud est circulaire sur tout

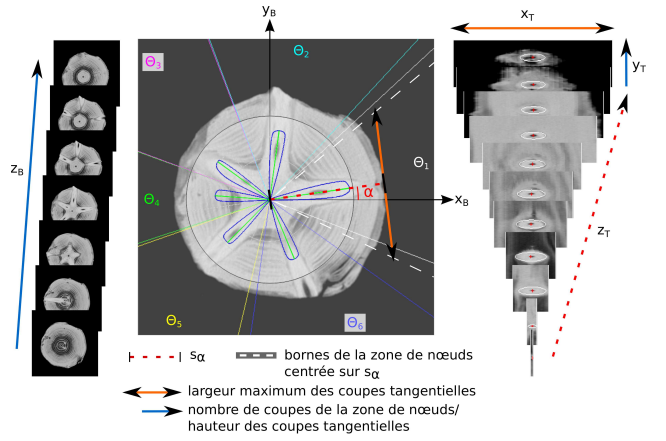


FIGURE 6 – Génération des coupes tangentielles. À gauche, un intervalle de coupes contenant un verticille. Au milieu, une coupe avec représentation de l’accumulateur de z-mouvement. Pour Θ_1 , s_α est représenté par des pointillés rouges. Il est orienté dans la direction du maximum d’accumulation. Les bornes initiales de Θ_1 (droites blanches) sont réorientées pour avoir s_α comme bissectrice. Les coupes tangentielles à droite sont générées suivant s_α avec une largeur croissante.

plan dirigé orthogonalement à la trajectoire de la moelle du nœud (voir Fig. 3). On notera que les déviations radiales des nœuds sont négligeables face aux déviations verticales. Chaque zone de nœuds est ainsi considérée comme une série $(T_l)_{1 \leq l \leq L}$ de coupes “tangentielles” aux cernes où les nœuds sont de forme elliptique (voir Fig. 6). Cette apparence elliptique découle de deux aspects : le rapport d’aspect d’un voxel et l’inclinaison verticale du nœud sur T_l . Ils sont combinés pour calculer le coefficient d’ellipticité τ du nœud pour chaque coupe tangentielle. Un profil d’accumulation elliptique de l’intensité (voir Sec. 6.2), basé sur τ , permet alors d’identifier le grand rayon de l’ellipse qui correspond au contour du nœud. Le calcul de τ est généralement difficile sur les coupes proches de la moelle du tronc et de l’écorce. Il est alors corrigé par extrapolation avant d’appliquer l’algorithme LOWESS [5] sur l’ensemble des coefficients d’ellipticité pour supprimer les ellipses aberrantes. Testé sur quelques exemples de nœuds dans [13], les sections suivantes proposent plusieurs améliorations pour généraliser le processus à plusieurs espèces d’arbres et l’automatiser pour des troncs complets.

4 Génération des coupes tangentielles

C’est la première étape de la segmentation des zones de nœuds. Elle génère l’ensemble (T_l) des coupes tangentielles aux cernes (voir Fig. 6).

4.1 Position et dimensions

L’ensemble des coupes tangentielles (T_l) de la zone de nœud doit être (1) dirigé, (2) positionné et (3) borné dans l’espace (O_B, x_B, y_B, z_B) du tronc (voir Fig. 6).

(1) **Direction.** Les coupes T_l sont positionnées orthogonalement à un segment noté s_α , perpendiculaire à l’axe z_B .

s_α est dirigé par un angle α correspondant à la direction du maximum de z-mouvement pour Θ_j (voir Θ_1 sur les Fig. 6 et Fig. 5(b)). α ne correspond pas à l'orientation de la bissectrice de Θ_j car le nœud n'est pas centré angulairement dans la zone de nœuds mais sur le maximum de z-mouvement de Θ_j . À l'inverse, l'amplitude de Θ_j est conservée (droites et pointillés blancs sur la Fig. 6).

(2) Position. Le segment s_α débute au niveau de la moelle et finit au niveau de l'écorce (en pointillés rouges sur la Fig. 6). Le point de départ de s_α est la position de la moelle sur la coupe du tronc correspondant au milieu de l'intervalle de coupes W_i . Pour déterminer la position de l'écorce, dernier point de la moelle du nœud, la première valeur plus petite que -900^2 est recherchée à partir du point de départ, dans la direction de s_α . Cette étape peut être simplifiée en utilisant le rayon de l'arbre calculé au cours de l'étape de localisation des zones de nœuds. La longueur de s_α est utilisée pour déterminer le nombre de coupes tangentielles.

(3) Dimensions. La hauteur et la largeur des coupes tangentielles sont fixées de manière différente. La hauteur le long de l'axe y_T est simplement le nombre de coupes de W_i (le long de z_B). La largeur le long de l'axe x_T n'est pas fixe mais augmente le long de s_α . Elle correspond à la distance entre les deux côtés de Θ_j , prise orthogonalement à s_α à la position de T_l . Cette distance est égale à 0 pour T_0 et augmente linéairement jusqu'à l'écorce (droite orange sur la Fig. 6).

4.2 Extraction des coupes tangentielles

Pour générer l'ensemble des coupes tangentielles (T_l) de la zone de nœuds, nous procédons coupe par coupe. Pour une coupe T_l , le processus consiste à chercher pour chaque pixel de coordonnées tangentielles (x_t, y_t) ses coordonnées (x_b, y_b, z_b) dans le repère du tronc. Trois rotations et deux translations sont appliquées à chaque coordonnée entière (x_t, y_t) de T_l . Les rotations permettent de se placer dans un plan orthogonal à s_α (étapes ① à ④ sur la Fig. 7). Les deux translations (étapes ⑤ et ⑥ sur la Fig. 7) permettent de positionner T_l dans le tronc. Les rotations et translations lors de la recherche de la position du pixel de coordonnées entières (x_t, y_t) génèrent des coordonnées décimales (x_b, y_b, z_b) . Une interpolation trilineaire est appliquée pour améliorer la qualité des images tangentielles et les étapes de segmentation suivantes.

5 Suivi de la moelle des nœuds

Le suivi de la moelle des nœuds est la première et la plus critique des étapes de la segmentation tangentielle des nœuds. Une localisation précise de la moelle garantit une meilleure détection du contour du nœud. La moelle est suivie à l'aide de l'algorithme de suivi de moelle des troncs de Boukadida et al. [4], modifié afin de permettre de suivre la moelle des nœuds.

Largeur des coupes tangentielles. La forme triangulaire des zones de nœuds garantit de travailler sur un unique

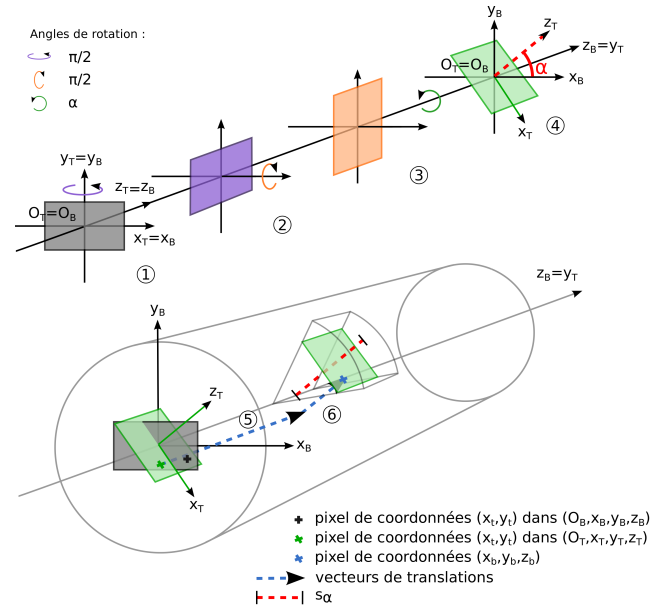


FIGURE 7 – Positionnement d'une coupe tangentielle T_l dans le système de coordonnées du tronc. Les coordonnées tangentielles utilisent (O_T, x_T, y_T, z_T) avec O_T au centre de T_l . Les rotations ① à ④ dirigent T_l suivant un plan orthogonal à s_α . Les étapes ⑤ et ⑥ traduisent T_l à sa position exacte dans (O_B, x_B, y_B, z_B) , sur z_B puis s_α .

nœud. En contrepartie, les coupes les plus proches de la moelle sont plus étroites et ne contiennent pas suffisamment d'information pour être segmentées précisément.

Extrapolation. Les premières coupes tangentielles contiennent nécessairement le début du nœud de très petit diamètre apparent. Ce petit diamètre complique la localisation précise de la position de la moelle. De même, quand le nœud atteint l'écorce, la circularité de l'arbre implique une diminution de la surface de tronc. Il devient alors difficile de différencier le contour du nœud par manque d'information. Pour ces deux raisons, une étape d'extrapolation de la moelle du nœud est ajoutée. Elle utilise la pente locale sur la première et la dernière coupe valide pour extrapoler la direction de la moelle du nœud sur les coupes invalides.

6 Segmentation tangentielle

La segmentation tangentielle est appliquée indépendamment à chaque zone de nœud W_i . Elle requiert :

- d'avoir généré l'ensemble des coupes tangentielles $(T_l)_{1 \leq l \leq L}$ de W_i (voir Sec. 4).
- de connaître la position de la moelle du nœud sur chaque coupe tangentielle T_l

Il s'agit de trouver, pour chaque coupe T_l , les paramètres de l'ellipse centrée sur la moelle qui délimite le nœud. Cela suppose que les sections apparentes des nœuds sont de forme circulaire sur des coupes orthogonales à la moelle du nœud. La segmentation s'effectue en trois étapes :

- Calcul du coefficient d'ellipticité
- Détection du grand rayon de l'ellipse
- Régression locale sur la série des rayons d'ellipses

2. -900 correspond à la densité minimale du bois sur l'échelle de Hounsfield où -1000 est la densité de l'air et 0 celle de l'eau.

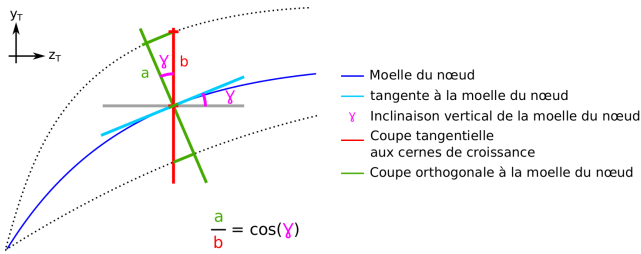


FIGURE 8 – Calcul du facteur d’inclinaison du coefficient d’ellipticité. Les ellipses seraient circulaires sur des coupes tangentes à la moelle (en vert).

À noter que les étapes A) et B) concernent chaque coupe T_l tandis que l’étape C) concerne l’ensemble des ellipses.

6.1 Calcul du coefficient d’ellipticité

Sur chaque coupe tangentielle T_l , le coefficient d’ellipticité τ de la section apparente du nœud est égal au ratio R_m/R_M avec R_m le petit rayon de l’ellipse (i.e. dans la direction de l’axe y_T) et R_M le grand rayon (i.e. dans la direction de l’axe x_T). Deux facteurs affectent τ :

(1) **Le rapport d’aspect d’un pixel** $w:h$ commun à toutes les coupes tangentielles. Il est directement déduit du rapport d’aspect d’un voxel du tronc. Les deux premières rotations (① à ③ Fig. 7) de la génération des coupes tangentielles impliquent un coefficient w égal à l’espace intercoupe du tronc : les rotations font correspondre y_T avec z_B . L’angle α de la dernière rotation (③ à ④) et le rapport d’aspect d’un pixel des coupes du tronc permettent de déterminer le coefficient h .

(2) **L’inclinaison verticale de la moelle** du nœud calculée localement à une coupe T_l fournit le second coefficient de τ , coefficient inversement proportionnel au cosinus de l’inclinaison verticale γ (voir Fig. 8). La direction est dite verticale en référence à l’axe z_B , et par conséquent à l’axe y_T (voir Fig. 6). Plus le nœud est incliné verticalement, plus R_m augmente. L’inclinaison γ est calculée à partir de la dérivée discrète locale de la position verticale de la moelle.

Le coefficient d’ellipticité τ est finalement calculé comme :

$$\tau = \frac{R_m}{R_M} = \frac{w}{h} \times \frac{1}{\cos(\gamma)}$$

6.2 Détection du grand rayon

Cette seconde étape consiste à rechercher le grand rayon de l’ellipse délimitant au plus près la section elliptique apparente du nœud pour une coupe T_l . Cela suppose de connaître la position de la moelle sur cette coupe et le coefficient d’ellipticité τ . L’ellipse cible est cherchée parmi l’ensemble des ellipses discrètes de coefficient τ centrées sur la moelle avec un grand rayon entier. Pour chaque ellipse E de cet ensemble, nous calculons la moyenne des valeurs d’intensité des pixels qui la composent. Ces pixels sont déterminés par l’algorithme du point médian [14]. Le profil Fig. 9.(a) représente la série des moyennes elliptiques de l’ensemble des ellipses.

Les profils obtenus (voir exemple Fig. 9.(a)) montrent une forme caractéristique récurrente permettant de discriminer

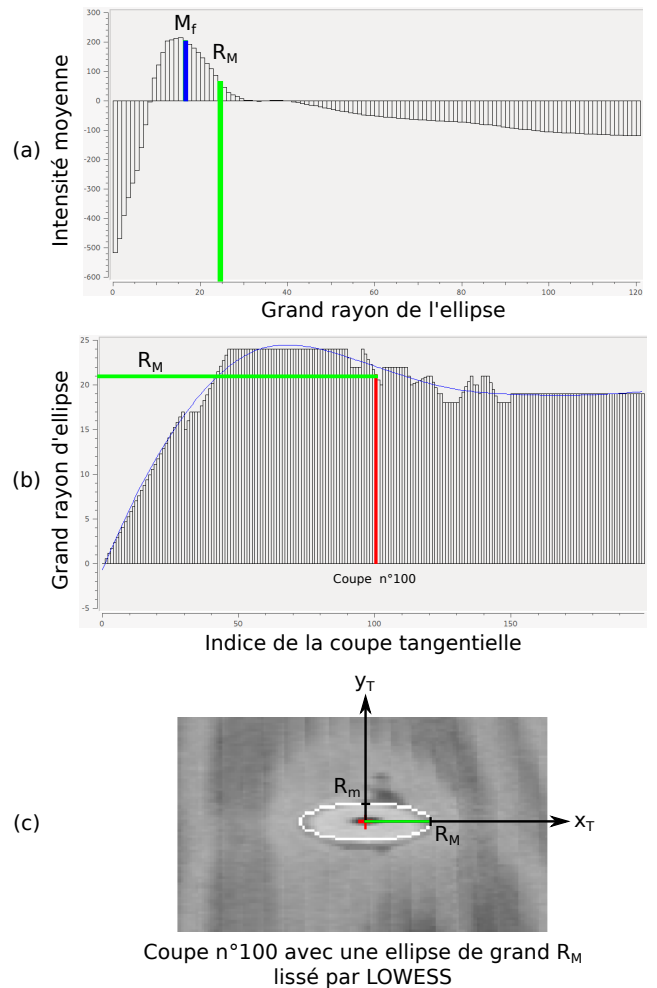


FIGURE 9 – Segmentation tangentielle dans une zone de nœuds. (a) représente, pour la coupe tangentielle (c), l’intensité moyenne des ellipses centrées sur la moelle pour un grand rayon de 0 à 120. Le grand rayon R_M est localisé à partir de M_f par analyse de la dérivée seconde. (b) représente R_M pour chaque coupes tangentielles avec en rouge celui de l’ellipse de la coupe (c). La courbe bleue représente les rayons R_M obtenu après regression. Sur (c), l’ellipse blanche est paramétrée avec le grand rayon R_M lissé.

le grand rayon R_M . Concrètement, le premier maximum M_f est identifié sur le profil. Si M_f se trouve localisé au-delà de la moitié du profil, il est ramené à la première valeur du profil. Ensuite la pente locale des valeurs suivant M_f est analysée itérativement pour localiser le rayon où la dérivée seconde devient positive. Cette position correspond alors à la valeur R_M de l’ellipse délimitant au mieux le nœud. Le petit rayon R_m se déduit de la formule $R_m = \tau \times R_M$.

6.3 Régression locale

La détection des R_M souffre des mêmes problèmes que la détection de la moelle : la largeur réduite des premières coupes et la faible proportion de bois sur les dernières coupes. Ces problèmes peuvent générer des rayons d’ellipses aberrants qu’il convient de détecter.

Un lissage étant sensible aux valeurs aberrantes, le choix s’est porté vers un algorithme de régression de la série des R_M : l’algorithme LOWESS [5]. LOWESS permet une ré-

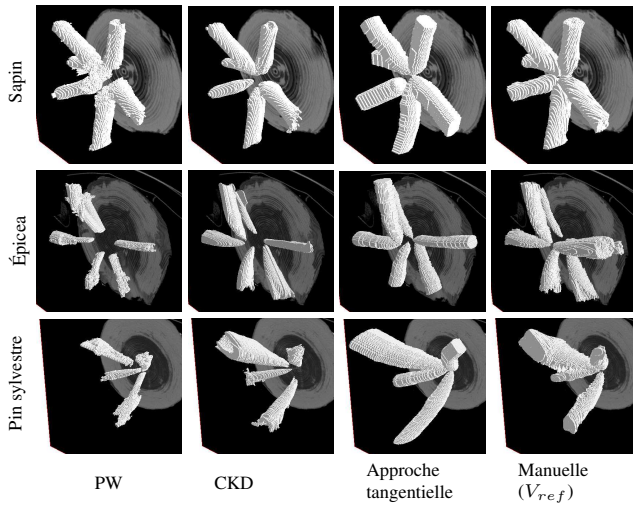


FIGURE 10 – Comparaisons des méthodes de segmentation PW, CKD et tangentielle, sur trois espèces d’arbres.

gression non linéaire en affectant à chaque point un polynôme de faible degré calculé sur un voisinage. La taille du voisinage est appelée paramètre de *bande passante* et peut être vue comme le degré de lissage de la courbe de régression. Pour être résistant aux valeurs aberrantes, LOWESS est appliqué deux fois en intercalant une interpolation des valeurs aberrantes basée sur une statistique inter-quartile calculée sur les résidus de la première courbe de régression. Le grand rayon R_M retenu est celui obtenu après la seconde régression.

7 Discussions et comparaisons

Deux aspects majeurs rendent la segmentation tangentielle des nœuds pertinente : le suivi de moelle dans l’aubier humide et le temps de calcul. Le suivi de moelle sur les coupes tangentielles est actuellement la méthode la plus précise pour déterminer la trajectoire des nœuds dans l’aubier humide. Dans [10], cette trajectoire est estimée par extrapolation de la courbure du nœud à la frontière duramen/aubier. Ici, le centre des nœuds est détecté avec une précision bien supérieure. La contrainte elliptique appliquée ensuite autour de la moelle est un processus de détection robuste du contour du nœud. Concernant le temps de calcul, il se situe autour de la seconde pour un verticille, sans aucune parallélisation. C’est un aspect prépondérant pour inclure cette segmentation dans le processus de découpe du bois des scieries.

La méthode est intégralement implémentée dans le logiciel libre TKDetection [9] disponible sur le web. Il a permis de tester et valider notre méthode avec d’autres échantillons de bois. Une reconstruction 3D obtenue par segmentation tangentielle est comparée aux algorithmes Power Watershed et CKD sur la Fig. 10. Les artefacts visibles avec ces deux dernières méthodes disparaissent avec la segmentation tangentielle. Les premières expérimentations montrent de bons résultats comparativement à CKD (voir Fig. 10) où des améliorations significatives sont obtenues sur le volume des nœuds. Le tableau 1 montre le ratio de l’erreur absolue entre le volumes discret de référence V_{ref} et celui

	V_{seg}			V_{ref}
	PW	CKD	tangentielle	Manuelle
Sapin	0.292	0.506	0.107	0.0
Épicéa	0.740	0.460	0.113	0.0
Pin sylvestre	0.716	0.445	0.432	0.0
temps	43,87s	4,81s	1s	—

TABLE 1 – Taux d’erreur des volumes V_{seg} par rapport aux volumes V_{ref} , avec temps de calcul des segmentations.

de la segmentation V_{seg} . Le ratio est donné par :

$$E_{vol} = \frac{|V_{ref} - V_{seg}|}{V_{ref}}$$

En moyenne, sur les trois espèces, la segmentation tangentielle améliore de 25% les résultats par rapport à CKD et est environ cinq fois plus rapide.

8 Conclusion

Cet article propose une méthode automatique de segmentation des nœuds de troncs contenant de l’aubier humide. Rapide et précise, elle combine et améliore des idées issues de [10] et [13]. L’algorithme est implémenté dans le logiciel libre TKDetection [9]. Les premières expérimentations réalisées avec TKDetection montrent de très bons résultats au regard des attentes des biologistes et des industriels. LA segmentation tangentielle est la plus proches d’une segmentation manuelle. Des expérimentations seront menées sur un échantillon de troncs plus large avec une analyse plus détaillée des mesures géométriques.

Remerciements

Nous souhaitons remercier les auteurs de **DGtal** [1] qui a permis de générer de nombreuses illustrations 3D.

Références

- [1] DGtal : Digital geometry tools and algorithms library, 2011. <http://libdgta1.org>.
- [2] AGUILERA, C., SANCHEZ, R., AND BARADIT, E. Detection of knots using x-ray tomographies and deformable contours with simulated annealing. *Wood Res.* 53 (2008), 57–66.
- [3] ANDREU, J.-P., AND RINNHOFFER, A. Modeling knot geometry in norway spruce from industrial ct images. In *SCIA 2003* (2003), vol. 2749 of *LNCS*, pp. 786–791.
- [4] BOUKADIDA, H., LONGUETAUD, F., COLIN, F., FREYBURGER, C., CONSTANT, T., LEBAN, J.-M., AND MOTHE, F. Pithextract : a robust algorithm for pith detection in computer tomography images of wood - application to 125 logs from 17 tree species. *COMPAG* 85 (2012), 90–98.
- [5] CLEVELAND, W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association* 74 (1979), 829–836.

- [6] COUPRIE, C., GRADY, L., NAJMAN, L., AND TALBOT, H. The power watershed algorithm c/c++ code. <http://sourceforge.net/projects/powerwatershed/>.
- [7] COUPRIE, C., GRADY, L., NAJMAN, L., AND TALBOT, H. Power watersheds : A unifying graph-based optimization framework. *IEEE PAMI* 33, 7 (2010), 1384–1399.
- [8] KERAUTRET, B., AND LACHAUD, J.-O. Curvature estimation along noisy digital contours by approximate global optimization. *PR* 42, 10 (2009), 2265–2278.
- [9] KRÄHENBÜHL, A. TKDetection. <https://github.com/akrah/TKDetection/>, 2012.
- [10] KRÄHENBÜHL, A., KERAUTRET, B., AND DEBLED-RENNESON, I. Knot segmentation in noisy 3d images of wood. In *DGCI 2013, Sevilla, Spain* (2013), vol. 7749 of *LNCS*, pp. 383–394.
- [11] KRÄHENBÜHL, A., KERAUTRET, B., DEBLED-RENNESON, I., LONGUETAUD, F., AND MOTHE, F. Knot detection in x-ray ct images of wood. In *ISVC* (2012), vol. 7432 of *LNCS*, pp. 209–218.
- [12] NORDMARK, U. *Value Recovery and Production Control in the Forestry-wood Chain Using Simulation Technique*. PhD thesis, Luleå University, 2005.
- [13] ROUSSEL, J.-R., MOTHE, F., KRÄHENBÜHL, A., KERAUTRET, B., DEBLED-RENNESON, I., AND LONGUETAUD, F. Automatic knot segmentation in CT images of wet softwood logs using a tangential approach. *Accepté à COMPAG*.
- [14] VAN AKEN, J. An efficient ellipse-drawing algorithm. *IEEE CGA* 4 (1984), 24–35.