

AMÉLIORATION DE L'INTERPRÉTATION DES DONNÉES FOURNIES PAR LE RÉSISTOGAPHE POUR LA GESTION D'ARBRES D'ALIGNEMENT

1. LE CAS DU TILLEUL

**BRUNO CAMPANELLA,
ROGER PAUL**

Laboratoire de Toxicologie
environnementale,
FUSAGx. 2a Av. de la Faculté,
BE-5030 Gembloux,
Belgique.

**ANDRÉ TOUSSAINT, JEAN-
PIERRE BAUDOIN,**

Unité de Phytotechnie tropicale
et d'Horticulture, FUSAGx. 2
Passage des Déportés,
BE-5030 Gembloux,
Belgique.

Photos :
Les auteurs

Dans le cadre de recherches menées sur la gestion des tailles de tilleuls (*Tilia x europea* L.) et sur les possibilités de traitements de revitalisation, le résistographe (IML Rési - F400) est utilisé comme outil de complément de diagnostic de stabilité. L'interprétation des graphiques «amplitude en fonction de la profondeur sondée» peut fournir plus d'information que la seule confirmation et mesure des cavités internes. Des mesures systématiques ont été réalisées dans 50 arbres présentant ou non des signes extérieurs d'affaiblissement. Il est ainsi possible de déduire une courbe de résistance moyenne pour l'alignement d'arbres et de comparer les réponses individuelles à cette moyenne. Plusieurs phénomènes deviennent, dès lors, quantifiables. Il s'agit de la variation, entre individus, de la densité moyenne, de l'homogénéité de la qualité du bois sur la profondeur sondée ainsi que la présence de certains affaiblissements locaux. En outre, la nécessité d'apporter une correction de la mesure, lorsqu'une cavité est traversée, est apparue. Une méthode de correction du signal est proposée. Parmi l'ensemble des moyens de diagnostic de la vitalité de l'arbre, les données de résistance mécanique présentent l'avantage d'une intégration sur l'histoire récente de l'arbre. Cette technique, par contre, occasionne une rupture des barrières que l'arbre a développées pour contenir les pourritures présentes dans les cavités. Des recherches visant à réduire ces risques doivent donc être poursuivies. Il est également nécessaire de mieux connaître les liens existant entre l'amplitude mesurée et les paramètres mécaniques du bois.

Mots-clés : résistographe, diagnostic, arboriculture, *Tilia*,

Introduction

Des travaux de recherche ont été financés en 2002 par la Région wallonne (Belgique) de manière à mieux appréhender la gestion du patrimoine que constituent les arbres d'alignement. Différentes études ont été menées sur les tilleuls composant la drève de Chèvequeue, longue de 1,2 km et située à Walhain en Brabant wallon. L'alignement double est composé de 280 tilleuls (*Tilia x europea* L.) dont les sujets les plus âgés ont 80 ans. L'angle d'insertion de certaines branches charpentières ainsi que des plaies

visibles sont les traces d'un élagage ancien très sévère. Durant l'hiver 1992-1993, ces arbres ont subi un nouveau ravalement qui les a totalement déstructurés. De nombreux reperelements sont apparus à l'image de balais de sorcière (TOUSSAINT *et al.*, 2002). Une des études mises en place est centrée sur les suites à apporter aux tailles radicales. L'objectif de cette partie est double : (i) analyser les réactions morfo-physiologiques des arbres suite à la taille radicale et effectuer un diagnostic de stabilité de leur structure et (ii) fournir une proposition de plan de taille aux gestionnaires communaux en fonction de ce diagnostic.

C'est dans le cadre de la démarche du diagnostic de stabilité que s'inscrit cette étude sur le résistographe. Le diagnostic comprend plusieurs étapes et plusieurs niveaux d'investigation. La première phase consiste en un examen visuel de l'arbre, de son architecture, de ses blessures et de ses points de faiblesses (cavités, fissures, déformations, carpophores de pourridiés) (MATTHECK et BETGHE, 1993). Dans un deuxième temps, et en fonction des signes extérieurs, il s'agit de quantifier de la manière la plus précise possible l'extension des zones de bois amorphe ainsi que la résistance mécanique résiduelle à la base du tronc ou de la branche charpentière.

Différentes techniques relativement récentes ont été présentées pour ce faire (MOORE, 1998). L'auteur recommande, à juste titre, d'utiliser dans un premier temps les outils les moins perturbants, tels que le marteau à impulsion. Le résistographe peut être également utilisé à ce niveau, bien que la mesure soit destructive. Ces deux techniques (marteau à impulsion et résistographe IML 1410) ont été comparées dans le diagnostic de la dégradation de coupes d'épicéas (*Picea abies* L. KARST.) attaqués par une pourriture rouge (GRUBER, 2001). L'auteur conclut de ses observations que le marteau à impulsion fournit une localisation des zones atteintes sur l'ensemble du plan de coupe, mais de manière moins précise que ce que permet le résistographe sur un rayon. L'utilisation d'une mesure intrusive n'est pas sans risque pour l'arbre puisqu'il est possible, par le percement, de faciliter l'extension de champignons parasites. Il est donc important d'utiliser cette technique à bon escient et de tirer un maximum de profit des mesures obtenues. Dans certains cas, une troisième étape est nécessaire pour quantifier précisément la densité et la résistance du bois (fractométrie, densitométrie aux rayons X, etc.). Il est alors indispensable d'utiliser une tarière et de prélever une carotte de bois. Les dégâts sont d'autant plus importants.

Le résistographe a été comparé à une mesure de densitométrie aux rayons X sur deux espèces de pins et d'eucalyptus (*Pinus radiata* D. Don et *caribaea* Morlet ; *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake et *globulus* Labill.) (GANTZ, 2002). La corrélation entre la mesure au résistographe et la densité est comprise entre 0,30 et 0,78 selon l'espèce. La facilité d'utilisation de l'appareil amène l'auteur à penser que des recherches doivent être poursuivies, notamment dans la mesure précoce de la densité du bois comme outil de sélection génétique. De même, une bonne corrélation entre la mesure des densités verticales effectuée sur différents types de panneaux composites en bois par le résistographe et les rayons X a été observée (WINISTORFER *et al.*, 1995). En comparant ces techniques sur des *Pseudotsuga* de 25 ans, on a calculé un coefficient de corrélation de 0,93 entre les deux méthodes de mesure de la densité moyenne du profil (CHANTRE et ROZENBERG, 1997).

D'autres auteurs ont évalué une diversité de méthodes pour mesurer la résistance mécanique de piles de pont en bois (EMERSON *et al.*, 1999). Ils concluent que la mesure au résistographe doit permettre de déduire le moment d'élasticité de la poutre. Dans le cadre du diagnostic de stabilité, ce lien entre la mesure et les paramètres mécaniques du bois est essentiel. Les caractéristiques mécaniques du bois sont, en partie, liées à sa densité. Des chercheurs ont observé une bonne corrélation ($R^2 > 0,80$) entre la densité d'échantillons de bois sec et la moyenne de l'amplitude mesurée (RINN *et al.*, 1996).

Il est donc possible, moyennant certaines corrections, d'affiner l'estimation de la résistance mécanique du bois sur base de mesures au résistographe et de caractéristiques de l'essence. Une telle démarche de correction des mesures a été appliquée par Gantz (2002) dans son étude de jeunes sujets (moins de 10 ans). L'appareil utilisé était un IML Rési B-400. Les arbres étant de diamètre réduit, le résistogramme comprend à la fois l'entrée et la sortie du bois. La différence d'amplitude entre ces deux points, considérée comme un bruit de fond, est soustraite de la mesure. Le point situé à mi-distance entre l'entrée et la sortie du bois est considéré comme le bois de cœur. L'auteur compare ensuite les profils mesurés par rayons X et par le résistographe en fonction de la distance depuis le cœur. Il déduit du calcul de corrélation que 10 à 60% seulement de la densité du bois est réellement mesurée sur le résistogramme. Plusieurs raisons pourraient, selon l'auteur, expliquer la difficulté de corréler amplitude et densité : (i) les deux mesures ne sont pas effectuées exactement sur le même rayon dans le bois ; (ii) la mesure au résistographe est réalisée sur l'arbre alors que la mesure de densité est effectuée sur des échantillons de bois séchés ; (iii) l'aiguille du résistographe ne suit pas toujours une trajectoire rectiligne. Il est donc nécessaire d'améliorer l'estimation de la résistance mécanique du bois (RINN *et al.*, 1996).

En pratique, pour les arbres sur pied, on est souvent amené à décider si une mesure est fiable ou pas, si une anomalie est importante ou insignifiante. Seules l'expérience et l'accumulation des observations permettent actuellement de trouver des points de repère utiles à la décision. L'interprétation des résistogrammes est donc encore en partie subjective et liée à l'expérience du praticien, surtout dans les cas tangents. En effet, la littérature fournit très peu de points de comparaison en matière de résistogrammes. La société IML (Instrumenta

Mechanik Labor GmbH, Wielsoch, Allemagne) a publié des synthèses concernant *Tilia platyphyllos* Scop. et *Tilia tomentosa* Moench. Celles-ci reprennent, entre autres, des données physiques, physiologiques et écologiques, un inventaire des maladies et des exemples de résistogrammes. Sur ces derniers, les zones amorphes sont pointées. Ces quelques courbes ne peuvent, pour autant, fournir un point de référence pour notre cas de Walhain. Certains auteurs insistent, d'ailleurs, sur la nécessité d'établir des résistogrammes de référence par espèce, par région et par peuplement (HELMS et NIEMZ, 1993).

Pour améliorer l'interprétation des données, nous avons effectué de nombreuses comparaisons entre résistogrammes et observations de la coupe leur correspondant. Deux objectifs principaux ont été définis. D'une part, il s'agit d'identifier une méthode de description objective des résistogrammes et de définir des points de repère fiables. D'autre part, une méthode de correction du signal devant permettre, *in fine*, de relier celui-ci à la densité du bois sur pied est proposée.

Matériel et méthodes

Il n'est pas toujours simple de faire la distinction entre une réelle cavité et une zone d'affaiblissement du bois, quelle qu'en soit la cause. Dans la suite du texte, on distinguera 3 types de bois : amorphe, affaibli et sain. Un bois amorphe ne contribue pas à la résistance mécanique et à la stabilité de l'ensemble car il ne possède plus de structure continue des fibres. Par extension, une cavité vide est considérée comme une zone amorphe. Un bois affaibli, par contre, présente encore une structure et assure donc encore un rôle de soutien, bien que réduit. Une zone saine, par définition, est structurée et présente une résistance mécanique. Celle-ci peut, toutefois, être variable d'un individu à l'autre.

Technique de mesure

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un résistographe RESI F-400S de IML GmbH (WIESLOCH, Allemagne). L'appareil mesure la puissance nécessaire pour faire pénétrer l'aiguille perforante dans le bois, et ce, tous les dixièmes de millimètre. Cette puissance est exprimée sur les graphiques en terme d'amplitude (0 à 100) et ne donne donc qu'une valeur relative. Aucune procédure d'étalonnage n'est prévue pour l'appareil, mais deux positions d'utilisation existent en fonction de la dureté spécifique du bois. Cela permet de fixer la mesure dans une gamme d'amplitude de 0 à 100. Le tilleul étant un bois tendre, l'appareil est réglé en position 1. Le diamètre de l'extrémité de l'aiguille est de 3 mm. La vitesse d'avancement de l'aiguille est fixée à 30 cm/min. La profondeur maximale de sondage de l'appareil est de 38 cm. Cette mesure entraînant également une rupture localisée de la barrière formée par l'arbre contre l'infection (SHIGO, 1991), le risque d'extension des parasites doit être pris en compte. Pour ce faire, chaque trou a été rebouché par un tige de bois désinfectée pour éviter l'intrusion d'insectes. De plus, après chaque mesure, l'aiguille est enduite de graisse de silicone contenant 1% de carbendazim (fongicide systémique). Ces deux mesures de précaution ne représentent pas encore actuellement une assurance contre le développement d'un éventuel problème par la suite. Néanmoins, il s'agit de la meilleure technique testée pour l'instant.

Une première manière d'utiliser cet appareil dans le cas d'arbres sur pied consiste à faire 3 mesures autour de la base du tronc, à 120° d'écart. Il est ainsi possible de déterminer la présence de grandes cavités à un niveau où l'arbre est sensé subir le maximum de contraintes mécaniques en cas de grands vents. La mesure est réalisée, selon les cas, horizontalement ou selon un angle de 45° par rapport au sol. Cette dernière méthode a été utilisée pour tous les arbres présentant des défauts extérieurs visibles, dans le cadre d'une approche de diagnostic courante. Des mesures systématiques ont également été réalisées à 1 mètre du sol pour

étudier la variabilité de la densité du bois entre individus. Elles ont été réalisées à 120° d'écart, aux mêmes niveaux que les mesures prises au pied et à l'horizontale. Enfin, des observations ont été faites sur les branches charpentières, au niveau des anciennes plaies de taille, pour étudier la solidité de l'insertion des rebranchements. En effet, la grande majorité des extrémités présentent actuellement une cavité visible du dessus, mais dont l'extension en profondeur est difficile à déterminer.

Calcul de la courbe d'amplitude moyenne et classement des individus

L'objectif de la mesure systématique est de déterminer une courbe moyenne, valable pour les tilleuls de la drève étudiée et de pouvoir comparer les observations par rapport à cette moyenne. Pour le calcul, toutes les mesures ne présentant pas d'hétérogénéité marquée ont donc été regroupées. Moyenne, écart-type et intervalle de confiance autour de la moyenne ont été calculés tous les dixièmes de millimètre. L'évolution de la courbe moyenne intègre celle du bruit de fond, qui n'a pas été retranché. En effet, contrairement aux travaux réalisés sur des sujets de 10 ans par Gantz (2002), le diamètre des tilleuls étudiés ici est généralement supérieur à la limite permise par le résistographe. Il n'est donc pas possible de calculer la pente d'une droite joignant l'amplitude en entrée et en sortie du tronc. Par rapport à la courbe moyenne, deux seuils ont été définis de manière à classer les individus et à identifier ceux qui présentent une amplitude particulièrement grande ou faible. Les résistogrammes sont considérés comme proches de la moyenne s'ils sont dans un intervalle de +/- 5 unités d'amplitude. Entre 5 et 20 unités, ils sont différents et au-delà de 20 unités, ils sont fortement différents. De manière à permettre la comparaison entre espèces, des mesures ont également été réalisées à 1 m de la base sur marronnier (*Aesculus hypocastanum* L.) et Paulownia (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.).

Quantification d'un affaiblissement local du bois

De nombreuses comparaisons ont été effectuées entre résistogrammes et observations en coupe correspondantes. Elles permettent d'étudier la qualité de la traduction par le résistographe de la présence de zones amorphes ou affaiblies. Sur le résistogramme, il est évident que la distinction entre les types de bois doit être faite en fonction de l'importance de la chute d'amplitude mesurée. Néanmoins, il faut également tenir compte de l'augmentation du bruit de fond et des caractéristiques spécifiques de densité moyenne. La perte relative d'amplitude (PRA) a donc été calculée par rapport à la valeur de la courbe moyenne, en chaque point, selon l'équation 1 :

Equ. 1 :

$$PRA = \frac{(Amplitude\ moyenne - Amplitude\ mesurée)}{Amplitude\ moyenne}$$

Le fait de multiplier cette différence relative par 100 permet d'utiliser une même échelle que pour l'amplitude mesurée et de présenter les deux courbes sur le même graphique.

Interprétation du signal en présence de cavités

Des cavités (au sens strict) sont présentes au niveau des anciennes plaies de tailles sur la majorité des tilleuls étudiés. C'est surtout le cas lorsque la branche coupée voici 10 ans était de section importante. De nombreux rejets sont insérés autour ou sous le bourrelet de croissance. Des mesures ont été effectuées à différents niveaux sous l'insertion des rejets, perpendiculairement à une extrémité de charpentièrre (0, -5, -10, -15, -20 et -25 cm par rapport à l'ancienne plaie de taille). Pour mettre en relation le résistogramme et l'importance de la dégradation du bois, des observations comparatives ont été réalisées en coupe longitudinale. Sur ce matériel, il a été possible de localiser précisément les transitions entre les différentes zones de bois. C'est sur base de ces observations que la méthode de correction du signal a été mise au point.

Distinction entre les 3 types de bois et validation des seuils

Deux seuils de PRA ont été définis pour distinguer les trois types de bois de manière objective sur un résistogramme. Ces deux seuils permettent de localiser sur le résistogramme les limites (en mm) des 3 types de zones. La validité des seuils et de la méthode de correction proposée a été vérifiée par la correspondance entre les limites calculées de zones de bois et l'observation macroscopique des coupes. Les échantillons utilisés ont été prélevés sur un tilleul présentant un état de dépérissement avancé. Un pourridié a été mis en évidence au pied du tronc : *Ganoderma applanatum*. Des mesures au résistographe ont été réalisées, à 120° d'écart à la base du tronc et verticalement (tous les 20 cm jusqu'à 1m). Ces mesures ont montré que la stabilité de l'arbre était compromise à moyen terme et son abattage préventif a été recommandé. A cette occasion, des coupes transversales du tronc ont été effectuées depuis la base jusqu'à une hauteur de 80 cm, tous les 12 cm environ. Ces échantillons ont été utilisés pour comparer les mesures au résistographe et les observations en coupe. Le résistogramme corrigé a été utilisé pour localiser les limites des zones saines, affaiblies ou amorphes. Ces limites ont ensuite été reportées sur la pièce de bois et le pourcentage de correspondance a été calculé.

Résultats et discussion

Il ne serait pas exact de considérer l'amplitude mesurée par le résistographe comme correspondant à la densité ou la résistance mécanique du bois dans le cas d'arbres en place. L'appareil ne peut donc actuellement fournir une information quantitative suffisante pour calculer le niveau de stabilité d'un arbre. Même en se limitant à une utilisation qualitative des résistogrammes, leur interprétation n'est pas toujours claire et indiscutable. Deux exemples de mesures réalisées sur la drève illustrent cette difficulté (figures 1 et 2).

La figure 1 présente deux mesures effectuées à la base et à un mètre sur un même tilleul (S90). Entre 20 et 150 mm, la résistance du bois semble correcte à un mètre, mais défectueuse à la base de l'arbre. La zone amorphe de la base est clairement identifiable. Par contre, il est moins aisé de dire quelle est la résistance du bois traversé après 320 mm, sur ces deux mesures. Si on considère que le bois est sain à un mètre, doit-il servir de point de comparaison pour quantifier l'affaiblissement à la base ?

La figure 2 suscite d'autres questions qui peuvent se poser en présence d'une zone amorphe. La limite des cavités est très claire dans les deux cas : 230 mm (S12) et 240 mm (S02). Néanmoins, à quoi correspondent les deux minima qui entourent le pic à 130 mm, sur l'arbre S02 ? S'agit-il d'un nœud inclus dans du bois sain ou d'une barrière particulièrement dense entourée de bois affaibli ? Le tilleul S12 présente une cavité nette, mais comment expliquer la baisse d'amplitude mesurée à 340 mm ?

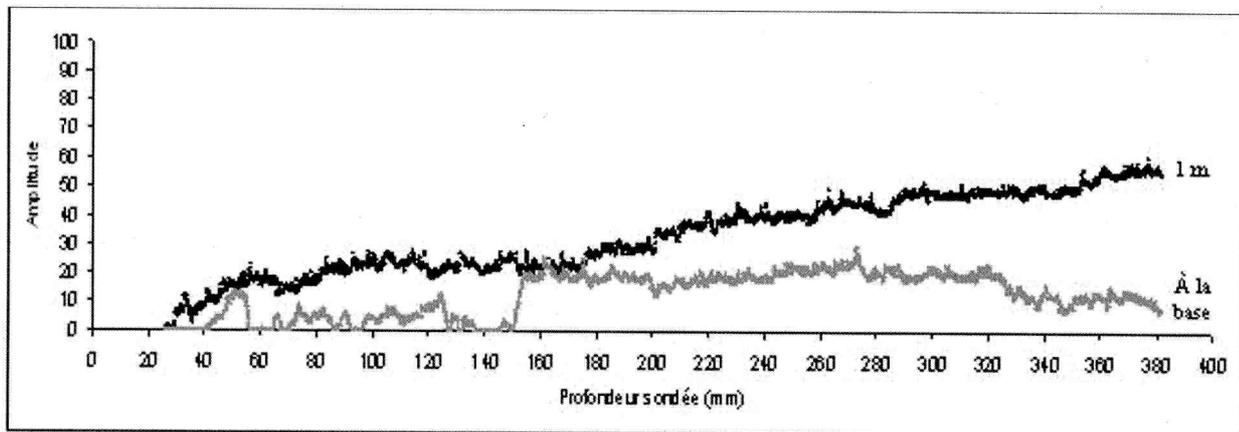


Figure 1
Mesures au résistographe (F-400S) prises sur un tilleul de Walhain (S90) à la base et à 1 m.

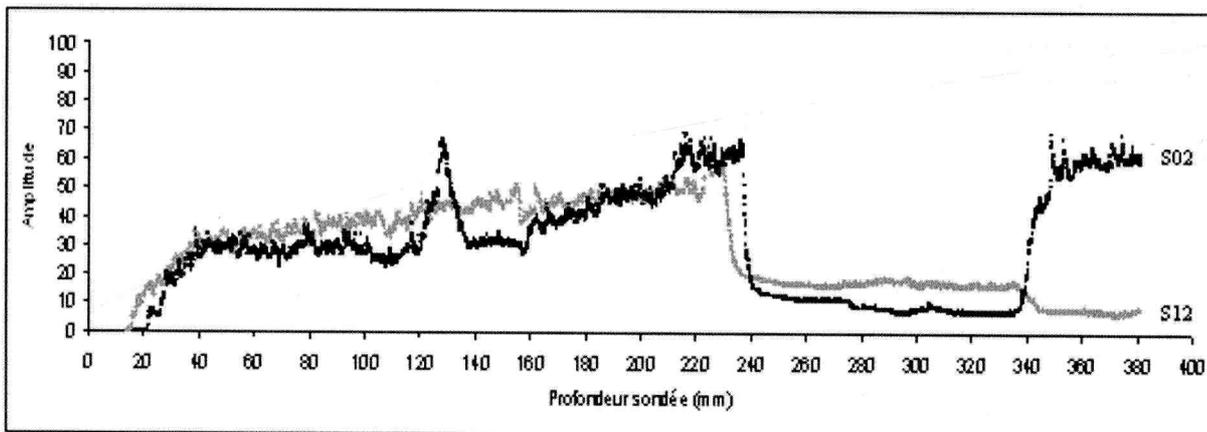


Figure 2
Mesures au résistographe (F-400S) prises sur deux tilleuls de Walhain (S02 et S12) à 1 m.

Calcul d'une courbe moyenne sur un peuplement

Sur l'ensemble des 148 mesures réalisées sur tilleul à 1m de la base, 98 ne présentent pas de discontinuité importante (augmentation ou diminution). Le calcul de la moyenne a donc été réalisé sur base de ces 98 séries de données. L'intervalle de confiance autour de la moyenne est régulier sur les 38 cm (+/- 1%). La courbe présente, une fois l'écorce franchie, une augmentation linéaire de l'amplitude avec la profondeur sondée. Cette augmentation traduit le bruit de fond, dû à l'avancement de l'aiguille et aux caractéristiques spécifiques du bois (HELMS et NIEMZ, 1993). Les causes ou explications concernant la variabilité qui peut exister dans l'allure de la courbe moyenne entre espèces, variétés, voire peuplements sont peu connues. Comme le montre la figure 3, les marronniers et les tilleuls étudiés fournissent une courbe moyenne très proche. Par contre, le Paulownia, également un arbre à bois tendre, présente une amplitude moyenne plus faible. La pente due au bruit de fond est également inférieure.

Gantz (2002) a mesuré l'amplitude moyenne sur 4 espèces, à chaque fois représentées par 3 populations d'une dizaine d'arbres. Ces résultats sont synthétisés dans le tableau 1. Les différences ne sont pas importantes entre populations, mais notables entre espèces.

L'interprétation de résistogrammes est donc encore plus ardue lorsque l'on tente de comparer des mesures prises sur des essences différentes. Le calcul de la PRA pourrait faciliter ces comparaisons, puisqu'elle est calculée par rapport à une moyenne spécifique.

Tableau 1 : amplitudes moyennes mesurées à 1,30 m sur 4 espèces (GANTZ, 2002).

	Population 1	N	Population 2	N	Population 3	N
<i>Pinus radiata</i>	14,40 +/- 1,25	464	14,50 +/- 0,93	401	14,91 +/- 1,33	81
<i>Pinus caribaea</i>	21,36 +/- 3,17	233	21,24 +/- 3,28	80	23,05 +/- 4,33	229
<i>Eucalyptus globulus</i>	19,27 +/- 1,66	80	18,88 +/- 1,61	79	22,28 +/- 2,13	270
<i>Eucalyptus urophylla</i>	25,28 +/- 3,22	89	24,26 +/- 2,79	89	25,49 +/- 2,71	238

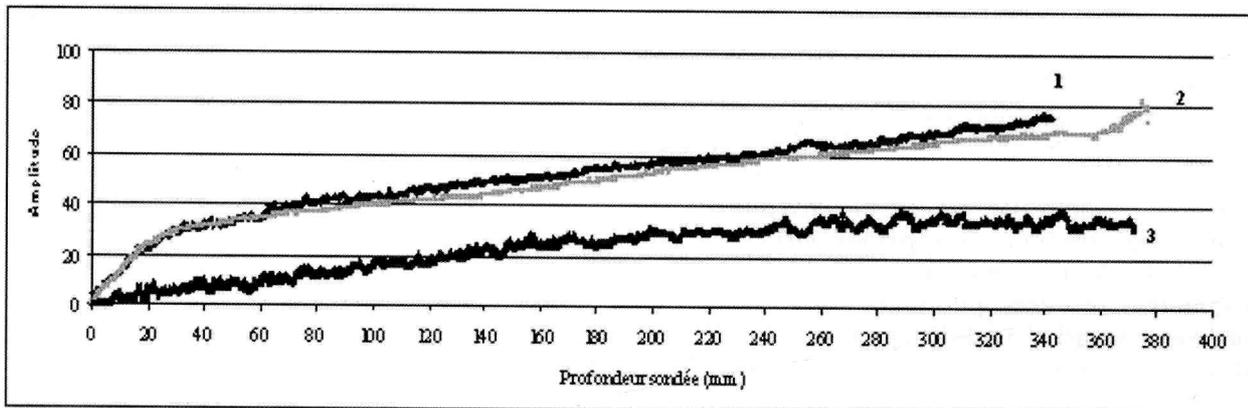


Figure 3
Courbes moyennes d'amplitude en fonction de la profondeur sondée sur le marronnier (1 ; n=28), le tilleul (2 ; n=98) et le paulownia (3 ; n=12). Mesure effectuée à 1m du sol.

Illustration du classement de résistance

Il est possible de comparer l'amplitude globale d'un résistogramme donné par rapport à la moyenne. La figure 4 montre trois mesures réalisées sur les arbres N11, N14 et S18 de la drève de Walhain. Aucun de ces trois résistogrammes ne présente de zone particulièrement affaiblie. D'un point de vue diagnostic de stabilité, aucune de ces mesures n'est donc inquiétante. Par contre, il est manifeste que la mesure N11 est systématiquement inférieure à la moyenne. La mesure N14 suit parfaitement celle-ci et la mesure S18 est largement supérieure. Trois mesures ont été réalisées par arbre, et une certaine variabilité est observée au niveau de chaque sujet. D'un arbre à l'autre, des différences d'amplitude sont également mesurables. La classification de ces arbres pourrait présenter un intérêt en complétant d'autres observations (vigueur de la croissance mesurée les dernières années, architecture de la couronne, sensibilité aux pathogènes, etc.). Si l'allure du résistogramme fournit déjà une donnée qualitative, d'autres informations peuvent être déduites des variations de l'amplitude. Celles-ci sont divisibles en trois niveaux, au moins :

- D'une part, le signal varie de manière périodique autour d'une tendance. Ces variations peuvent être, pour le bois le plus externe, mises en relation avec les limites des cernes d'accroissement. Elles sont dues à l'alternance entre bois d'hiver et bois de printemps (CHANTRE et ROZENBERG, 1997; GANTZ, 2002; RINN *et al.*, 1996). D'un sujet à l'autre et même d'une zone sondée à l'autre, l'amplitude de ces variations peut être différente. L'angle d'attaque influence fortement la façon dont le résistographe traduit la traversée des cernes successifs (RINN *et al.*, 1996).

- Le résistogramme présente parfois des transitions sans pour autant que l'aiguille passe d'une zone saine à une zone affaiblie. Il s'agit de paliers, séparés par une augmentation locale de l'amplitude mesurée. Sur certains résistogrammes, ces paliers sont très nets (figure 5). Leur signification en terme de physiologie de la croissance de l'arbre n'est pas encore éclaircie. L'observation de coupes transversales n'a pas apporté de réponse claire. Dans quelques cas, la transition correspond à un cerne d'accroissement. Le plus souvent, elle ne correspond à aucune particularité sur la coupe.
- Des variations plus importantes et moins régulières sont généralement associées avec la présence d'un affaiblissement du bois. Elles reflètent l'alternance de zones de dureté différentes et peuvent s'additionner à la variation due aux cernes.

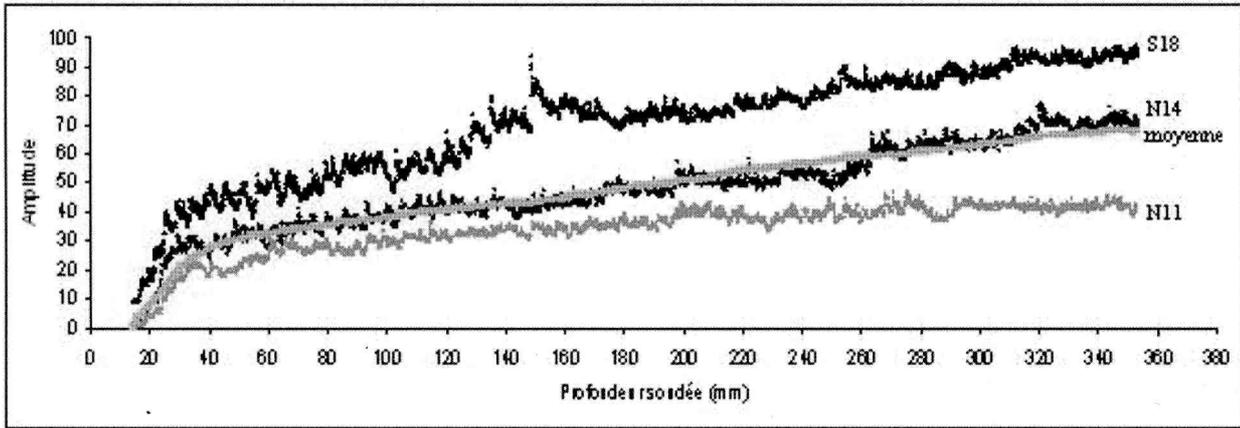


Figure 4
Variabilité de l'amplitude globale de 3 mesures (tilleuls S18, N14 et N11) autour de la courbe moyenne.

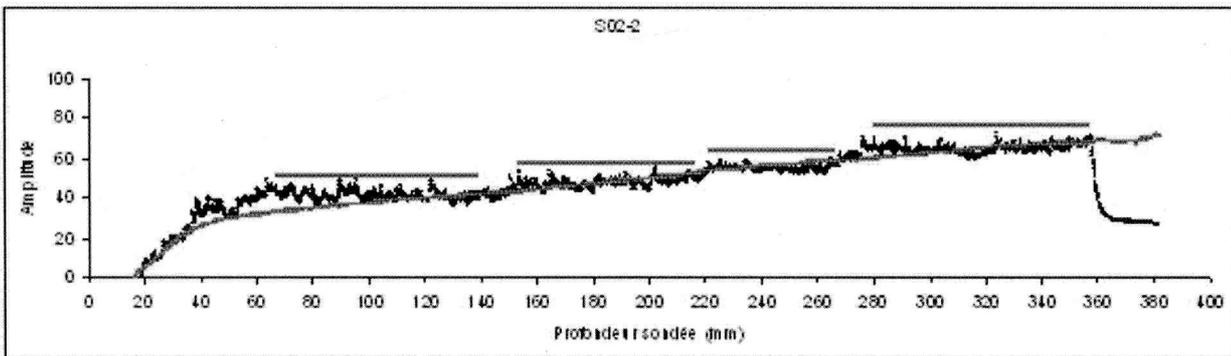


Figure 5
Mesure au résistographe sur le tilleul S02
présentant une cavité et 4 paliers (ligne rouge), en comparaison avec la courbe moyenne.

Interprétation et correction du signal en présence d'une cavité

Une très bonne correspondance entre les mesures réalisées sur l'extrémité de charpentière et les observations réalisées *a posteriori* en coupe longitudinale est relevée (figure 6). La mesure à -5 cm montre clairement la cavité et la faible épaisseur de bois sain sur laquelle deux rejets sont insérés. A -15 cm, on peut distinguer une couronne de bois sain et deux cavités entourant le bois de cœur dont la résistance est encore notable. Si on compare le résistogramme avec la photo à ce niveau, on remarque que la cavité est en fait encore occupée par du bois structuré, mais affaibli. En coupe, différentes zones de coloration plus ou moins intenses indiquent d'ailleurs la progression de la pourriture et de la cavité. Dans le cas de cette extrémité, ces «îlots» de bois structuré n'ont pas de rôle dans la stabilité des rejets. Par contre, à la base du tronc, de telles zones peuvent encore reprendre des efforts en compression ou en traction et participer à la stabilité de l'arbre. Il est donc important de pouvoir les quantifier plus précisément pour améliorer le diagnostic.

La dernière mesure, 25 cm sous l'ancienne plaie de taille, montre un affaiblissement du bois, mais plus de réelle cavité. L'arbre maintient donc bien des barrières chimiques contre la progression de la pourriture. La courbe mesurée à -25 cm représente un bois relativement peu déformé. L'évolution de l'amplitude est d'une allure comparable et d'une valeur systématiquement supérieure à la courbe moyenne. L'hypothèse est donc faite que cette courbe moyenne peut être également utilisée comme référence au niveau de charpentières et qu'il est possible de calculer une PRA sur ces différents résistogrammes.

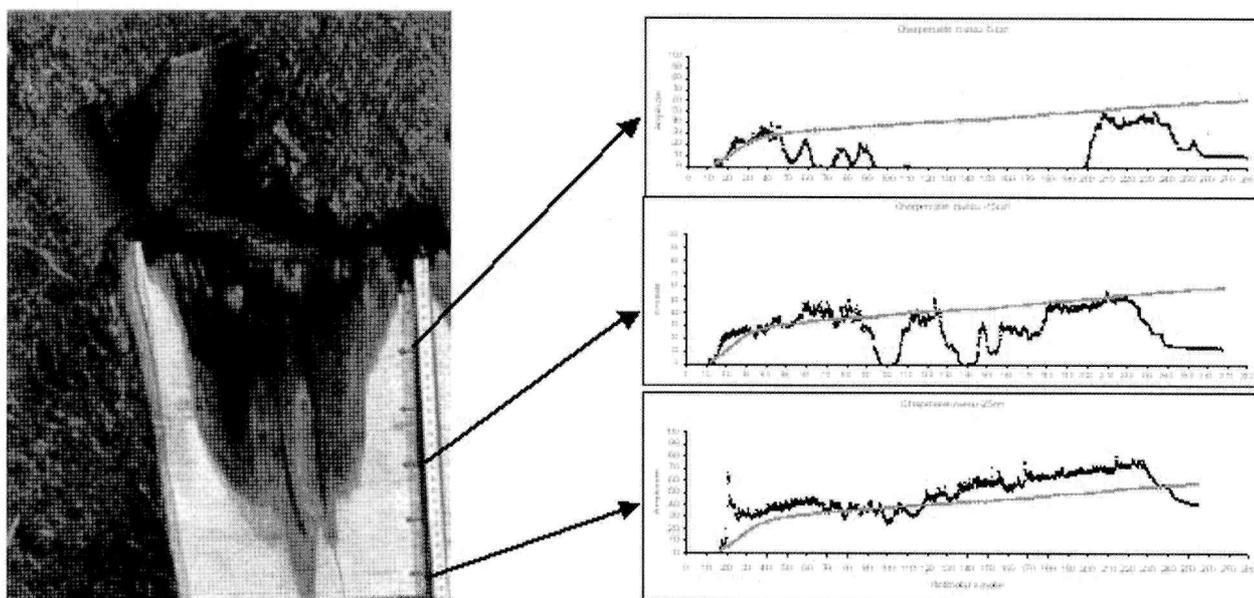


Figure 6
Comparaison des observations réalisées en coupe longitudinale sur une extrémité de charpentière
présentant une cavité terminale (photo de gauche)
et des mesures effectuées au résistographe à trois niveaux (-5, 15 et 25 cm sous l'ancienne plaie de taille) avant la coupe.

Dans le cas de la mesure à -5 cm, on constate que la courbe suit une tendance comparable à la moyenne en son début, jusqu'à ce que la présence de la cavité entraîne la chute de l'amplitude (45 mm, PRA = 85%). L'amplitude mesurée de l'autre côté de la cavité, par contre, est plus faible que celle mesurée à -25 cm et que la moyenne (figure 6). Le bois que l'on peut observer sur la coupe, pourtant, est sain. Cette faiblesse de l'amplitude au-delà de la cavité est donc un artefact de la mesure dû à la présence de celle-ci. Cela pourrait être dû au fait que la force de frottement que subit l'aiguille en avançant dans la zone amorphe est inférieure à celle qu'elle subirait dans du bois sain. L'écart entre les amplitudes mesurées en présence ou en absence de cavité est, d'ailleurs corrélé avec la largeur de la cavité. Pour démontrer cela, deux points caractéristiques de la courbe ont été utilisés. Lorsque l'aiguille sort du bois, on peut remarquer, en effet, que la chute de l'amplitude est relativement brusque et qu'un plateau ou un pic est systématiquement présent ensuite (figure 7).

L'observation de la pièce de bois montre que ces deux points particuliers correspondent respectivement à la limite extérieure du bois et celle de l'écorce. Le dernier maximum atteint avant la chute de l'amplitude est donc appelé «amplitude de sortie», tandis que celui correspondant au plateau est appelé «amplitude d'écorce». Ces observations confirment celles effectuées par Gantz (2002). L'amplitude de sortie reflète la densité du bois traversé au-delà de la cavité. Les coefficients de corrélation entre amplitude de sortie, amplitude d'écorce et largeur de la cavité sont repris dans le tableau 2.

Tableau 2 : corrélations entre amplitudes de sortie et d'écorce et la largeur de la cavité au niveau correspondant.

Corrélation	Coefficient	Hauteur de signification	N
Amplitude de sortie - largeur de cavité	0,954	***	6
Amplitude d'écorce - largeur de cavité	0,905	**	6
Amplitude de sortie -amplitude d'écorce	0,976	***	6

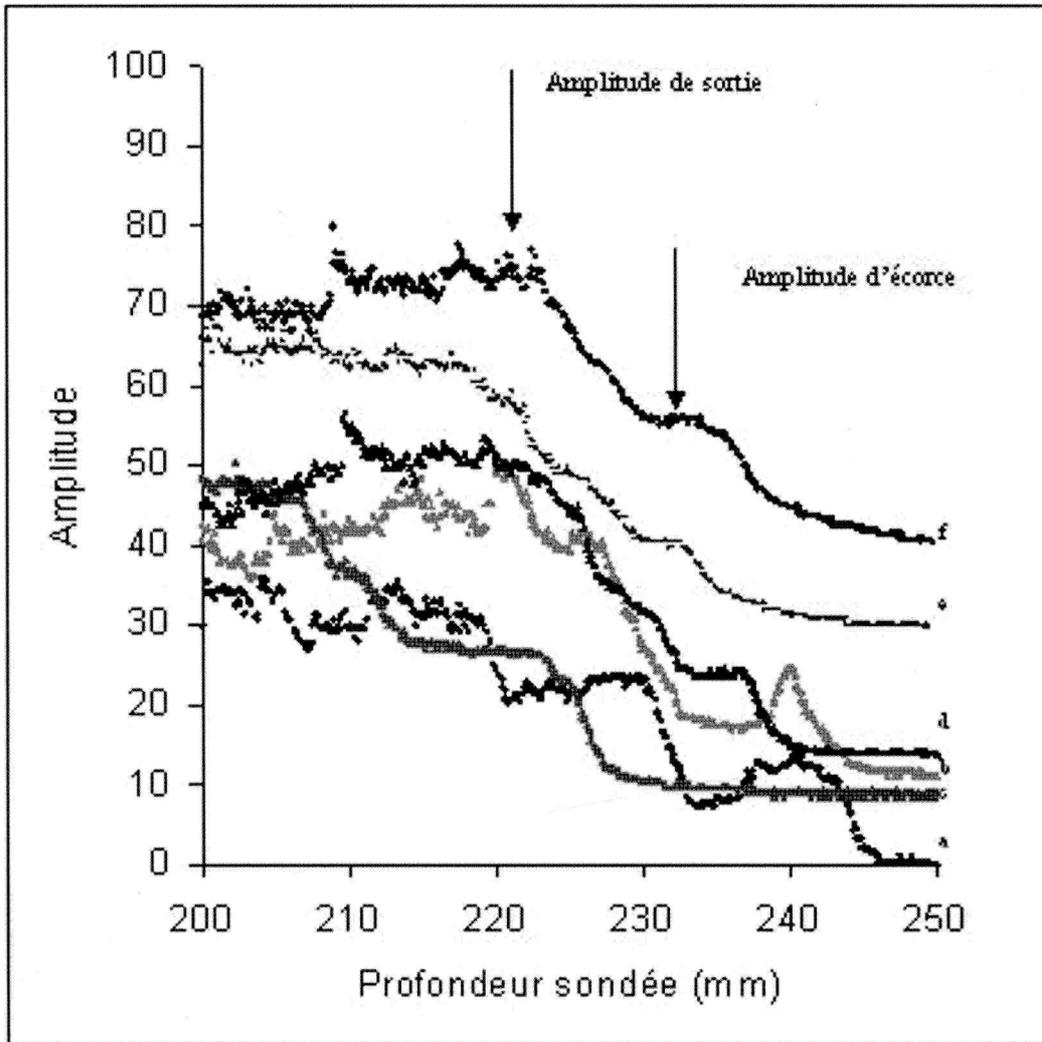


Figure 7
Mesure de l'amplitude entre 200 et 240 mm (sortie de la pièce de bois)
à 6 niveaux du tronçon de charpentière :
ancienne plaie de taille (a), -5 cm (b), -10 cm (c), -15 cm (d), -20 cm (e) et -25 cm (f).

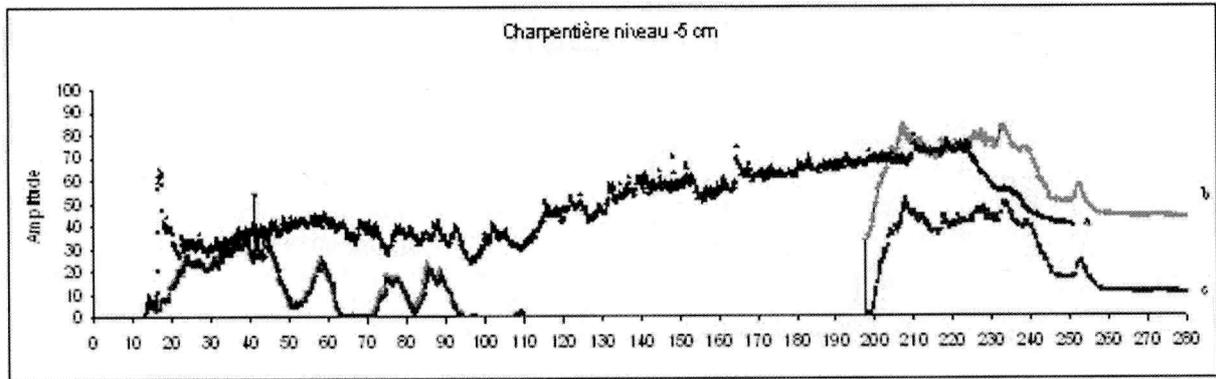


Figure 8
 Comparaison entre les résistogrammes mesurés (c) ou corrigés (b)
 et la mesure de référence à -25cm ne présentant pas de cavité (a).
 Mesure sur la charpentièrre au niveau -5 cm.

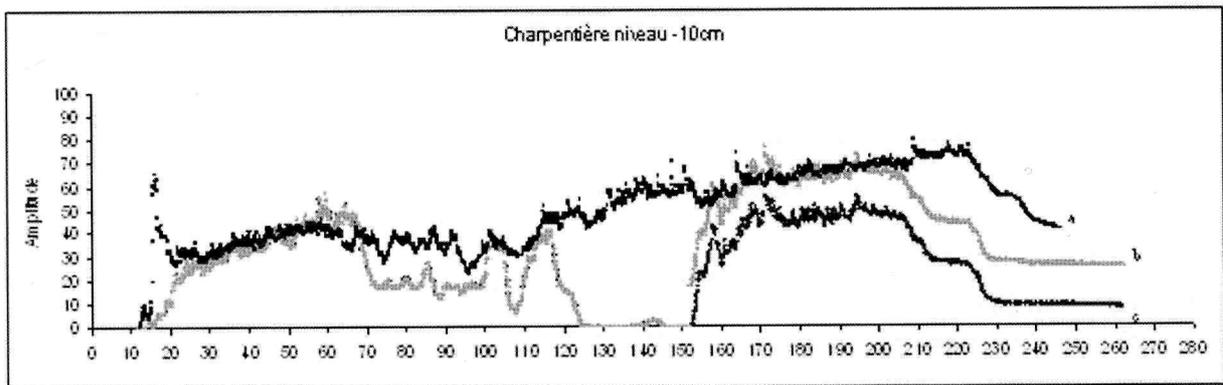


Figure 9
 Comparaison entre les résistogrammes mesurés (c) ou corrigés (b)
 et la mesure de référence à -25cm ne présentant pas de cavité (a).
 Mesure sur la charpentièrre au niveau -10 cm.

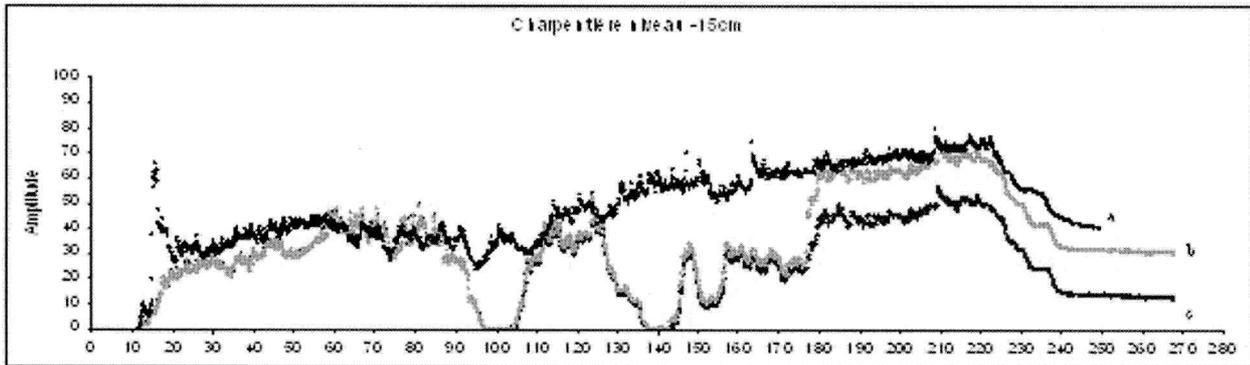


Figure 10
Comparaison entre les résistogrammes mesurés (c) ou corrigés (b)
et la mesure de référence à -25cm ne présentant pas de cavité (a). Mesure sur la charpentièrre au niveau -15 cm.

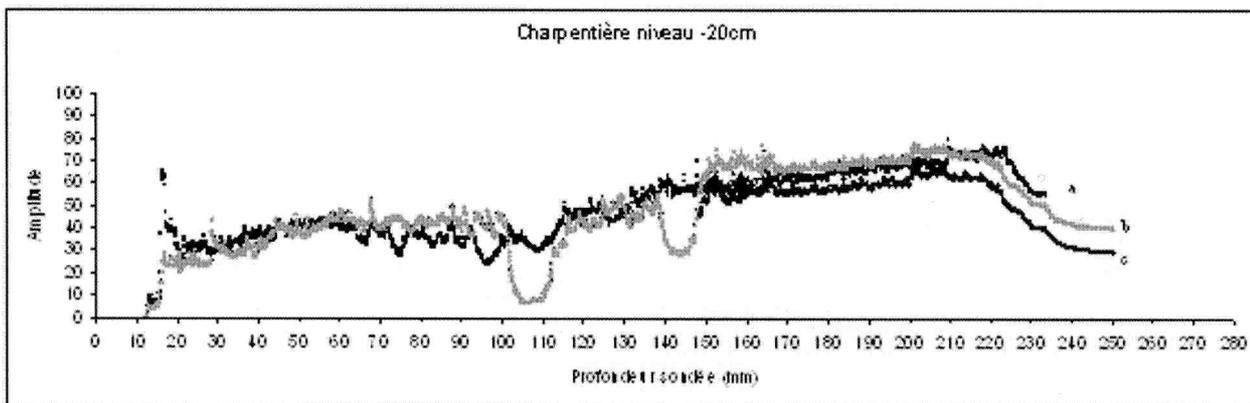


Figure 11
Comparaison entre les résistogrammes mesurés (c) ou corrigés (b)
et la mesure de référence à -25cm ne présentant pas de cavité (a). Mesure sur la charpentièrre au niveau -20 cm.

Sur base de la relation entre largeur de la cavité et diminution de l'amplitude (équation 2), une correction du signal a été calculée et ajoutée à l'amplitude réellement mesurée au-delà de la cavité.

Equ. 2 :

$$\text{Amplitude} = 0,2253 \times \text{Largeur cavité (mm)}$$

L'objectif de la correction du signal est de compenser la diminution de l'amplitude due à la traversée d'une zone amorphe par l'aiguille de l'appareil. Les figures 8 à 11 illustrent les deux résistogrammes (mesuré (c) et corrigé (b)) dans le cas des mesures réalisées sur le tronçon de charpentière. La cavité présente une largeur différente selon le niveau considéré (-5, -10, -15 et -20 cm sous l'ancienne plaie de taille). La correction permet de rapprocher la résistance mécanique des valeurs qu'elle présente au niveau - 25 cm (a). Celui-ci est considéré comme représentatif d'une mesure de la résistance sans le biais dû à la zone amorphe, sur la même pièce de bois et à des niveaux proches. Il sert donc de niveau de comparaison.

Ces corrections peuvent avoir un intérêt dans la démarche de calcul de la résistance mécanique que présentent les parties non encore attaquées d'un tronc. La figure 12 montre, dans le cas d'une mesure réalisée à la base du tilleul abattu, que l'amplitude mesurée au-delà de la cavité périphérique devrait être supérieure de plus de 12 unités. La relation entre l'amplitude mesurée par le résistographe, la réelle densité du bois et sa résistance mécanique doit encore être déterminée et fait pour l'instant l'objet de recherches.

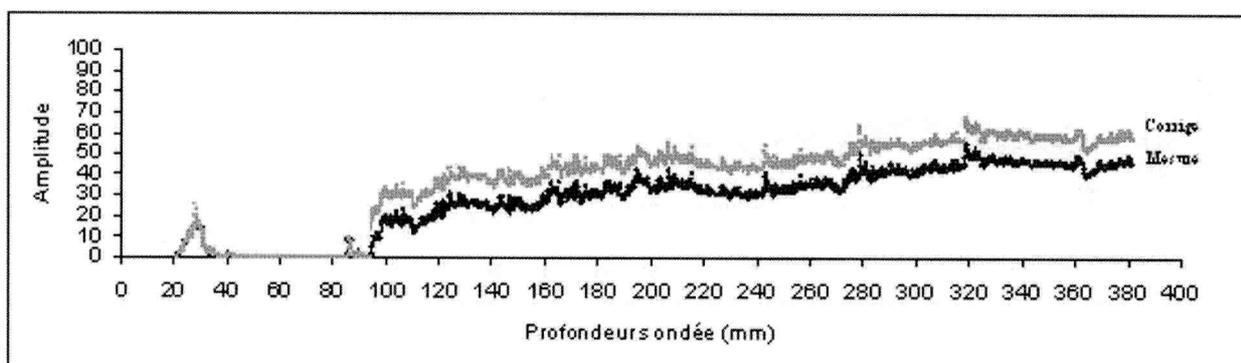


Figure 12

Illustration de la correction d'amplitude sur une mesure au résistographe présentant une zone amorphe (tilleul S90).

Comparaison à la moyenne et calcul de la PRA

Une première manière de déterminer si l'amplitude mesurée peut être liée à un problème de stabilité est de la comparer à la moyenne sur l'alignement d'arbres. Le point de comparaison est utilisé pour calculer, mm par mm, la perte relative d'amplitude (PRA). C'est sur base de cette PRA que l'évaluation de la qualité résiduelle du bois doit être réalisée. L'intérêt de prendre en considération un point de référence variable en fonction de la profondeur sondée est illustré par la figure 13.

La mesure a été réalisée à la base du tilleul abattu, à proximité du carpophore de *Ganoderma applanatum*. La première partie du résistogramme (corrigé) montre une zone amorphe dont la limite est claire (transition à 150 mm). Deux pics d'amplitude sont visibles, à 53 et 125 mm. Bien que leur maximum soient très proches (13,1 et 12,1 unités respectivement), ils ne traduisent pas la même intensité d'affaiblissement du bois. En effet, à 53 mm, les tilleuls présentent une amplitude moyenne de 28 unités, contre 40,7 à 125 mm. A 125 mm, une amplitude de 12,1 unités est donc liée à une perte plus importante qu'à 53 mm. Cela est pris en compte par le calcul du PRA : 53,1% à 53 mm et 70,3% à 125 mm.

Sur base de l'observation de la charpentière en coupe longitudinale, deux seuils de PRA ont été sélectionnés comme permettant de situer les limites entre :

- bois sain et bois affaibli, au-dessus de 20% de PRA ;
- zone affaiblie et absence de bois ou matériau amorphe, au-dessus de 80% de PRA.

L'utilisation de ces seuils au cas illustré par la figure 13 permet de confirmer que les 150 premiers mm ne contiennent que du bois affaibli. Les deux pics d'amplitude à 53 et 125 mm présentent des valeurs de PRA inférieures à 80%. Ils correspondent en coupe à un bois encore structuré. Autour de ces deux «îlots» de bois structuré, le bois est amorphe (fibres présentes, mais sans cohésion). Le calcul du PRA permet également de mettre en évidence une deuxième zone affaiblie plus au cœur du tronc. On remarque, sur le résistogramme, que l'amplitude corrigée plafonne entre 40 et 50 unités puis diminue. A première vue, une zone affaiblie est présente entre 32 et 38 cm. En fait, au-delà de 278 mm, le PRA dépasse déjà les 20%. A partir de cette profondeur, le résistogramme n'augmente plus parallèlement à la moyenne, mais demeure constant. Cette stabilité est, en soi, déjà un signe de l'affaiblissement à cet endroit.

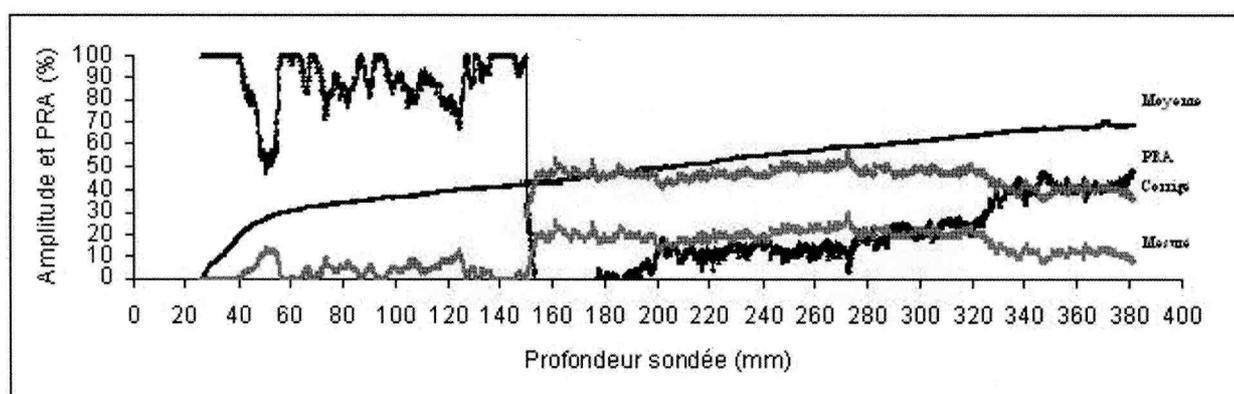


Figure 13
 Illustration du calcul de la PRA par rapport à la courbe moyenne sur une mesure au résistographe effectuée sur le tilleul S90 abattu (attaque de pourridié à la base).

Comparaisons des résistogrammes corrigés aux coupes

La figure 14 illustre un exemple de comparaison entre les mesures réalisées au résistographe et l'observation des zones de bois de qualité différentes dans la coupe de tronc ayant fait l'objet de la mesure. Six coupes d'environ 12 cm ont été utilisées, pour un total de 12 mesures. Le graphique décrit l'évolution de la PRA. La mesure a été corrigée car les 100 premiers millimètres présentent un bois amorphe, ce qui se vérifie sur la coupe. Les deux seuils (20 et 80%) sont également indiqués de manière à déterminer les distances auxquelles devraient correspondre les transitions entre bois sain - bois affaibli et bois affaibli - bois amorphe.

La sensibilité de l'appareil permet de faire correspondre la plupart des transitions observées avec des variations de l'amplitude (et donc du PRA).

Sur les 10 transitions illustrées à la figure 14, l'une d'elles est mesurée par le résistographe sans être clairement visible en coupe (35 mm) et deux transitions visibles ne sont pas marquées sur le graphique.

L'appareil permet, néanmoins, de localiser 7 transitions sur 10 avec un positionnement correct.

La zone amorphe traversée dans les premiers centimètres entraîne une correction du signal. Sans cette correction, le positionnement des transitions reste correct. La principale différence réside dans le fait que, sans correction, le bois traversé après 23,5 cm de profondeur est considéré comme affaibli, ce qui n'est pas le cas dans l'observation de la coupe. La correction de la mesure d'amplitude, ainsi que les valeurs de seuils permettent donc de distinguer correctement les trois types de bois de la coupe : une zone amorphe vers l'extérieur, contenant un îlot de bois plus dur ; une zone affaiblie proche du cœur ; une zone non affaiblie dont la dureté est confirmée sur la coupe.

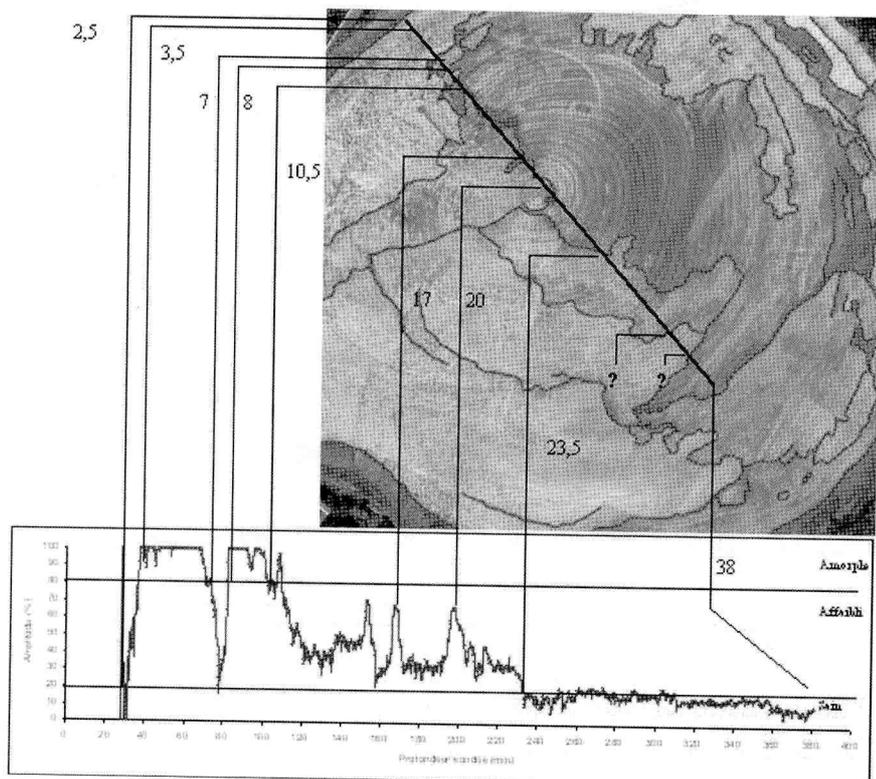


Figure 14
Comparaison entre l'évolution du PRA (%) en fonction de la profondeur sondée et l'observation de la zonation de la coupe ayant fait l'objet de la mesure au résistographe. Les différentes transitions sont soulignées en rouge. Les distances depuis l'origine sont précisées, en cm.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette recherche a été effectuée sur un seul alignement de 280 tilleuls, et la mise en place des méthodes de calcul n'en est qu'à ses débuts. La méthodologie pourrait être élargie, en se basant sur les courbes moyennes calculées sur d'autres espèces. Les mesures sont poursuivies pour étudier quelle est la variabilité de la courbe moyenne entre espèces et entre peuplements. En ce qui concerne la détermination et la validation des seuils de PRA, ce premier exemple a bénéficié de la possibilité de prélever un nombre important d'échantillons lors de tailles ou d'abattages. Une méthodologie utilisant uniquement des échantillons de bois frais, en conditions contrôlées, est en cours de mise au point.

Ces premiers résultats indiquent qu'il est possible de lever progressivement une partie de l'incertitude qui est parfois présente lors de l'interprétation d'un résistogramme. La technique étant liée au risque de dissémination radiale des infections dans le tronc ou la branche, il est d'autant plus important de valoriser au maximum l'information qu'elle apporte et de quantifier de manière objective et sûre la mesure. Il est possible d'extraire de l'information de résistogrammes ne présentant pas de zone affaiblie ou amorphe. Au-delà du simple constat de la continuité de l'amplitude, rassurante au niveau du diagnostic de stabilité, la comparaison entre les courbes ainsi qu'à une moyenne permet de distinguer des arbres présentant une amplitude particulièrement élevée ou faible. En présence d'une zone amorphe, l'utilisation des seuils de PRA permet

de distinguer de manière fiable et objective la présence de bois encore structuré. Lorsque l'on traverse une cavité, il est nécessaire de corriger le signal de manière à mesurer correctement l'amplitude du bois situé au-delà de cette zone. Sans cette correction, des zones de bois sain peuvent passer pour affaiblies, ce qui pourrait induire une erreur de diagnostic de stabilité. Pour affiner ce dernier, il serait nécessaire de faire le lien entre l'amplitude mesurée et les caractéristiques mécaniques du bois (densité, résistance en tension, etc.). L'étalonnage de l'appareil, espèce par espèce et type de bois par type de bois doit encore être réalisé.

Des questions demeurent et nécessitent de poursuivre cette recherche, notamment :

- Quelles autres corrections doivent être effectuées, par rapport à la rectitude de la trajectoire, par exemple ?
- Comment est-il possible d'automatiser la correction, y compris en traversant une zone affaiblie non amorphe ?
- Comment interpréter une série d'autres variations observées, comme les plateaux ?
- Comment relier l'amplitude corrigée et la résistance mécanique ?

Remerciements

Cette recherche a été réalisée sur l'initiative de la Région wallonne et grâce à son soutien financier. Les auteurs tiennent également à remercier le personnel de la Commune de Walhain pour son aide.

CHANTRE, G. et ROZENBERG, P. (1997). «Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to within-profile and within-ring density parameters in Douglas fir wood»? In *Timber management toward wood quality and end-product values. CTIA/IUFRO Int. Wood Quality Workshop*, pp. 41-47.

EMERSON, R., POLLOCK, D., KAINZ, J., FRIDLEY, K., MCLEAN, D. et ROSS, R. (1999). *Nondestructive evaluation techniques for timber bridges. NDT.net* 4, 1-5.

GANTZ, C. (2002). «Evaluating the efficiency of the resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species». Master of Science, North Carolina State University.

GRUBER, F. (2001). Comparing results to identify defects in wood of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) using the drill devices Resistograph 1410, Teredo and Impulshammer-sound system IML. II. Drill diagrams on red-rot wood and discussion. *All. Forst Jagd Zeit.* 172, 1-7.

HELMS, D. et NIEMZ, P. (1993). «New application of the drill resistance method for quality evaluation of wood and wood products». In *Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. pp. 95-102.

MATTHECK, C. et BETGHE, K. (1993). VTA - «Visual Tree defect Assessment». In *9th Int. Meet. Non-Destructive Testing*. Madison, USA.

MOORE, W. (1998). Outillage pour la détection des défauts internes des arbres. *P.H.M. Revue horticole* 392, 38-41.

RINN, F., SCHWEINGRUBER, H. et SCHAR, E. (1996). Resistograph and X-Ray density charts of wood comparative evaluation on drill resistance profiles and X-Ray density charts of different wood species. *Holzforschung* 50, 303-311.

SHIGO, A. (1991). *Modern arboriculture : a systems approach to the care of trees and their associates*. Durham, 425 p.

TOUSSAINT, A., KERVYN, V., DELCROIX, B. BAUDOIN, J-P. (2002). Analyse de l'impact physiologique et économique de l'élagage des arbres d'alignement en port libre. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 6, 99-107.

WINISTORFER, P., XU, W. et WIMMER, R. (1995). Application of a drill resistance technique for density profile measurement in wood composite panels. *For. Prod. J.* 45, 90-94.