



Chaire de recherche
CRSNG/Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance des arbres

Perte de résistance mécanique chez des arbres infestés par l'agrile du frêne : vers une meilleure gestion du risque

Rapport de recherche



Auteurs :

Bastien LECIGNE^{1,2}

Matthew FOLLETT^{1,2}

Jean-Claude RUEL^{2,3}

Christian MESSIER^{1,2}

*Christian BUTEAU*⁴

¹ Chaire CRSNG/Hydro-Québec sur le contrôle de la croissance des arbres, UQÀM.

² Centre d'Étude de la Forêt.

³ Université Laval.

⁴ Hydro-Québec, équipe stratégie et encadrement végétation.

Nous tenons à remercier l'ensemble du service des parcs et espaces verts de la ville de Laval, et tout particulièrement François Chaput, pour leur aide précieuse en amont et pendant le projet. Nous remercions également les élagueurs qui nous ont assistés lors des opérations de terrain ainsi que Michel, conducteur de dépanneuse, pour leur ouverture et leur enthousiasme.

Janvier 2019

Table des matières

	Liste des figures	5
	Liste des tableaux	7
1	Introduction	9
2	Méthodes	11
2.1	Échantillonnage et mesures préliminaires	11
2.2	Mesures des facteurs de faiblesse structurelle	11
2.3	Essais de résistance mécanique	13
2.4	Mesures à partir des photographies	15
2.5	Analyses statistiques	16
3	Résultats	19
3.1	Liens entre les variables continues et les indicateurs pratiques	19
3.2	Résistance du bois à la pénétration	19
3.3	Effet du statut de l'arbre	20
3.4	Variables influençant le moment de flexion maximal	20
3.4.1	Effet des variables continues	21
3.4.2	Effets des indicateurs pratiques	22
3.5	Modalités de rupture	23
4	Discussion	27
5	Recommandations pratiques	31
6	Bibliographie	33

Liste des figures

- 1.1 Figure proposée par Persad *et al.* (2013) présentant les tests de résistance à la pénétration à la base (en noir) ou sur le tronc à un mètre au dessus du sol (en blanc) pour des arbres vivants (*Group I* en haut) et morts (*Group II* en bas). 10
- 2.1 Photographies aériennes (googlemaps) des sites où les arbres étaient localisés. Le périmètre du site d'étude est représenté par une ligne blanche. 12
- 2.2 Photographie annotée du montage utilisé pour tracter les frênes. À noter qu'une ou deux attaches ont pu être utilisées selon que les arbres étaient fourchés ou non. 14
- 3.1 Association des indicateurs pratiques (IP) avec les mesures continues (MC), le statut de l'arbre et le moment de flexion maximal. Les nombres correspondent au τ de Kendall. Les τ significatifs ($\alpha = 0.05$) sont placés sur un fond de couleur dénotant le signe (positif en bleu et négatif en rouge) et la force (échelle sur la figure) de l'association. Le statut de l'arbre a été intégré en attribuant aux arbres morts une valeur de 0 et aux arbres vivants une valeur de 1. . . . 20
- 3.2 Résistance à la pénétration chez des arbres morts (noir) et vivants (gris) en fonction de la profondeur de perçage pour le **tronc en haut à gauche**, la **base du tronc en haut à droite** et une **racine principale en bas**. La profondeur de perçage est exprimée en proportion du rayon du tronc ou pour une profondeur de 10 cm pour les racines. Les points sont la moyenne (\pm écart type) pour chaque tranche de 10 %. Effet du statut de l'arbre dans un modèle d'ANCOVA : $p = 0.75$ pour le tronc, $p = 0.004$ pour la base du tronc et $p < 0.001$ pour les racines. 21
- 3.3 Moment de flexion maximal en fonction du statut de l'arbre. Moyenne (\pm écart type), ANOVA : $p = 0.00997$ et $p = 0.0119$ lorsque la circonférence de l'arbre est ajoutée comme co-variable. . . 22
- 3.4 Arbre de régression expliquant le moment de flexion maximal en fonction des variables mesurées « continues » et du statut de l'arbre. Le moment de flexion maximal moyen (exprimé en kN.m) de chaque groupe est inscrit dans des encadrés. 22
- 3.5 Relation entre les mesures de résistance et le moment de flexion maximal. À **gauche** avec la résistance de la base du tronc chez les arbres vivants (régression linéaire, $r^2 = 0.579$, $p = 0.004$). À **droite** avec la résistance racinaire chez les arbres morts (modèle additif généralisé, $r^2 = 0.542$, $p = 0.021$). 23
- 3.6 Résistance moyenne à la pénétration en fonction de l'humidité du bois. À **gauche**, pour les arbres vivants (régression linéaire en mesures répétées, $r^2_{marginal} = 0.2952$, $r^2_{conditionnel} = 0.59$, $p = 0.002$). À **droite** pour les arbres morts (régression linéaire en mesures répétées, $r^2_{marginal} = 0.084$, $r^2_{conditionnel} = 0.135$, $p = 0.033$). Les triangles correspondent aux points de mesure pris sur le tronc à 1 m de hauteur et les cercles aux points pris à la base du tronc. 24
- 3.7 Arbre de régression expliquant le moment de flexion maximal en fonction des indicateurs pratiques et du statut de l'arbre. Le moment de flexion maximal moyen de chaque groupe est inscrit dans des encadrés. 24

3.8	Réduction de la force 2 secondes (à gauche , ANOVA, $p = 0.334$) et 5 secondes (à droite , ANOVA : $p = 0.0514$) après la rupture primaire, exprimée en proportion de la force au moment de la rupture, pour les arbres morts et vivants.	25
3.9	Réduction de la force 2 secondes après la rupture primaire exprimée en proportion de la force au moment de la rupture chez les arbres morts. À gauche , en fonction de l'humidité mesurée à la base du tronc (régression linéaire, $r^2 = 0.527$, $p = 0.011$). À droite , en fonction du nombre de points d'initiation des réiterats (régression linéaire, $r^2 = 0.494$, $p = 0.023$, une donnée aberrante supprimée).	25
3.10	Réduction de la force 5 secondes après la rupture primaire exprimée en proportion de la force au moment de la rupture en fonction de la résistance des racines à la pénétration chez les arbres morts (régression linéaire, $r^2 = 0.389$, $p = 0.04$).	26
4.1	Méthode de diagnostic de perte de résistance mécanique des arbres morts. En haut , l'arbre de décision permettant de déduire le statut de l'arbre à partir d'observations du recouvrement d'écorce et de la classe de dégradation moyenne (moyenne entre la classe de dégradation du tronc et des racines). Les encadrés présentent le nombre d'arbres correctement classifié / le nombre d'arbres total dans le nœud. Le taux de classifications correctes est de 87%. En bas , arbre de régression expliquant la perte de résistance mécanique des arbres morts (<i>1-moment de flexion maximal / moment de flexion maximal moyen de arbres vivants</i>) en fonction du recouvrement d'écorce observé et de la classe de dégradation des racines (arbre de régression construit avec un minimum de deux observations par nœud terminal ; régression linéaire des valeurs observées en fonction des prévues, $r^2 = 0.498$, $p = 0.0152$).	29

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques des arbres sélectionnés.	11
2.2	Répertoire des variables mesurées utilisées lors des analyses.	13

1 — Introduction

Il n'existe à l'heure actuelle que peu d'études faisant état des propriétés biomécaniques des arbres morts. Ces connaissances sont pourtant fondamentales puisqu'elles sont indispensables à l'évaluation du risque associé à la mort des arbres, ainsi qu'au choix d'un mode d'intervention à privilégier lors d'un démontage.

Seulement deux études portant sur l'effet de l'agrile du frêne sur la résistance mécanique des arbres sont, à notre connaissance, actuellement disponibles. La première, qui a testé des arbres sains (traités avec un insecticide) et des arbres malades (non traités) n'a mis en évidence aucune différence significative de résistance du tronc et des racines entre ces deux groupes (van Wassenae *et al.*, 2016). Cette étude a par ailleurs permis de mettre au jour une différence de flexibilité entre les arbres sains et malades, les arbres malades étant généralement plus rigides. La seconde étude, qui a quant à elle étudié des arbres vivants, dépérissants et morts, a mis en évidence un assèchement du bois des branches chez les arbres morts conduisant notamment à un décalage du point de rupture de ces dernières vers leur base, sans toutefois que la force nécessaire pour les briser ne diffère de celle observée chez les arbres encore en vie (Persad *et al.*, 2013). Cette seconde étude a également mis en évidence une perte de résistance à la pénétration (mesurée à l'aide d'un résistographe) à la base des arbres morts en comparaison aux arbres vivants (Figure 1.1). Ces mesures n'ont cependant pas pu être mises en relation avec la résistance de la base des arbres. Cette donnée est pourtant essentielle puisque la base des arbres (le tronc et le système racinaire) absorbe de lourdes charges lors d'opérations de démontage. Toute perte de résistance à cet endroit pourrait donc avoir des conséquences dramatiques sur la santé des élagueurs.

Il semble donc nécessaire de définir un ensemble d'indicateurs permettant de diagnostiquer d'éventuelles faiblesses structurales causées par la mort des arbres des suites d'une infestation par l'agrile du frêne. Pour cela, nous proposons une étude poursuivant trois objectifs principaux :

1. Tester la résistance des frênes via des tests de flexion du tronc et comparer la résistance des arbres en fonction de leur stade de décomposition.
2. Identifier des marqueurs permettant d'estimer le stade de dégradation et pouvant être facilement utilisés sur le terrain.
3. Définir des indicateurs de la modalité de rupture des frênes morts afin de d'aider à identifier de potentiels dangers.

Pour répondre à ces objectifs, des frênes rouges (*Fraxinus pennsylvanica*) ont été soumis à des tests de traction. La force nécessaire pour obtenir une rupture primaire (exprimée au moyen du moment de flexion maximal) a ensuite été mise en relation avec plusieurs facteurs suspectés d'influencer la résistance mécanique des arbres. Parmi ces facteurs, certains reposent sur des estimations visuelles ou sur des techniques de mesures faciles à mettre en œuvre sur le terrain. Ceci permettra de proposer des indicateurs pratiques permettant de diagnostiquer les pertes de résistance mécanique associées à la dégradation des arbres. En parallèle, des techniques de mesures plus avancées ont été utilisées afin de mesurer les propriétés du bois en lien avec la dégradation de l'arbre. Ces mesures visent à décrire les mêmes phénomènes, mais de façon plus précise, que les estimations visuelles ou techniques de mesures simples.

Cette étude a notamment permis d'identifier plusieurs facteurs conduisant à des pertes de résistance

mécanique et de définir un ensemble de recommandations visant à assister les élagueurs lors d'interventions sur des frênes morts ou dépérissants.

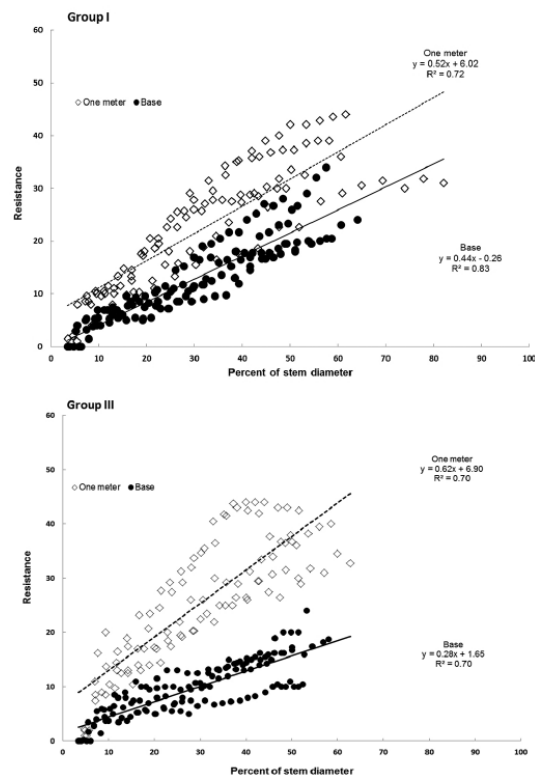


Figure 1.1: Figure proposée par Persad *et al.* (2013) présentant les tests de résistance à la pénétration à la base (en noir) ou sur le tronc à un mètre au dessus du sol (en blanc) pour des arbres vivants (*Group I* en haut) et morts (*Group II* en bas).

2 — Méthodes

2.1 Échantillonnage et mesures préliminaires

Vingt-trois frênes rouges (*Fraxinus pennsylvanica*) ont été sélectionnés dans la ville de Laval. L'échantillonnage a été réalisé de façon à minimiser la variabilité des traits morphologiques et à maximiser la variabilité des indicateurs de dégradation de la structure des arbres. Cette sélection s'est faite en observant les traits suivants :

- Diamètre à hauteur de poitrine (DHP), hauteur de l'arbre et largeur de la couronne
- Proportion de la couronne encore en feuilles
- Stade de dégradation de la structure, i.e. perte d'écorce et de branches
- Perte d'écorce sur le tronc
- Hauteur de fourche

Le Tableau 2.1 synthétise les principales caractéristiques des arbres sélectionnés.

Tableau 2.1: Caractéristiques des arbres sélectionnés.

	DHP	Hauteur	Largeur	Haut. / Lag.	Dégradation tronc	Dégradation structure	Hauteur d'attachement
Moyenne	25.46	10.5	6.9	1.57	1.4	2.2	4.4
Minimum	20	7.8	4.4	1.09	1	1	2.8
Maximum	33	13.8	10.1	2.42	2.5	3.5	7.1

Les arbres étaient localisés dans quatre sites. Le premier site, qui comprenait 4 arbres était localisé dans un parc urbain (Figure 2.1, Site 1). Trois des arbres étaient localisés autour d'une butte artificielle et un d'entre eux était localisé directement sur la butte. Le second site, qui ne comprenait qu'un arbre, était situé sur un îlot dans un quartier résidentiel (Figure 2.1, Site 2). Le troisième site comprenait 7 arbres et était situé le long d'une rue bordant un parc enherbé (Figure 2.1, Site 3). Le quatrième site, qui comportait 11 arbres, était un terre-plein d'environ 35 m de largeur localisé au milieu d'un boulevard (Figure 2.1, Site 4). Les quatre sites présentaient des types de sol comparables (sol argileux ou loam argileux, Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement¹) et, à l'exception d'un des arbres du premier site, ne présentaient pas de dénivelé.

2.2 Mesures des facteurs de faiblesse structurelle

Les arbres sélectionnés ont ensuite fait l'objet de mesures plus approfondies visant (i) à expliquer la résistance des arbres à la flexion, (ii) leur comportement durant les essais et (iii) à identifier des indicateurs visuels permettant de diagnostiquer d'éventuelles pertes de résistance mécanique.

¹<https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/etudes-pedologiques/feuillet-cartographiques/>



Figure 2.1: Photographies aériennes (googlemaps) des sites où les arbres étaient localisés. Le périmètre du site d'étude est représenté par une ligne blanche.

Pour cela, 4 types de variables ont été mesurées :

- Des variables relatives aux *informations générales* de l'arbre et qui visent essentiellement à décrire sa morphologie et sa vigueur.
- Des variables ayant pour but de servir d'*indicateurs pratiques* et qui pourront être facilement estimées par un praticien lors d'une visite de terrain. Comme ces variables relèvent généralement de l'appréciation du praticien, elles ont été évaluées par deux personnes et seule la moyenne des deux estimés sera utilisée dans les analyses.
- Des variables résultant de *mesures continues* (dans le sens numérique du terme) qui représentent une mesure précise des indicateurs pratiques.
- Des variables prises au moment des *tests de traction* et qui décrivent la résistance de l'arbre et son comportement durant les essais.

Le statut des arbres, i.e. mort ou vivant, a été déterminé via une estimation visuelle de la couronne. Les arbres n'ayant pas de feuille ont été automatiquement classés comme morts. Ceux qui avaient moins de 5 % du feuillage restant et qui avaient de petites feuilles ont également été classés morts, en considérant que les feuilles sont sorties uniquement avec les réserves présentes dans les rameaux et qu'elles n'ont pas grandi après le débourrement. Les autres arbres sont considérés vivants même si une partie de la couronne est morte.

On considère donc que le critère déterminant de la mort des arbres est le maintien ou non d'un flux de sève au niveau du tronc. Ainsi, 12 arbres sont considérés comme vivants et 11 comme morts. L'ensemble des variables mesurées est répertorié dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2: Répertoire des variables mesurées utilisées lors des analyses.

	Variable	Technique de prise de mesure	Unité	Note
Informations générales	Dimensions des arbres			
	Circonférence à 1m	Ruban à mesurer	cm	
	Hauteur de l'arbre	TruPulse 360	m	
	Largeur de la couronne	TruPulse 360	m	
	Rapport Hauteur/largeur	-	-	
	Vigueur des arbres			
Proportion de la couronne vivante	Estimation visuelle	%		
Statut	% de la couronne vivante et forme des feuilles	-	Morts ou vivants	
Nombre de points d'initiation des reiters	Dénombrement	-		
Indicateurs pratiques	Dégradation du tronc			
	Recouvrement d'écorce	Estimation visuelle par deux opérateurs	%	
	Classe de dégradation du bois	Marteau par deux opérateurs	-	1 à 5 classes (1 = intact, 5 = très dégradé)
	Nombre de fissures sur le tronc	Dénombrement	-	
	Classe de dégradation de la structure	Estimation visuelle par deux opérateurs	-	1 à 5 classes (1 = intact, 5 = très dégradé)
Dégradation racinaire				
Classe de dégradation des racines	Marteau par deux opérateurs	-	1 à 5 classes (1 = intact, 5 = très dégradé)	
Mesures continues	Dégradation du tronc			
	Recouvrement d'écorce à 0.5 m, 1 m et 2 m	Ruban à mesurer	%	1-Longueur sans écorce / circonférence
	Résistance du bois à la pénétration sur le tronc à 1m de hauteur et à la base du tronc	Résistographe	%	Valeur moyenne ou résistance pour chaque profondeur de perçage utilisées dans analyses
	Proportion d'humidité dans le bois du tronc à la base et à 1m de hauteur	Carottes de 5cm pesées avant et après séchage à 103°C pendant 96h	%	
Dégradation racinaire				
Résistance d'une racine principale à la pénétration	Résistographe	%	Valeur moyenne ou tout le tracé utilisés dans analyses	
Tests de traction	Comportement durant et après la traction			
	Changement d'inclinaison durant le test	Mesures à partir de photos, différence entre l'angle initial et l'angle mesuré au moment de la rupture	°	
	Réduction de force post-rupture 2seconde et 5 seconde après la rupture	Différence entre la force lue au moment de la rupture et la force lue 2 secondes et 5 secondes après la rupture	%	
Moment de flexion maximal	voir encadré 1	kNm		

2.3 Essais de résistance mécanique

Un treuil a été utilisé afin d'exercer une flexion sur les arbres jusqu'à obtention d'une rupture primaire, qui peut être une rupture du tronc ou des racines. Pour ce faire une dépanneuse lourde de 12 T équipée d'un treuil d'une puissance de 40 T a été utilisée. Ceci garantit une vitesse d'enroulement constante et de conserver la stabilité du treuil tout au long des essais. Le câble de la dépanneuse était doublé et attaché à l'arbre par

TruPulse 360 : <http://www.lasertech.com/TruPulse-Laser-Rangefinder.aspx>

l'intermédiaire d'une poulie et de deux (ou trois lorsque l'arbre avait une fourche basse) câbles de nylons (voir Figure 2.2 pour plus de détails sur le montage utilisé). Ce montage est relativement léger et il permet de mesurer facilement l'angle dans lequel la force est appliquée lors de la phase de mesures effectuées à partir des photographies (voir encadré 1). La hauteur moyenne d'attachement du câble était de 4.4 m (Tableau 2.1).

Lors des treuillages, une cellule de charge a été utilisée pour mesurer la force transmise à l'arbre dans un des deux brins du câble du treuil. La force lue sur la cellule de charge a donc été doublée pour avoir la force totale transmise à l'arbre. Deux cellules de charge différentes ont dû être utilisées pendant les essais suite à la défaillance de la première cellule. La première cellule de charge était une PiCUS TreeQuinetic produite par Argus electronic gmbh³ mesurant la force en kN et la seconde une optima OP-312SS⁴ couplée à un lecteur optima OP-901A⁵ mesurant la force en kg. La force mesurée par la seconde cellule de charge a par la suite été convertie en kN. Tout au long des treuillages, une caméra (Nikon D3100 équipée d'un objectif AF DX NIKKOR 18-55mm f/3.5-5.6 VR) a été utilisée pour enregistrer en continue les mouvements de l'arbre. Un niveau a été placé sur le support d'objectif afin de s'assurer que le champ de vision de la caméra soit horizontal. En parallèle, une seconde caméra a été utilisée pour filmer la cellule de charge puisque les cellules utilisées ne disposaient pas de dispositif d'enregistrement. Un coup de sifflet a été utilisé pour coordonner les deux enregistrements.

Après la rupture de l'arbre, le type de rupture (déracinement ou bris du tronc) a été enregistré. Dans le cas d'un bris du tronc, la hauteur du bris a été relevée et la souche a été inspectée afin de détecter une éventuelle présence de carie. Cependant, aucune carie n'a été observée chez les arbres cassés. Sur l'ensemble des arbres de l'étude, seulement deux ont cassé tandis que 21 ont déraciné.

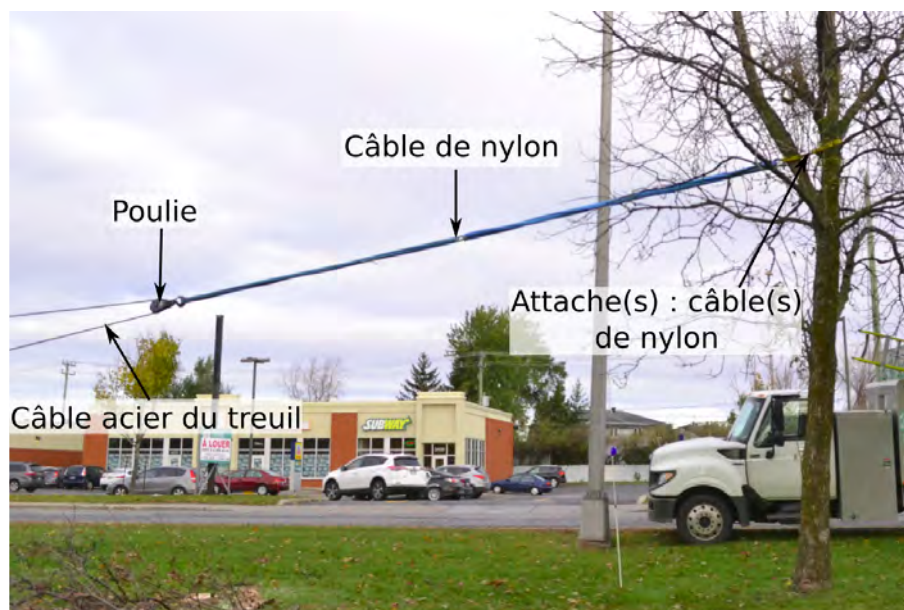


Figure 2.2: Photographie annotée du montage utilisé pour tracter les frênes. À noter qu'une ou deux attaches ont pu être utilisées selon que les arbres étaient fourchés ou non.

³<http://www.argus-electronic.de/en/tree-inspection/products/picus-treequintic-load-tests>

⁴<http://www.optimasensors.com/s-beams/>

⁵<https://www.optimascale.com/product-page/op-901-indicator>

2.4 Mesures à partir des photographies

Après les essais, les enregistrements vidéos ont été utilisés afin de calculer le moment de flexion transmis à l'arbre au moment de sa rupture, le déplacement de l'arbre durant les essais et la force lue sur la cellule de charge après la rupture.

Dans un premier temps, l'observation de la vidéo de la cellule de charge a permis de déterminer à quel moment la rupture primaire est intervenue (diminution de la force) après le coup de sifflet et de lire la force maximale transmise à l'arbre. Une fois le temps de la rupture déterminé, la dernière image de l'enregistrement vidéo de l'essai prise avant la rupture a été exportée et ouverte dans le logiciel GIMP⁶ pour réaliser les mesures nécessaires au calcul du moment de force. Le moment de force est calculé avec la méthode décrite dans l'encadré 1.

Encadré 1 Mesure du moment de force à partir de photographies

La méthode utilisée pour mesurer le moment de force (M) est celle décrite par Meunier *et al.* (2002). La formule utilisée est la suivante :

$$M = T_x(B_y - A_y) + T_y(B_x - A_x) \text{ où } T_x = F \cos(\theta) \text{ et } T_y = F \sin(\theta).$$

Les coordonnées de A (point de rupture) et B (point d'attache) ont été déterminées à partir de la position du curseur exprimée en mètre. L'angle θ a été calculé à l'aide de l'outil de mesure de longueur et d'angle disponible dans GIMP. La mise à l'échelle de l'image s'est faite à l'aide de la distance entre la base de l'arbre et le point d'attache qui a été mesurée sur le terrain et sur les photos ou en utilisant une référence placée dans l'image suite à une défaillance du TruPulse.



Photo d'un frêne tracté au moment de la rupture. A et B correspondent respectivement à la position du point de rupture (ici pour un arbre ayant déraciné) et du point d'attache. θ correspond à l'angle formé par l'axe de traction et l'horizontale et F représente la force appliquée par le treuil.

Afin de mesurer l'amortissement de la force de traction post-rupture, la force mesurée par la cellule de charge a également été relevée 2 secondes et 5 secondes après la rupture en veillant à ce que le treuil n'ait pas cessé de fonctionner entre-temps. Finalement, le déplacement de l'arbre durant les tests de traction a été mesuré

⁶<https://www.gimp.org/>

comme étant la différence entre l'angle d'élévation initial et final de l'arbre (i.e. l'angle formé par le segment AB et l'horizontale avant le début des essais et au moment de la rupture). À noter que les deux angles ont été mesurés à l'aide des photographies.

2.5 Analyses statistiques

Les liens entre les indicateurs pratiques et les mesures continues ont été étudiés à l'aide du τ de Kendall. Cette analyse permet de décrire l'association entre deux variables tout en accommodant aussi bien des variables continues que catégorielles (comme les classes de dégradation). Ainsi si $\tau > 0$, l'association entre les variables est positive (leurs valeurs respectives évoluent dans le même sens) et si $\tau < 0$, les variables sont associées négativement (si l'une augmente, l'autre diminue). Les calculs des τ de Kendall ont été réalisés dans R à l'aide de la fonction *cor()*; la fonction *cor.test* a été utilisée afin de tester leur significativité (seuil de significativité : $\alpha = 0.05$). Les visualisations graphiques ont été produites à l'aide de la fonction *corrplot()* du package *corrplot* (version 0.84).

Des analyses de covariance (ANCOVA) ont été utilisées afin d'étudier l'effet de la mort des arbres sur la résistance du tronc à la pénétration (à 1 m de hauteur), de la base du tronc et des racines (mesures réalisées au résistographe). Cette analyse permet de mettre en évidence l'effet d'une variable catégorielle (ici le statut de l'arbre) sur la relation entre deux variables continues (ici la résistance à la pénétration et la profondeur de perçage). Si l'effet du statut de l'arbre est significatif ($p < 0.05$) on peut considérer que le statut de l'arbre a un effet sur la résistance à la pénétration. Ces analyses ont été réalisées dans R à l'aide de la fonction *lm()* complétée par la fonction *ANOVA()*. Les visualisations graphiques ont été réalisées à l'aide du package *ggplot2* (version 2.2.1) et du package *ggpubr* (version 0.2).

Des analyses de variance (ANOVA) ont été utilisées à plusieurs reprises afin d'identifier une différence de moyenne entre deux groupes pour une variable continue unique (par exemple une différence du moment de flexion maximal entre les arbres morts et vivants). Si la différence est significative ($p < 0.05$) on peut conclure que les deux groupes ont une moyenne différente. Ces analyses ont été réalisées dans R à l'aide de la fonction *aov()*. Les visualisations graphiques ont été réalisées à l'aide du package *ggplot2* (version 2.2.1) et du package *ggpubr* (version 0.2). Le résultat de l'analyse est présenté sur les graphiques (NA : non significatif; * $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$).

Des régressions linéaires ont été utilisées pour étudier le lien entre deux variables continues (par exemple la circonférence du tronc et le moment de flexion maximal). Cette analyse permet de déterminer si une variable a un effet significatif sur une autre ($p < 0.05$), de déterminer le sens de cette relation (positif ou négatif) et sa force. Ces analyses ont été réalisées à l'aide de la fonction *lm()* et les visualisations graphiques ont été réalisées à l'aide du package *ggplot2* (version 2.2.1) et du package *ggpubr* (version 0.2). Les graphiques incluent les intervalles de confiance à 95 %.

La relation entre l'humidité du bois et la résistance à la pénétration a été analysée chez les arbres morts et vivants séparément. Comme ces analyses intégraient des données prises à deux endroits sur un même arbre (au tronc et à la base du tronc), des analyses de régression linéaire en mesures répétées ont été utilisées. Ces analyses ont été réalisées à l'aide de la fonction *lmer()* du package *lme4* (version 1.1-17). Ces modèles proposent deux r^2 : le $r^2_{conditionnel}$ et le $r^2_{marginal}$ qui, respectivement, tiennent compte ou non de l'effet aléatoire. Les représentations graphiques sont similaires à celles réalisées pour les régressions linéaires classiques (voir ci-dessus).

Dans certains cas la relation entre deux variables peut être non linéaire. Afin de rechercher une telle relation, des modèles additifs généralisés (GAM) ont été utilisés. Cette analyse permet d'observer si une relation complexe entre deux variables continues (par exemple entre la résistance des racines à la pénétration et le moment de flexion maximal) existe ($p < 0.05$) et d'étudier sa force. Les analyses ont été réalisées à l'aide

de la fonction *gam()* du package R *mgcv* (version 1.8-23). Les visualisations graphiques ont été réalisées avec *ggplot2* (version 2.2.1) à l'aide de la fonction *plotGAM* du package *voxel* (version 1.3.5).

Plusieurs arbres de régression et de décision ont été utilisés. Ces analyses présentent l'avantage de pouvoir intégrer, de façon hiérarchisée, des facteurs continus et catégoriels et d'étudier leur effet sur une variable continue (arbres de régression) ou catégorielle (arbres de décision). De plus, ces analyses présentent l'avantage de pouvoir être directement utilisables sur le terrain puisque l'arbre produit est facile à interpréter, même par des personnes non spécialistes de statistiques. Les arbres de régression ou de décision consistent en une ou plusieurs division(s) de la variance de la variable réponse en deux groupes homogènes (en termes de valeur absolue ou de probabilité respectivement) à partir d'une valeur unique d'une seule variable explicative. Par exemple, si une division de la variable réponse (y) est réalisée par une valeur de $x_1 = 50$, ceci signifie que le groupe $y_{x_1 > 50}$ et $y_{x_1 \leq 50}$ sont homogènes et différents entre eux. Les deux groupes formés ($y_{x > 50}$ et $y_{x \leq 50}$) peuvent ensuite être divisés à nouveau, par une nouvelle valeur de x_1 ou de toute autre variable explicative, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit rencontré (soit aucune division permettant de créer de groupes homogènes n'est possible, soit le nombre minimal d'observation dans un groupe atteint). Les arbres de régression et de décision ont été ajustés à l'aide de la fonction *rpart* du package R *rpart* (version 4.1-13) en utilisant un nombre minimal d'observations (n) dans un groupe de 5 individus. Ceci permet de réduire les risques de surapprentissage. Dans certains cas spécifiques, un n plus petit a été utilisé. Dans ce cas, le n sera précisé dans le texte. Les visualisations graphiques ont été réalisées à l'aide de la fonction *prp()* du package *rpart.plot* (version 3.0.6).

Pour toutes les analyses paramétriques (ANOVA, ANCOVA, régression linéaire et régression linéaire en mesures répétées), la normalité des résidus a été inspectée à l'aide de l'observation de l'histogramme de fréquence des résidus et a été complétée par un test de Shapiro-Wilk (avec la fonction *shapiro.test()*). Lorsque les résidus n'étaient pas normalement distribués, les variables (dépendantes et/ou indépendantes) ont été placées sur une échelle logarithmique, ces transformations seront indiquées sur les figures. Dans un cas de figure, aucune transformation n'a permis de normaliser les résidus et un test non paramétrique de Wilcoxon a été utilisé à la place de l'ANOVA initialement prévue. Finalement, une recherche des données aberrantes a été effectuée pour chaque test à l'aide d'un test de Dixon. Lorsqu'une donnée est déclarée aberrante, l'analyse est refaite en supprimant cette donnée.

3 — Résultats

3.1 Liens entre les variables continues et les indicateurs pratiques

Plusieurs des indicateurs pratiques sont associés entre eux (Figure 3.1). Les trois classes de dégradation (i.e. de la structure, des racines et du tronc) sont positivement associées entre elles ce qui suggère que les interprétations étaient cohérentes pour un même individu et que ces trois classes de dégradation concordent généralement au sein d'un même individu (τ de Kendall compris entre 0.39 et 0.64, Figure 3.1). La classe de dégradation du tronc était associée négativement au recouvrement d'écorce ($\tau = -0.44$), les arbres ayant moins d'écorce étant donc généralement classés dans une classe de dégradation avancée. Finalement le nombre de fissures visibles sur le tronc est également associé au recouvrement d'écorce ($\tau = -0.63$), ce qui constitue également un résultat intuitif puisque les fissures n'étaient visibles que lors d'une perte d'écorce.

Le recouvrement d'écorce estimé visuellement était fortement et positivement associé aux pertes d'écorces mesurées à 0.5 m, 1 m et 2 m ($\tau = 0.78, 0.65$ et 0.48 respectivement), ce qui suggère une forte adéquation entre les estimations visuelles et les mesures continues. Cet indicateur pratique est aussi associé positivement aux mesures de résistance à la pénétration prises à la base du tronc ($\tau = 0.38$, Figure 3.1). La classe de dégradation de la structure semble capturer les mêmes informations que le recouvrement d'écorce estimé visuellement à la différence qu'elle n'est pas associée au recouvrement d'écorce mesuré à 1m et qu'elle est associée plus fortement à la résistance à la pénétration mesurée à la base du tronc ($\tau = -0.4$, Figure 3.1). La classe de dégradation des racines est associée positivement à la résistance des racines à la pénétration ($\tau = 0.33$, Figure 3.1). Le recouvrement d'écorce estimé visuellement, la classe de dégradation de la structure et la classe de dégradation racinaires semblent toutes trois capturer une partie de l'information fournie par les mesures continues. Cependant, le recouvrement d'écorce estimé visuellement et la classe de dégradation de la structure semblent redondants alors que la classe de dégradation racinaire est la seule à renseigner sur la résistance des racines à la pénétration. Finalement la classe de dégradation du tronc n'était associée qu'au recouvrement d'écorce mesuré à 0.5 m de hauteur tandis que le nombre de fissures observées n'est associé qu'au recouvrement d'écorce mesuré à 0.5 m et 1 m de hauteur. Ces deux derniers indicateurs pratiques ne semblent donc pas apporter d'information en dehors des traits utilisés et/ou nécessaires à leur estimation.

Seul le recouvrement d'écorce est associé au moment de flexion maximal ($\tau = 0.44$, Figure 3.1) tandis que le statut de l'arbre était positivement associé au recouvrement d'écorce estimé visuellement ($\tau = 0.57$, Figure 3.1) et négativement à la classe de dégradation du tronc ($\tau = -0.54$, Figure 3.1) et des racines ($\tau = -0.43$, Figure 3.1). Les arbres morts avaient donc un recouvrement d'écorce plus faible et étaient classés dans des classes de dégradation plus avancées que les arbres vivants. Ces trois indicateurs semblent donc très pertinents pour déduire le statut de l'arbre lors de visites hivernales. Cependant, seul le recouvrement d'écorce estimé visuellement semble à même de permettre une estimation du moment de flexion maximal.

3.2 Résistance du bois à la pénétration

Aucune différence de résistance du bois à la pénétration ne peut être observée entre les arbres morts et vivants au niveau du tronc ($p = 0.75$ pour le statut des arbres, Figure 3.2) ce qui confirme les observations de Persad *et*

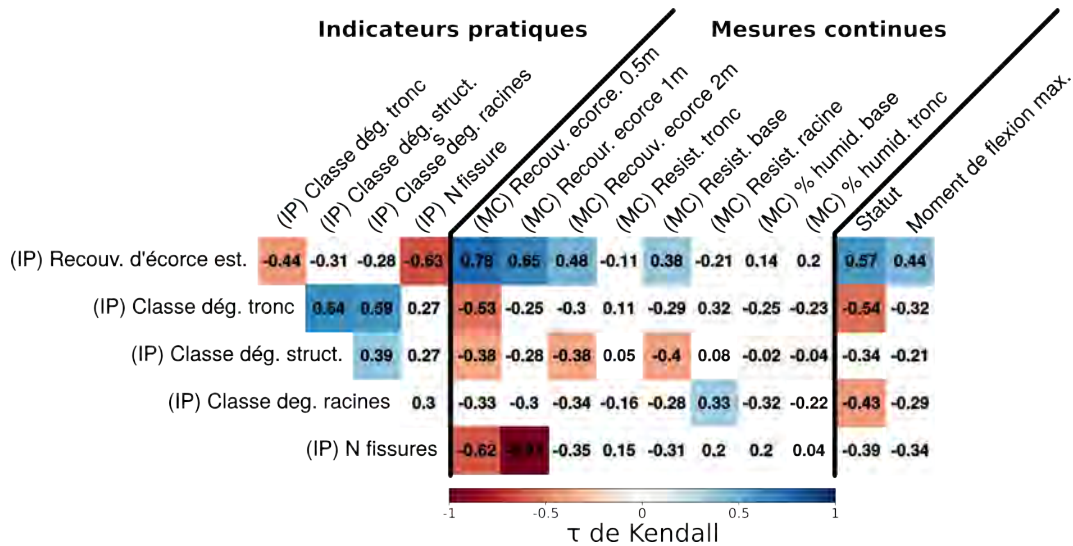


Figure 3.1: Association des indicateurs pratiques (IP) avec les mesures continues (MC), le statut de l'arbre et le moment de flexion maximal. Les nombres correspondent au τ de Kendall. Les τ significatifs ($\alpha = 0.05$) sont placés sur un fond de couleur dénotant le signe (positif en bleu et négatif en rouge) et la force (échelle sur la figure) de l'association. Le statut de l'arbre a été intégré en attribuant aux arbres morts une valeur de 0 et aux arbres vivants une valeur de 1.

al. (2013). Cependant, une différence significative entre les arbres morts et vivants semble exister au niveau de la base du tronc et des racines entre arbres morts et vivants ($p = 0.004$ et $p < 0.001$ respectivement pour le statut de l'arbre). Ceci supporte les résultats obtenus par Persad *et al.* (2013, Figure 1.1) et suggère une perte de résistance des arbres morts à la base du tronc. Cette tendance est cependant inversée dans les racines qui présentent une résistance plus importante (Figure 3.2 en bas).

3.3 Effet du statut de l'arbre

Les arbres morts présentent un moment de flexion maximal significativement inférieur à celui des arbres vivants (en moyenne 28.33 kN.kg et 46.54 kN.kg respectivement, ANOVA : $p = 0.0099$, Figure 3.3). Cette différence pourrait être attribuée à une différence de dimension des arbres, les arbres morts étant significativement plus petits que les arbres vivants (respectivement 73.82 cm vs. 86.75 cm, ANOVA : $p = 0.0051$ pour la circonférence et, 9.68 m vs. 11.27 m, ANOVA : $p = 0.01$ pour la hauteur). Cependant, aucune relation significative entre la circonférence du tronc ou la hauteur de l'arbre avec le moment de flexion maximal n'a été observée (régression linéaire $p = 0.1854$ et $p = 0.2367$ respectivement) et l'effet du statut des arbres reste significatif même lorsque l'effet de la dimension des arbres (ici la circonférence du tronc) est intégré aux analyses (ANOVA : $p = 0.0119$, Figure 3.3). Il semblerait donc que le statut de l'arbre soit un facteur important pour expliquer le moment de flexion nécessaire pour provoquer une rupture primaire.

3.4 Variables influençant le moment de flexion maximal

Des arbres de régression ont été ajustés afin de déterminer les principaux facteurs permettant de prédire la résistance des arbres à la flexion. Le premier vise à expliquer le moment de flexion maximal uniquement

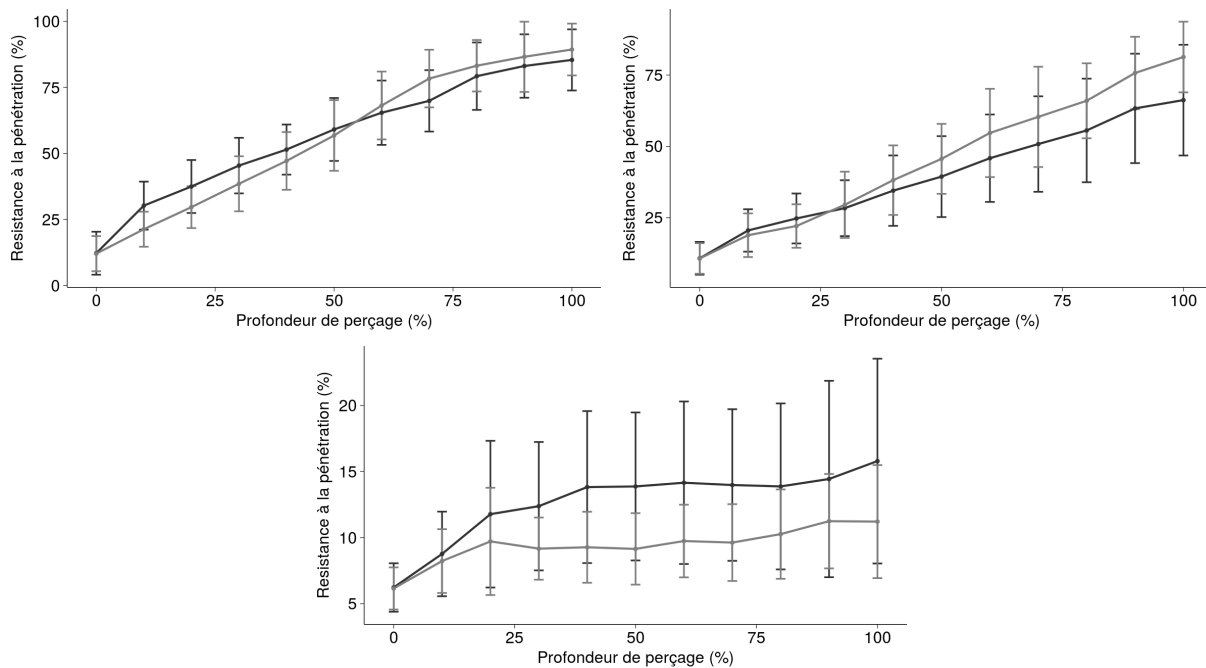


Figure 3.2: Résistance à la pénétration chez des arbres morts (noir) et vivants (gris) en fonction de la profondeur de perçage pour le **tronc en haut à gauche**, la **base du tronc en haut à droite** et une **racine principale en bas**. La profondeur de perçage est exprimée en proportion du rayon du tronc ou pour une profondeur de 10 cm pour les racines. Les points sont la moyenne (\pm écart type) pour chaque tranche de 10 %. Effet du statut de l'arbre dans un modèle d'ANCOVA : $p = 0.75$ pour le tronc, $p = 0.004$ pour la base du tronc et $p < 0.001$ pour les racines.

à l'aide des variables mesurées de façon continue, de l'état de l'arbre et de ses dimensions (i.e. mesures continues et informations générales dans le Tableau 2.2). Un second arbre de régression visait quant à lui à expliquer le moment de force à l'aide des indicateurs pratiques, de la vigueur et des dimensions de l'arbre (i.e. indicateurs pratiques et informations générales dans le Tableau 2.2).

3.4.1 Effet des variables continues

Le premier arbre de régression (celui utilisant les variables continues) est composé de quatre nœuds terminaux (Figure 3.4). L'erreur moyenne de prédiction est de 31.8 % et les prédictions présentent une corrélation relativement élevée avec les valeurs mesurées (régression linéaire des valeurs observées en fonction des valeurs prédites : $r^2 = 0.5817$, pente d'équation = 1 et ordonnée à l'origine = 0). La première division est réalisée par le statut de l'arbre et permet d'expliquer environ 28 % de la variance, ce qui confirme que ce facteur est l'un des principaux déterminants de la solidité des arbres. Les deux divisions suivantes sont réalisées par les mesures de résistance à la pénétration prises sur une racine principale et à la base du tronc respectivement pour les arbres morts et vivants et permettent à elles deux d'expliquer environ 31% de la variance. Dans les deux cas, une haute résistance à la pénétration était associée à un moment de flexion maximal plus faible (Figure 3.4).

Chez les arbres vivants, le moment de flexion est négativement associé et de façon linéaire aux mesures de résistance prises à la base du tronc (Figure 3.5 à gauche). Chez les arbres morts le moment maximal de

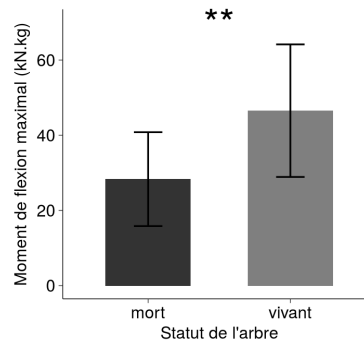


Figure 3.3: Moment de flexion maximal en fonction du statut de l'arbre. Moyenne (\pm écart type), ANOVA : $p = 0.00997$ et $p = 0.0119$ lorsque la circonférence de l'arbre est ajoutée comme co-variable.

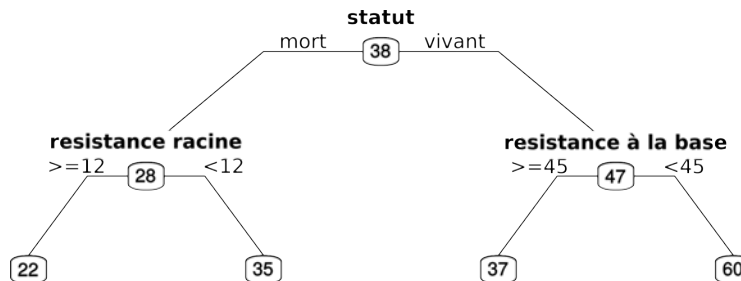


Figure 3.4: Arbre de régression expliquant le moment de flexion maximal en fonction des variables mesurées « continues » et du statut de l'arbre. Le moment de flexion maximal moyen (exprimé en kN.m) de chaque groupe est inscrit dans des encadrés.

flexion et la résistance des racines n'étaient pas associée de façon linéaire (régression linéaire, $p = 0.4819$) mais une relation non linéaire a pu être mise en évidence (Figure 3.5 à droite).

Le fait que la pénétration mesurée à la base du tronc ou sur les racines soient négativement associées au moment maximal de flexion peut s'expliquer par le fait que la résistance moyenne mesurée par le resistographe soit négativement associée à l'humidité du bois (Figure 3.6). Cette relation est cependant plus forte pour les arbres vivants que pour les arbres morts ($r_{marginal}^2 = 0.295$ et $r_{marginal}^2 = 0.084$ respectivement), une plus grande variabilité des mesures étant observée pour ces derniers. Le bois vivant et humide est plus élastique que le bois sec ce qui lui permet de se déformer sous l'effet d'une force et d'amortir l'effet de la force le rendant moins prompt à rompre.

3.4.2 Effets des indicateurs pratiques

Le second arbre de régression est composé de trois nœuds terminaux (Figure 3.7). L'erreur moyenne des prédictions est de 37.3 % et les prédictions présentent une corrélation relativement faible avec les valeurs mesurées (régression linéaire, $r^2 = 0.3252$, pente d'équation = 1 et ordonnée à l'origine = 0). La première division est réalisée par la proportion estimée de recouvrement d'écorce et explique environ 30 % de la variance. Il existe une relation positive entre le recouvrement d'écorce et le moment de flexion maximal ($\tau = 0.44$, Figure 3.1, voir section 3.1). Cette tendance s'explique en grande partie par le fait que les arbres

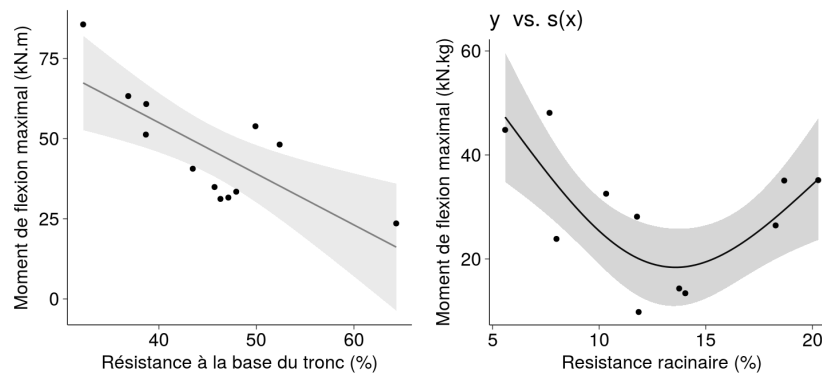


Figure 3.5: Relation entre les mesures de résistance et le moment de flexion maximal. À **gauche** avec la résistance de la base du tronc chez les arbres vivants (régression linéaire, $r^2 = 0.579$, $p = 0.004$). À **droite** avec la résistance racinaire chez les arbres morts (modèle additif généralisé, $r^2 = 0.542$, $p = 0.021$).

morts présentent une perte d'écorce plus fréquente que les arbres vivants : 7 arbres sur 11 contre 1 sur 12 avaient un recouvrement d'écorce inférieur à 100 % respectivement. Ceci résulte en une couverture d'écorce significativement plus faible chez les arbres morts (87.2 % en moyenne) que chez les vivants (99.6 % en moyenne, test de Wilcoxon : $p = 0.004$). Ces résultats suggèrent que la diminution du recouvrement d'écorce est un marqueur important de la mort des arbres suite à une infestation par l'agrile du frêne. Aucune relation entre le recouvrement d'écorce et l'humidité du bois n'a cependant pu être établie - en considérant tous les arbres (régression linéaire, $p = 0.2502$) ou seulement les arbres morts (régression linéaire $p = 0.5925$) - ce qui suggère que cette tendance n'est pas liée à un assèchement du bois.

La seconde division est réalisée par la circonférence du tronc et explique environ 3 % de la variance (Figure 3.7). Les arbres ayant une plus grosse circonférence (> 86 cm) sont capables de supporter une charge plus importante. Cependant, aucune relation n'a pu être établie entre la circonférence du tronc et le moment de flexion maximal enduré par les arbres ayant conservé toute leur écorce (régression linéaire, $p = 0.1854$). Le fait que cette division n'explique que 3 % de la variance totale et qu'aucune relation entre la circonférence du tronc et le moment de flexion maximal n'ait pu être mise en évidence suggère que ce nœud peut être négligé lors des visites de terrain et que seul le recouvrement d'écorce constitue un indicateur fiable de la solidité des arbres.

3.5 Modalités de rupture

Cette section vise à déterminer si les arbres morts déracinent différemment des arbres vivants (seuls les arbres déracinés seront considérés). Les changements d'inclinaison entre le début du treuillage et la réduction de force post-rupture (2 secondes et 5 secondes suivant la rupture) seront utilisés pour étudier le comportement des arbres durant le treuillage et après la rupture (voir section 2.4 pour plus de renseignements sur le calcul de ces indicateurs).

Aucune différence entre les arbres morts et vivants n'a été mise en évidence que ce soit en terme de réduction de la force post-rupture (Figure 3.8) ou de changement dans l'angle d'inclinaison (ANOVA : $p = 0.428$). Une tendance a cependant pu être observée pour la réduction de force post-rupture pour laquelle les arbres morts présentent une réduction plus forte que les arbres vivants, notamment 5 secondes après la rupture (18.5 % contre 8.3 % de réduction pour les arbres morts et vivants respectivement, ANOVA : $p = 0.051$, Figure

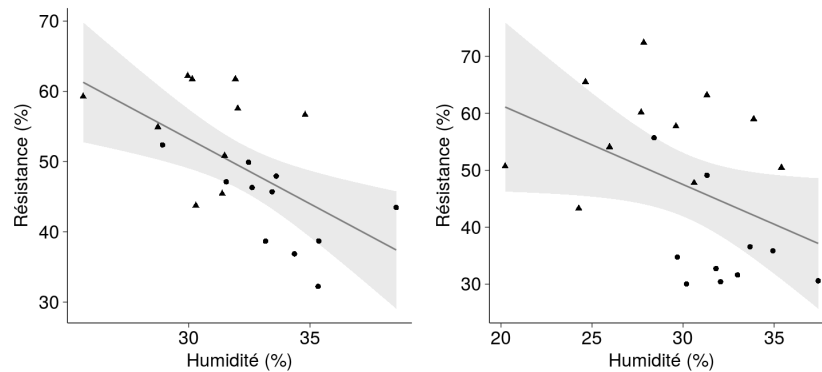


Figure 3.6: Résistance moyenne à la pénétration en fonction de l'humidité du bois. À **gauche**, pour les arbres vivants (régression linéaire en mesures répétées, $r^2_{marginal} = 0.2952$, $r^2_{conditionnel} = 0.59$, $p = 0.002$). À **droite** pour les arbres morts (régression linéaire en mesures répétées, $r^2_{marginal} = 0.084$, $r^2_{conditionnel} = 0.135$, $p = 0.033$). Les triangles correspondent aux points de mesure pris sur le tronc à 1 m de hauteur et les cercles aux points pris à la base du tronc.

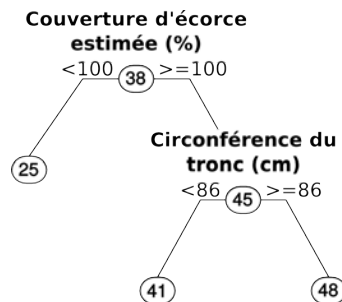


Figure 3.7: Arbre de régression expliquant le moment de flexion maximal en fonction des indicateurs pratiques et du statut de l'arbre. Le moment de flexion maximal moyen de chaque groupe est inscrit dans des encadrés.

3.8 à droite). Cette tendance suggère que les arbres morts ont tendance à déraciner plus brutalement que les arbres vivants, ce qui pourrait engendrer des risques pour les élagueurs. Des analyses supplémentaires se concentrant sur les arbres morts ont été menées afin de déterminer les facteurs contrôlant la réduction de force post-rupture.

Chez les arbres morts, la réduction de force 2 secondes après la rupture est positivement corrélée à l'humidité du bois mesurée à la base du tronc et négativement corrélée au nombre de points d'initiation des réitérats (Figure 3.9). La première tendance pourrait s'expliquer par une déformation plus importante du tronc lui permettant d'absorber une partie de la force transmise aux racines, cette force étant ensuite relâchée lors de la rupture des racines. Comme chez les arbres morts la rupture intervient pour des moments de flexion inférieurs que ceux observés chez les arbres vivants (voir section 3.3). Cette donnée pourrait être essentielle pour la sécurité des travailleurs. Le nombre de points d'initiation des réitérats était corrélé négativement à l'humidité mesurée à la base du tronc ce qui peut expliquer son effet sur la réduction de force post-rupture (régression linéaire : $p = 0.032$, $r^2 = 0.458$). Cependant, le lien entre le nombre de points d'initiation de réitérats et l'humidité à la base du tronc n'est pas clair.

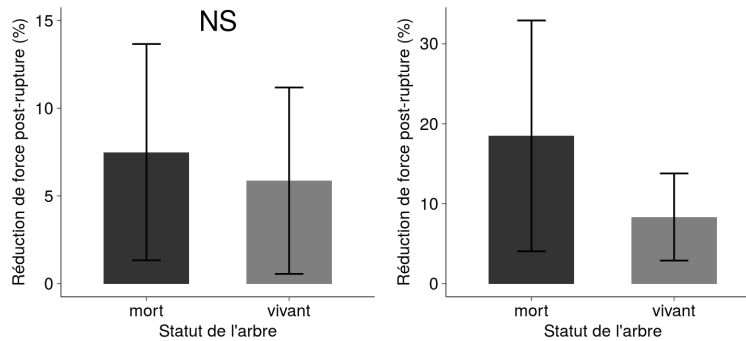


Figure 3.8: Réduction de la force 2 secondes (à **gauche**, ANOVA, $p = 0.334$) et 5 secondes (à **droite**, ANOVA : $p = 0.0514$) après la rupture primaire, exprimée en proportion de la force au moment de la rupture, pour les arbres morts et vivants.

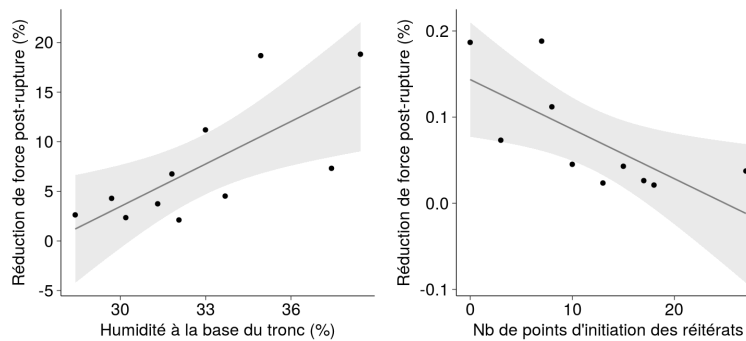


Figure 3.9: Réduction de la force 2 secondes après la rupture primaire exprimée en proportion de la force au moment de la rupture chez les arbres morts. À **gauche**, en fonction de l'humidité mesurée à la base du tronc (régression linéaire, $r^2 = 0.527$, $p = 0.011$). À **droite**, en fonction du nombre de points d'initiation des réitérats (régression linéaire, $r^2 = 0.494$, $p = 0.023$, une donnée aberrante supprimée).

La réduction de force 5 secondes après la rupture était négativement corrélée à la résistance racinaire (Figure 3.10). Ceci peut s'expliquer par une rupture plus brutale des racines lorsque le bois est plus humide (en considérant qu'une haute résistance à la pénétration est synonyme d'un bois plus sec, voir section 3.4.1). Ceci suggère que, comme la base du tronc, les racines plus flexibles sont à même d'amortir une partie de la force transmise à l'arbre, résultant en une rupture plus brutale lorsque la limite de plasticité est atteinte.

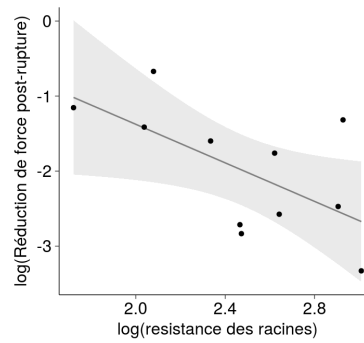


Figure 3.10: Réduction de la force 5 secondes après la rupture primaire exprimée en proportion de la force au moment de la rupture en fonction de la résistance des racines à la pénétration chez les arbres morts (régression linéaire, $r^2 = 0.389$, $p = 0.04$).

4 — Discussion

Les résultats suggèrent une perte de résistance du bois à la pénétration - mesurée à l'aide d'un résistographe - des arbres morts au niveau de la base du tronc, tel qu'observé dans une étude précédente (Persad *et al.*, 2013). Cette tendance s'inverse cependant au niveau des racines où la résistance à la pénétration était plus forte chez les arbres morts tandis qu'aucune différence n'est observée au niveau du tronc (Figure 3.2). Ces changements de résistance du bois à la pénétration ont d'ailleurs pu être associés à une diminution du moment de flexion maximal, c'est à dire une diminution de la force pouvant être appliquée à un arbre avant de produire une rupture primaire (Figures 3.3 et 3.4), et ce, malgré une différence de taille entre les arbres morts et vivants. Les résultats montrent donc que la mort des arbres entraîne une diminution de leur résistance à des charges statiques qui résulte d'une modification des propriétés du bois. Une étude précédente a rapportée une absence de différence de résistance mécanique entre des arbres sains et des arbres malades (van Wassenaeer *et al.*, 2016). Ceci suggère que les frênes ne perdent de leur résistance mécanique qu'après leur mort.

Dans cette étude, une forte résistance à la pénétration a pu être attribuée, en partie, à une diminution de l'humidité dans le bois (Figure 3.6). Cependant, comme le résistographe mesure également la densité du bois (Downes *et al.*, 2018) l'augmentation de la résistance à la pénétration observée dans les racines et sa diminution dans le tronc ne peuvent pas être attribuées avec certitude à une différence d'humidité du bois. Ainsi, il reste difficile de se prononcer sur les causes de la diminution de la résistance mécanique des arbres morts. Il serait pour cela nécessaire de déterminer la force de la relation humidité/résistance à la pénétration dans les racines, ce qui n'a pas pu être fait dans cette étude.

Cependant, on peut considérer que l'utilisation du résistographe reste pertinente pour identifier des tendances à l'intérieur des groupes (i.e. pour les arbres morts et vivants séparément). Ainsi, les arbres vivants offrant une faible résistance à la pénétration à la base du tronc peuvent accepter une plus grande charge (Figures 3.4 et 3.5). Comme la rupture primaire intervient essentiellement au niveau des racines, il est possible qu'une diminution de la flexibilité du bois à la base du tronc (associée à une forte résistance à la pénétration) réduise sa capacité à se déformer et à absorber la force. Ce qui conduit à transmettre plus de force aux racines, induisant leur rupture. Nos résultats montrent également qu'une forte résistance du bois à la pénétration au niveau des racine est associée à une réduction de la résistance mécanique (Figure 3.4). Là encore, une diminution de la plasticité des racines, pouvant être causée par un assèchement (potentiellement lié au temps écoulé depuis la mort de l'arbre et aux conditions du site), pourrait être à l'origine de ce résultat. Il apparaît cependant possible que la relation entre la résistance des racines à la pénétration et le moment de flexion maximal puisse être plus complexe (Figure 3.5). Ainsi, la solidité des racines pourrait résulter d'une interaction entre flexibilité et humidité vs. densité du bois. Cependant, ce point devra être éclairci lors de futures recherches.

Lorsque les indicateurs pratiques sont utilisés pour prédire le moment de flexion maximal, seul le recouvrement d'écorce estimé semble être fiable (section 3.4.2 et Figure 3.7). Les arbres ayant conservé une plus grande proportion d'écorce peuvent généralement accepter une charge plus importante. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que le recouvrement d'écorce soit assez fortement associé à la résistance à la base du tronc et au statut des arbres (Figure 3.1 et 4.1 en haut). Ce résultat confirme par ailleurs une observation

faite sur le terrain, à savoir que la perte rapide de l'écorce peut être associée à la mort des arbres des suites d'une infestation par l'agrile de frêne.

Les analyses visant à expliquer le moment de flexion maximal montrent par ailleurs que les variables mesurées de façon continue permettent de réaliser de meilleures prédictions que les indicateurs pratiques. Ceci peut s'expliquer par une meilleure estimation des propriétés du bois par les mesures continues, notamment les mesures prises au résistographe. Il semblerait cependant que ces mesures puissent être approximées par une combinaison de plusieurs indicateurs pratiques. La résistance à la pénétration de la base du tronc est associée positivement au recouvrement d'écorce (plus le recouvrement d'écorce est important, plus la résistance est grande) et négativement à la classe de dégradation de la structure (plus l'arbre est classé dans un stade de dégradation avancé, plus la résistance diminue). Dans un même temps, la résistance des racines à la pénétration est positivement associée à la classe de dégradation des racines (plus l'arbre est classé dans une classe de dégradation avancée, plus la résistance est forte). Ces relations peuvent cependant s'expliquer par une différence significative de la résistance à la pénétration dans le tronc et les racines entre les arbres morts et vivants (voir section 3.3). Ceci se traduit notamment par une association significative du recouvrement d'écorce estimé et de la classe de dégradation des racines avec le statut de l'arbre (Figure 3.1). Ainsi, seule la classe de dégradation de la structure est associée aux propriétés du bois (ici la résistance de la base du tronc à la pénétration) indépendamment du statut de l'arbre. Il s'agit cependant d'une observation indirecte puisque la classe de dégradation de la structure ne caractérise que la couronne des arbres. De plus, il semble que la résistance à la base du tronc et celle des racines ne soient utiles que pour les arbres vivants et morts respectivement.

Par ailleurs, aucun arbre de l'étude n'a été classé dans les classes de dégradation les plus avancées (4 ou 5) en ce qui concerne l'état de dégradation du tronc ou des racines. Ceci suggère soit que ces classes pourraient être revues pour mieux s'ajuster à l'état de dégradation moyen observé sur site (i.e. à la population d'arbres morts de la région concernée), soit que ces classes devraient être testées sur un échantillonnage présentant une plus grande variabilité de dégradation.

Les résultats obtenus avec les mesures continues suggèrent que le statut de l'arbre est le premier facteur à déterminer lors d'un diagnostic. Pour cela, une estimation visuelle de la proportion de la couronne encore en feuille est nécessaire. Lors de visites hivernales, le recouvrement d'écorce, la classe de dégradation du tronc et la classe de dégradation des racines semblent être de bons indicateurs pour déterminer le statut de l'arbre (Figure 3.1). Un arbre de décision intégrant le recouvrement d'écorce estimé et la moyenne des classes (i.e. du tronc et des racines) a permis de classer correctement 20 des 23 arbres de l'étude selon leur statut (un arbre mort déclaré vivant et deux arbres vivants déclarés morts, Figure 4.1 en haut). Une fois le statut de l'arbre déterminé, la classe de dégradation des racines et les estimations visuelles de recouvrement d'écorce pourront être utilisées pour déterminer les pertes de résistance mécanique des arbres morts (dégradation avancée + faible recouvrement d'écorce = arbre moins solide, Figure 4.1 en bas). Il est cependant nécessaire de rappeler que la relation entre le moment de flexion maximal et le recouvrement d'écorce, et celle entre le moment de flexion maximal et la classe de dégradation des racines ne sont pas significatives lorsque l'on considère les arbres morts uniquement, ce qui suggère que le statut de l'arbre reste le principal critère pour juger de sa résistance mécanique.

L'étude du comportement des arbres suite à leur rupture a permis d'identifier trois facteurs permettant d'expliquer la réduction de force post-rupture, qui est considérée comme un indicateur de la brutalité de cette dernière. Ainsi, des arbres dont la base est humide, qui présentent peu de rejets et une faible résistance des racines sont susceptibles de déraciner plus brutalement (section 3.5). Lors d'interventions sur le terrain, ces éléments devront être pris en compte afin de réduire les risques d'accident liés à une rupture trop brutale. Ainsi, le nombre de rejets et la classe de dégradation des racines pourront être utilisés afin de prévoir la brutalité de la rupture. Il faut cependant noter que les arbres susceptibles de céder le plus brutalement sont

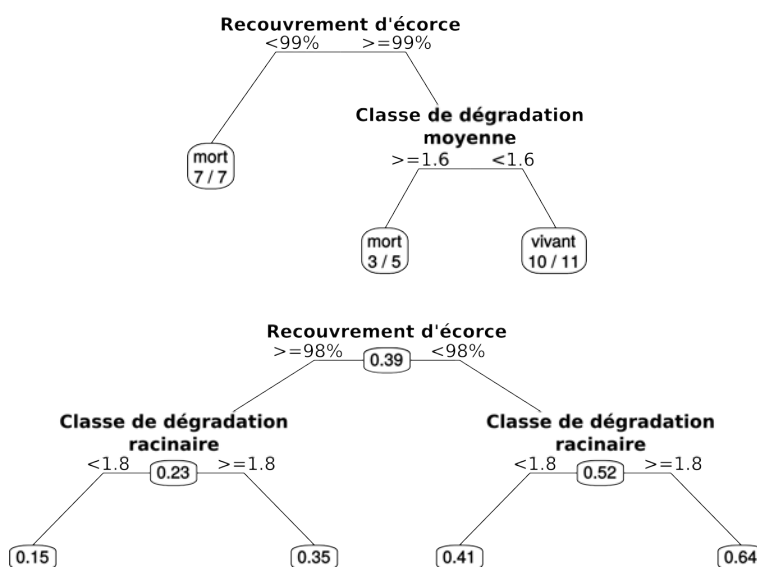


Figure 4.1: Méthode de diagnostic de perte de résistance mécanique des arbres morts. En **haut**, l'arbre de décision permettant de déduire le statut de l'arbre à partir d'observations du recouvrement d'écorce et de la classe de dégradation moyenne (moyenne entre la classe de dégradation du tronc et des racines). Les encadrés présentent le nombre d'arbres correctement classifié / le nombre d'arbres total dans le nœud. Le taux de classifications correctes est de 87%. En **bas**, arbre de régression expliquant la perte de résistance mécanique des arbres morts (1 -moment de flexion maximal / moment de flexion maximal moyen de arbres vivants) en fonction du recouvrement d'écorce observé et de la classe de dégradation des racines (arbre de régression construit avec un minimum de deux observations par nœud terminal ; régression linéaire des valeurs observées en fonction des prévues, $r^2 = 0.498$, $p = 0.0152$).

également ceux qui peuvent accepter une plus grande charge.

Aucune différence dans la variation de l'inclinaison des arbres entre le début des tests et au moment de la rupture n'a été observée. Cependant, une étude précédente avait noté que le tronc d'arbres parfaitement sains était plus souple que celui d'arbres dépérissants (van Wassenae *et al.*, 2016). Ces résultats suggèrent que la perte de flexibilité est concomitante avec le dépérissement des arbres et qu'elle ne se poursuit pas nécessairement après leur mort. Une recherche plus approfondie, notamment en mesurant directement l'élasticité du bois d'arbres morts, serait nécessaire afin de confirmer cette interprétation.

Dans l'ensemble, cette étude a permis de mettre à jour une perte de résistance mécanique du tronc et des racines des arbres associée à leur mort suite à une infestation par l'agrile du frêne. Ces résultats permettront d'une part de mieux diagnostiquer les risques liés aux arbres morts, que ce soit dans la perspective de protection du public ou des infrastructures, ou dans la perspective de définir des conditions de travail sécuritaire pour les élagueurs. Malgré tout, la compréhension de plusieurs aspects de cette problématique restent encore à étudier :

- L'agrile entraîne-t-il une perte de résistance des points d'attaches des élagueurs, au niveau des fourches et des branches maîtresses ?
- Les fissures présentes sur les branches (Persad *et al.*, 2013) entraînent-elles une perte de résistance à la torsion (Avalos et Sánchez, 2014) pouvant induire des risques pour les élagueurs qui pourraient produire ce type de moment de force lors de leur déplacement dans les arbres ?

- Quelles sont les conditions menant à un bris du tronc plutôt qu'à un déracinement ?
- À quelle vitesse la dégradation de la structure intervient-elle ? Et quel est son effet sur les risques associés aux arbres morts à moyen et à long terme ?
- Quel sera l'effet à long terme des traitements contre l'agrile du frêne réalisés par injection à la base des arbres en lien avec l'apparition éventuelle de pourriture ?

Ces points devront faire l'objet d'une recherche approfondie afin de garantir une gestion optimale des conséquences de l'épidémie d'agrile du frêne.

5 — Recommandations pratiques

Cette étude a permis d'observer les risques associés à la mort des frênes et d'estimer la perte de résistance mécanique qui en est la cause à l'aide d'indicateurs pouvant être utilisés par les praticiens lors de visites de terrain. Le statut de l'arbre est le facteur principal de perte de résistance de la structure. Lors de visites de terrain estivales, la proportion de couronne vivante et la taille des feuilles pourront être utilisées afin de déterminer si un flux de sève est maintenu dans le tronc. Les arbres ayant moins de 5 % de couronne vivante et présentant des feuilles peu développées seront considérés comme morts. Lors de visites hivernales, les arbres ayant perdu de l'écorce ou dont les racines et le tronc sont dégradés seront considérés comme morts.

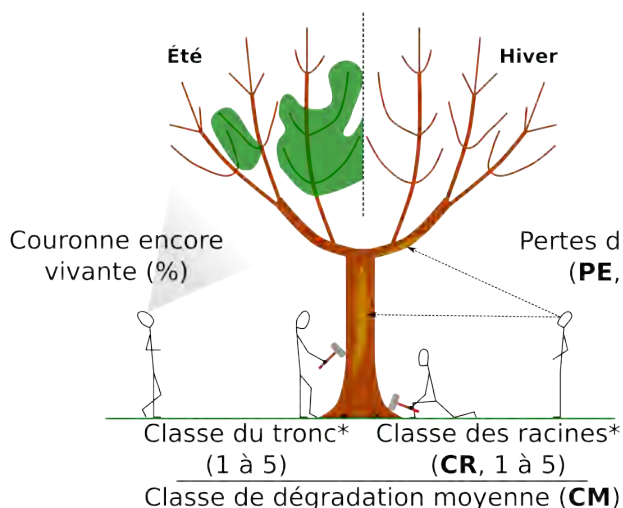
Une fois le statut des arbres déterminé, la perte de résistance mécanique des arbres morts peut être estimée à partir du recouvrement d'écorce et de la classe de dégradation des racines.

Il n'existe à l'heure actuelle aucune information indiquant que le tronc et/ou les racines d'arbres malades mais toujours en vie soient moins résistants que ceux d'arbres sains. Lors d'interventions de démontage sur des arbres malades, les précautions et techniques habituelles pourront donc être mises en place. Lors d'interventions sur des arbres morts, la perte de résistance (exprimée en pourcentage de la résistance d'un arbre sain moyen) devra, en premier lieu, être estimée. Les techniques mises en place devront être ajustées en fonction de ces estimations. Lors d'un démontage utilisant un cylindre de rétention, le poids des tronçons débités devra être réduit en proportion de la perte de résistance estimée. Par exemple, si la perte de résistance mécanique estimée est de 10 % le poids des tronçons devra être réduit de 10 %.

Le document présenté sur la page suivante propose un guide visant à fournir aux praticiens les outils nécessaires afin de diagnostiquer la perte de résistance mécanique des arbres morts et d'ajuster leurs interventions en conséquence.

Guide de diagnostic de la résistance mécanique des frênes morts

Étape 1 : estimation des marqueurs



*Les classes de dégradation doivent être évaluées par deux opérateurs à l'aide d'un marteau. Les sons sourds et creux sont des signes de dégradation de la structure. Les estimations sur le tronc sont réalisées à 1 m au dessus du sol. Celles sur les racines sont faites sur les contreforts des racines ou à la base du tronc.

Étape 2 : détermination du statut de l'arbre

Lors de **visites estivales** :

Plus de 5% de la couronne vivante.....**vivant**

Moins de 5% de la couronne vivante.....**mort**

Lors de **visites hivernales**

CM	PE	Aucune perte	Perte d'écorce
		Inférieure ou égale à 1.6	vivant
Supérieure à 1.6		mort	-

Étape 3 : estimation des pertes de résistance et marche à suivre

Pour un arbre **vivant**

Estimation des risques et marche à suivre établies via les méthodes habituelles

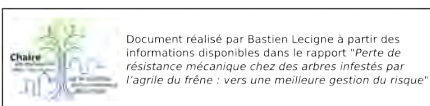
Pour un arbre **mort**

Estimation de la perte de résistance**

CR	PE	2% et moins	plus de 2%
	Inférieure ou égale à 1.8		15% (-3.3 à 24.6)
Supérieure à 1.8		35% (30 à 39.5)	64% (43.1 à 78.9)

**Une attention particulière doit être portée aux intervalles (minimum et maximum observé) afin de réaliser des interventions de façon sécuritaire

Lors d'opérations de démontage utilisant un cylindre de rétention, le poids des tronçons coupés devrait être ajusté proportionnellement à la perte de résistance estimée.



6 — Bibliographie

van Wassenaeer, P., Satel, A. L., Persad, A. B. et Detter, A. 2016. Assessing the effects of emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire) on stem structural properties and uprooting behaviour of ash trees. *Summary of a Canadian TREE Fund-supported research project*.

Persad, A. B., Siefer, J., Montan, R., Kirby, S., Rocha, O. J., Redding, M. E. et Jones, A. W. 2013. Effects of Emerald Ash Borer Infestation on the Structure and Material Properties of Ash Trees. *Arboriculture Urban Forestry*, 39(1), 11-16.

Meunier, S., Ruel, J. C., Laflamme, G., et Achim, A. 2002. Résistance comparée de l'épinette blanche et du sapin baumier au renversement. *Canadian journal of forest research*, 32(4), 642-652.

Downes, G. M., Lausberg, M., Potts, B. M., Pilbeam, D. L., Bird, M., et Bradshaw, B. 2018. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts. *Australian Forestry*, 81(3), 177-185.

Avalos, J., et Sánchez, A. 2014. Evaluation of Failure Criteria in Branch Members Under Torsion and Bending Moment. *Arboriculture Urban Forestry*, 40(1), 36-45.