



HAL
open science

Biomécanique et propension à la casse des branches : le cas de la casse estivale

Arnoul VAN ROOIJ

► **To cite this version:**

Arnoul VAN ROOIJ. Biomécanique et propension à la casse des branches : le cas de la casse estivale. Biomécanique [physics.med-ph]. Clermont Université, 2023. Français. NNT: . tel-04281436

HAL Id: tel-04281436

<https://hal.science/tel-04281436v1>

Submitted on 12 Nov 2023

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

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



**THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ
CLERMONT-AUVERGNE**

École doctorale Sciences Pour l'Ingénieur
Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Spécialité : mécanique

présentée par

Arnoul VAN ROOIJ

**Biomécanique et propension à la casse des
branches : le cas de la casse estivale.**

Soutenue le 10 Juillet 2023
Devant le jury composé de :

M. FOURNIER	INRAE Grand Est-Nancy, Nancy	Rapporteure
C. ELOY	Centrale Méditerranée, IRPHE, Marseille	Rapporteur
P. MOITY-MAIZI	Institut SupAgro, SENS, Montpellier	Examinatrice
M. MATSUO	Kyoto University, RISH, Uji (JP)	Examinatrice
Y. Forterre	CNRS, IUSTI, Marseille	Président du jury
G. GODI	UCA, IP, Clermont-Ferrand	co-Encadrant de thèse
E. BADEL	INRAE, PIAF, Clermont-Ferrand	co-Directeur de thèse
J. GRIL	CNRS, PIAF, IP, Clermont-Ferrand	Directeur de thèse
J-F. BARCZI	CIRAD, AMAP, Montpellier	Invité
T. ALMERAS	CNRS, LMGC, Montpellier	Invité
V. DELLUS	Expert-Conseil arboriste, Nantes	Invité

Résumé

L'étude des branches d'arbre a souvent été délaissée au profit de celle des troncs. Pourtant, leur simple posture constitue un défi à la gravité qui a de quoi impressionner. Bien que semblant largement surdimensionnées mécaniquement, il arrive que sous la pression d'un environnement fluctuant, ces branches cassent. Si dans la plupart des cas, les causes sont identifiées, il reste des situations où le mystère reste entier ; en témoigne le phénomène des « casses estivales » : des chutes de branches en fin de journées chaudes, sans vent. Ces branches ne montrent a priori aucun signe de faiblesse particulier, et l'analyse post-mortem par les experts ne permet pas de comprendre le phénomène sous-jacent à ces ruptures brutales. Dans un contexte de réchauffement des villes, les politiques de développement des espaces arborés pour atténuer les îlots de chaleur urbains se développent, et cette problématique des chutes brutales devient un enjeu important. Pour aborder cette question complexe, nous avons proposé une approche pluridisciplinaire. Des enquêtes ont été réalisées à travers la presse ainsi qu'auprès des gestionnaires et des experts de l'arbre urbain, afin de récolter des informations principalement concentrées chez ces praticiens. Elles ont permis de faire ressortir quelques pistes de recherche. D'un point de vue théorique, la rupture des branches ne pouvait être étudiée sans aborder le volet de leur état mécanique. Un modèle numérique a donc été développé pour simuler la mise en place des contraintes longitudinales dans une branche lors de sa croissance ; laquelle conduit inexorablement à une augmentation de ses dimensions et de sa masse. Appliqué à des maquettes virtuelles de branches, ce modèle a permis d'évaluer les performances et rôles mécaniques respectifs des moteurs du contrôle postural d'une branche en distinguant les stratégies des groupes feuillus et résineux. Enfin, différents volets expérimentaux ont visé à alimenter et/ou tester ce modèle. Ces travaux ont aussi permis de mettre en évidence des marqueurs intrinsèques de la branche ou des conditions environnementales (la saison) qui semblent affecter le critère de surdimensionnement des branches et donc, a priori, leur tenue à la rupture. L'ensemble de ces travaux ouvre de nombreuses perspectives expérimentales et de modélisation, afin de confirmer et élargir ces premiers résultats à une plus large gamme d'essences. Au-delà de la question initiale de la casse estivale, ce projet s'inscrit dans un thème plus large de compréhension du fonctionnement biomécanique des branches, qui leur permet d'assurer leur pérennité tout au long de leur développement malgré leurs dimensions et poids croissants, et l'environnement fluctuant dans lequel elles évoluent.

Mots clés : biomécanique, branches, contraintes de croissance, rupture, arbre urbain, température.

Abstract

The study of tree branches has often been neglected in favour of that of tree trunks. However, their simple posture is an impressive challenge to gravity. Although they appear to be mechanically oversized, they can break under the pressure of a fluctuating environment. In most cases the causes are identified. But there are still situations where the mystery remains ; an excellent example of this is the phenomenon of summer breakage, where branches fall at the end of hot, windless days. These branches do not show any particular sign of weakness, and the post-mortem analysis by the experts does not make it possible to understand the phenomenon underlying these sudden breaks. In a context of warming cities during heat waves and policies to develop tree spaces to mitigate urban heat islands, this problem of sudden falls becomes an important issue. To address this complex issue, we proposed a multidisciplinary approach. Surveys were carried out through the press as well as with managers and experts in urban trees in order to gather information mainly concentrated among these specialists. These surveys allowed us to identify a number of potential topics for research. From a theoretical point of view, the failure of branches could not be studied without considering their mechanical state. A numerical model was therefore developed to simulate the implementation of longitudinal stresses in a branch during its growth, which inexorably leads to an increase in its dimensions and mass. Applied to virtual models of branches, this model made it possible to evaluate the respective performances and mechanical roles of the motors of postural control of a branch by distinguishing the strategies of the hardwood and softwood groups. Finally, various experimental components aimed to feed and/or test this model. This work also made it possible to highlight intrinsic markers of the branch or environmental conditions (the season) that seem to affect the oversize characteristic of branches and therefore, a priori, their resistance to breakage. All of this work opens up numerous experimental and modelling perspectives, in order to confirm and extend these initial results to a wider range of species. Beyond the initial question of summer limb drop, this project is part of a broader theme of understanding the biomechanics of branches, which enables them to ensure their durability throughout their development despite their increasing size and weight, and the fluctuating environment they experience.

Key words : biomechanics, branches, growth stress, summer limb drop, breakage, urban tree, temperature.

Remerciements

Ces travaux de thèses n'auraient pas été possibles sans Joseph Gril, qui est la première personne que je tiens à remercier. Merci de m'avoir fait découvrir le monde de la science académique tout d'abord, puis celui de la science du bois. Ta passion est contagieuse, ton esprit en permanente ébullition est autant passionnant qu'éprouvant. Tu as été bien plus qu'un directeur de thèse, et je te remercie pour ton temps, ta disponibilité, tes conseils, ton implication sage et avisée dans mes plans de carrière. La thèse n'est pas seulement 3 ans de recherche, c'est un temps particulier de découverte d'un monde et de construction personnelle. Sur ce point, tu as su m'accompagner et dépasser de loin mes attentes. Tu es inspirant et j'ai eu la chance de croiser ton chemin. Merci !

En deuxième lieu, mes remerciements vont naturellement à Éric Badel, qui a eu la lourde tâche d'accompagner un modélisateur endurci sur le chemin de l'expérimentation. Merci pour les moments passés ensemble, dans les arbres et en laboratoire. Merci pour les discussions et les conseils, ta compréhension quand ma situation personnelle a évolué, et ton adaptabilité. Corriger une thèse sur LaTeX, qui l'aurait cru ? C'était un plaisir de travailler avec toi, ton pragmatisme a été fondamental dans la construction de ce projet, et je tacherais de m'en inspirer pour la suite.

Merci à Gael Godi, qui vient compléter mon encadrement. Si initialement tu n'étais pas prévu dans le pilotage de cette thèse, ta disponibilité et ton aide ont fait de toi un encadrant logique. Merci de ta patience et de ta persévérance. Quand je pense qu'il nous a fallu quasiment un an de développement pour arriver à des capteurs qui tiennent un minimum la route ! Un an de débarquement et d'appels à l'improviste, que tu as toujours satisfait ! Merci également pour ton aide sur des sujets d'analyses et de traitement des données. Sans toi, la campagne expérimentale d'instrumentation n'aurait pas été celle qui est présentée dans ces travaux !

Merci à tous les membres de jury, dont beaucoup ont été de véritables supports dans cette aventure collective. Je pense à Tancrède Alméras, dont les conseils scientifiques m'ont été fort utiles. Par ta grande connaissance et ton recul sur la modélisation en biomécanique, tu m'as beaucoup apporté ! Merci à Pascale Moity-Maïzi de m'avoir fait découvrir le monde des sciences collaboratives. C'était un volet qui me tenait à cœur, et travailler avec toi était un réel plaisir ! Merci à Jean Francois Barzi, Yves Caraglio et Francois de Coligny pour leur implication et leur aide sur le volet numérique. Plus particulièrement, je tenais à te remercier Jeff, pour l'accueil que tu m'as fait à Montpellier, et pour les discussions que l'on a pu avoir

au cours de ce travail. Merci à Miyuki Matsuo d'avoir pris le temps d'en lire la traduction et d'échanger avec moi sur le sujet. Merci évidemment aux rapporteurs Meriem Fournier et Christophe Eloy, qui ont pris le temps de lire et commenter ce manuscrit. Merci aussi à Yoel Fortereterre d'avoir présidé ce jury.

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans Stéphane Ploquin. Merci des heures passées avec moi, que ce soit au labo, au pied des arbres, ou entre deux branches ! Ça a été un véritable plaisir de travailler avec toi, tu m'as familiarisé avec un aspect de la recherche que je ne connaissais pas. Au-delà du simple travail effectué ensemble, nos nombreuses conversations sur des sujets divers et variées me laisseront un très bon souvenir. Tu as été un vrai partenaire, je ne t'oublierai pas !

Merci à Vincent Dellus, d'avoir relu mon manuscrit et donné son avis d'expert. Plus généralement, merci à l'ensemble de la communauté des professionnels de l'arbre urbain pour leur implication dans le volet social de cette thèse. Un merci particulier à Patrick Bujon, pour l'aide dans mon analyse et les expérimentations au parc de Sceaux !

Merci à l'UMR PIAF et à l'Institut Pascal, de m'avoir accueilli et donné une ambiance de travail productive et saine.

Merci à ma famille, sans laquelle je ne serai pas arrivé jusque-là.

Enfin, merci à Pauline de m'avoir épaulé tout au long de ce projet. C'était une expérience riche en émotion et tu as su être là quand j'en avais besoin. Merci d'avoir supporté mes nuits courtes et tendue, merci à Jude de les avoir multipliés. Vous avez éclairé cette fin de thèse, je vous aime !

Table des matières

Résumé	1
Abstract	3
Remerciements	5
Nomenclature	11
Introduction générale	33
1 Synthèse bibliographique	37
1.1 Structure et anatomie du bois dans l'arbre	38
1.2 Propriétés mécaniques du bois	42
1.3 Le contrôle postural de l'arbre	45
1.4 Biomécanique des branches : un panorama	59
1.5 Conclusion	65
2 Enquête : la casse des branches dans la société	67
2.1 Introduction	68
2.2 Analyse de presse	68
2.3 Sciences collaboratives	75
2.4 Conclusion	93
3 Régulation de la température dans les branches	95
3.1 Introduction	96
3.2 Matériel et méthodes	100

3.3	Préambule théorique	107
3.4	Résultats et discussions	109
3.5	Conclusion	123
4	Modélisation du champ de contraintes dans les sections de branches	125
4.1	Introduction	126
4.2	Cadre analytique et hypothèses	126
4.3	Modélisation de la section	127
4.4	Modèle numérique	131
4.5	Validation du modèle : solution semi-analytique	134
4.6	Améliorations du modèle et perspectives	141
4.7	Conclusion	143
5	Action du poids propre et maintien de la posture : vers une meilleure compréhension du dimensionnement des branches	145
5.1	Introduction	146
5.2	Maquettes virtuelles d'arbres numériques	146
5.3	Application du modèle à l'étude des stratégies de redressement : cas feuillu vs résineux	153
5.4	Mesures de l'évolution spatio-temporelle de l'excentricité et des déformations de maturation	162
5.5	Conclusion	174
6	Sensibilité du modèle mécanique et facteurs impliqués dans la tenue d'une branche à la rupture	177
6.1	Introduction	178
6.2	Matériel et méthode	178
6.3	Résultats et discussions	185
6.4	Conclusion	191
7	Dimensionnement des branches face à leur poids propre	193
7.1	Introduction	194
7.2	Matériels et méthode	194

7.3	Résultats et discussion	197
7.4	Complément d'étude : modélisation des essais de sciage	203
7.5	Conclusion	216
8	Modèle élastoplastique et conséquences sur le risque de rupture des branches	217
8.1	Introduction	218
8.2	Développement de la formulation élastoplastique	218
8.3	Illustrations	221
8.4	Conclusion	226
	Conclusion générale et perspectives	227
	Bibliographie	233
A	Enquête participative : évolutions du questionnaire	251
A.1	Questionnaire original, diffusé en décembre 2020	252
A.2	Questionnaire mis à jour, diffusé en janvier 2022	255
B	Mesure du retrait au séchage : résultats annexes.	259
B.1	Échantillonnage des barreaux prélevés dans les tronçons : sections réelles et jumelles théoriques	259
B.2	Caractérisation de l'incertitude liée à la méthode de mesure	260
B.3	Résultats des mesures de retrait longitudinal pour chacune des sections.	261
C	Calcul des caractéristiques géométriques d'un cône avec défilement linéaire	263
D	Caractériser le mouvement des branches au vent : expérimentations préliminaires	267
D.1	Présentation des capteurs	267
D.2	Dimensionnement, conception et étalonnage	268
D.3	Premiers résultats, limites et perspectives.	272
D.4	Conclusion	277

Nomenclature

Abréviations

AMF	Angle des micro-fibrilles
BF	Basses fréquences
BT, BC, BN, BO	Bois de tension, bois de compression, bois normal, bois opposé
DLM	Déformations longitudinales de maturation
DTM	Déformations transverses de maturation
EF	Éléments finis
HF	Hautes fréquences
PSF	Point de saturation des fibres
REQM	Racine de l'écart quadratique moyen
UC	Unité de croissance

Variables grecques

α, β	Déformation moyenne dans le nouveau cerne, différentiel de maturation dans le nouveau cerne (\emptyset)
γ	Angle de la branche avec l'horizontal (rad)
γ_k	Maillage adaptatif : angle couvert par chaque éléments du k -ième cerne (rad)
$\delta X, dX, \Delta X$	Paramètre X : variation finie, variation infinitésimale, variation macroscopique
$\Delta\sigma_h$	Essai de sciage : incrément de contrainte faisant suite à une coupe d'une profondeur h (MPa)

ϵ	Déformation longitudinale (\emptyset)
ζ	Défilement de la branche (\emptyset)
η_h	Indicateur de surdimensionnement (\emptyset)
$\lambda_{M,N,L}, \nu_{M,N,L}$	Lois allométrique $M(R), N(R), L(R)$ en puissance : coefficients allométriques
λ_b, ν_b	Coefficients allométriques régissant l'évolution de l'épaisseur d'écorce en fonction du rayon
μ	Déformation de maturation (\emptyset)
$\mu_{BT}, \mu_{BC}, \mu_{BN}, \mu_{BO}$	Déformation de maturation longitudinale dans le bois de tension, bois de compression, bois normal et bois opposé (\emptyset)
ξ	Modèle conique de la branche : défilement (\emptyset)
Π	Modèle élastoplastique : seuil plastique en compression (MPa)
ρ	Masse volumique (kg.m^{-3})
ρ_{eau}	Masse volumique de l'eau (kg.m^{-3})
θ	Position circonférentielle dans la section (rad)
θ_h	Essai de sciage : angle de coupe associé à la profondeur h (rad)
σ	Contrainte longitudinale (MPa)
$\sigma_{BT}, \sigma_{BC}, \sigma_{BN}, \sigma_{BO}$	Contrainte de maturation longitudinale dans le bois de tension, bois de compression, bois normal et bois opposé (MPa)
σ_0	Contrainte de maturation (MPa)
σ_b	Contrainte dans l'écorce (MPa)
σ_{ini}	Essai de sciage : champs de précontrainte initial (MPa)
χ	Rapport de la longueur au centre de gravité à la longueur totale de la branche ; indicateur de sa morphologie (\emptyset)
$\tau_{conv}^r, \tau_{conv}^l$	Temps caractéristiques de convection dans la direction radiale, longitudinale (s)
$\tau_{diff}^r, \tau_{diff}^l$	Temps caractéristiques de diffusion dans la direction radiale, longitudinale (s)
ϕ	Flux d'énergie convective (W.m^{-2})
ω	Rotation de l'axe autour de l'axe y'

Variables latines

$A_l^k, B_l^k, C_l^k, D_l^k$	Maillage adaptatif : coordonnées du quadrilatère Q_l^k défini par les indices (k, l)
a, b	Déformation de la moelle (\emptyset), courbure (m^{-1})
C_p	Capacité thermique du bois vert à pression constante ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
\mathcal{C}_k	Maillage adaptatif : k -ième cercle
D	Diamètre de la section (m)
d_h	Essai de sciage : largeur du fond d'entaille (m)
E, E_b	Module d'Young du bois, module d'Young de l'écorce (MPa)
$e(r), \bar{e}(r), e_k$	Excentricité locale au rayon r ; excentricité moyenne; excentricité du k -ième cerne (\emptyset)
e_b	Épaisseur de l'écorce (m)
f_p	Mesure de température : : fraction du rayon local (écorce exclue) de la sonde en position p (%)
F	Force imposée par le chargement de la branche (N)
G	Taux de restitution d'énergie élastique ($J.m^{-2}$)
\vec{g}	Vecteur accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)
h, h_c, h_t	Essai de sciage : profondeur d'entaille, profondeur d'entaille critique avant rupture, hauteur de la section correspondante (m)
$I(S)$	Moment d'inertie de la section S (m^4)
$I_c(X)$	Intervalle de confiance à 95% de la variable X
IS_1, IS_2	Indices de Sobol du premier et second ordre (\emptyset)
L_p	Mesure de température : profondeur de la sonde en position p (m)
\vec{k}	Coefficient de diffusion thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
K, F	Matrice de rigidité, vecteur des efforts extérieurs
K_n, F_n	Coefficients de rigidité d'ordre n , coefficients des efforts extérieurs; calculés numériquement
K_n^{th}, F_n^{th}	Coefficients de rigidité d'ordre n , coefficients des efforts extérieurs; calculés de façon analytique

L, L_g	Longueur de la branche (ou de la forme géométrique la représentant), distance entre l'insertion de la branche et le centre de gravité (m)
L_s	Essai de sciage : distance entre le trait de scie et le centre de gravité de la branche (m)
$L_n, V_n, D_n, m_n, \gamma_n$	Modélisation des branches : longueur (m), volume (m^3), diamètre (m), masse (kg) et angle d'insertion ($^\circ$) avec le tronc de l'UC n
m	Masse de la branche (kg)
\vec{n}	Normale sortante à la surface de la branche
N, M	Chargements : effort normal parallèle à z' (N), moment de flexion autour de y' (N.m)
N_n, M_n	Modélisation des branches : chargement de l'UC n ; effort normal (N), moment de flexion (N.m)
$N_c, N_e(k)$	Maillage « adaptatif » : nombre de « cernes numériques », nombre d'éléments dans le k -ième cerne numérique
N_x, N_y	Maillage cartésien : nombre d'éléments dans la longueur verticale, nombre d'élément dans la longueur horizontale
O	Centre de la section
O_n, G_n	Centre de la section amont de l'UC n , centre de gravité de l'UC n
p	Mesure de température : position radiale des sondes (\emptyset)
P_b	Pondération logarithmique de la rigidité de l'écorce par rapport à celle du reste de la section
$r, R, R_k, R_{x'y'}$	Cordonnée polaire radiale, rayon de la section, rayon du k -ième cerne, rayon à l'instant d'apparition du point de coordonnée (x', y', z') (m)
R_i, R_f	Modèle conique de la branche : rayon initial, rayon final (m)
R_n	Flux d'énergie radiative ($W.m^{-2}$)
R^2	Coefficient de Pearson (\emptyset)
S	Surface de la section (m^2)
S_t, S_r, S_c	Essai de sciage : section totale, résiduelle, coupée (m^2)
S_b	Surface du « cerne d'écorce » (m^2)
T	Température ($^\circ$ ou K)

T_p^E, T_p^N	Température de la sonde à la profondeur p , du secteur exposé E ou non exposé N (° ou K)
V	Volume de la branche (ou de la forme géométrique la représentant) (m ³)
v_r, v_l	Vitesses de sève dans la direction radiale, longitudinale (m.s ⁻¹)
W_{elas}	Énergie élastique emmagasinée dans la section (J)
w_e	Densité d'énergie élastique moyenne (J.m ⁻³)
$X_l^k, X_l^j, X_{j,l}, X^k$	Différentes notations pour la désignation de variables du calcul numérique : X dans le k -ième cerne, en position l , X dans le k -ième cerne, en position j , X dans le k -ième cerne
X_h	Essai de sciage : valeur de X associée à la profondeur de coupe h
(x, y, z)	Repère local associé au centre géométrique de la section
(x', y', z')	Repère local associé à la moelle
(X, Y, Z)	Repère global
(x_m, y_m)	Analyse d'image : coordonnées de la moelle (m)
(x_n, y_n)	Analyse d'image : coordonnées du centre de gravité du n -ième cerne (m)
(r_{xn}, r_{yn})	Analyse d'image : rayon vertical et horizontal associés au n -ième cerne (m)
(R_x, R_y)	Analyse d'image : rayon vertical et horizontal de la section à l'état final (m)

Table des figures

1.1	Description macroscopique du bois. Illustration d'une coupe transversale (tronc ou branche). Les différents tissus issus de la croissance secondaire sont représentés. Image adaptée de Van Diem (2017).	39
1.2	Description mésoscopique du bois à l'échelle tissulaire. Organisation cellulaire type d'un gymnosperme a), et d'un angiosperme b). La flèche rouge représente la direction longitudinale. Images adaptées de Niez (2018).	41
1.3	Description à l'échelle cellulaire de l'anatomie du bois : a) organisation structurelle d'une fibre de bois, adaptée de Plomion et al. (2001) et Trouy. (2015); b) distribution des trois composants polymériques dans les différentes couches d'une cellule [Panshin and De Zeeuw (1970)].	42
1.4	Les trois directions de référence (Radial R, Longitudinal L, Tangentielle T), ainsi que leurs plans associés (transverse RT, radial LR et tangentiel LT). [Cloutier (2005)].	43
1.5	Mise en place des contraintes de support dans un tronc vertical. A l'instant t_n , le bois subit l'incrément de poids du cerne n (charge marron, ΔP_n). A l'instant t_{n+1} , un nouveau cerne apparaît : il ne subit que son poids (ΔP_{n+1}), mais le bois plus ancien doit subir son poids et le poids du cerne précédent (charge rouge, $\Delta P_n + \Delta P_{n+1}$). Même raisonnement pour l'instant t_{n+2}	46
1.6	Allure des profils et ordre de grandeurs des contraintes de support en fonction de la position dans la section (R=0 est alors le centre de l'axe) : a) dans une branche parfaitement verticale (compression axiale seule); b) dans une branche parfaitement horizontale (flexion). Les dimensions de l'axe sont les mêmes, mais les ordres de grandeurs des contraintes de support varient grandement en fonction de son orientation.	47
1.7	Mise en place des contraintes de maturation. a) Formation d'une nouvelle couche de cellules; b) Maturation de la nouvelle couche : retrait axial libre (situation fictive); c) Situation réelle : adhésion aux cellules pré-existantes, génération de contraintes de tension longitudinale en périphérie, compression au centre.	48

1.8	Axe incliné en cours de redressement par la création de bois de compression. Sur la partie inférieure de l'axe incliné, on observe la tension (bleu) induite par la maturation des cellules du bois de compression. Sur la partie supérieure de l'axe, on observe la compression induite par la maturation du bois opposé (rouge). L'asymétrie résultante provoque le redressement.	50
1.9	Axe incliné en cours de redressement par la création de bois de tension. Sur la partie supérieure, on observe la forte compression (rouge foncé) induite par la maturation des cellules du bois de tension. Sur la partie inférieure de l'axe, on observe la compression moyenne induite par la maturation du bois opposé (rouge clair). L'asymétrie obtenue provoque la courbure et ainsi le redressement.	51
1.10	Structures de fibres de bois de compression (gauche), tension (droite) et bois normal (centre). LM : lamelle mitoyenne, P : paroi primaire. Schémas adaptés de [Déjardin et al. (2010)].	52
1.12	Modèles biomécaniques. a) Profil de Kübler pour une contrainte longitudinale moyenne $\hat{\sigma}_L = 5$ MPa. b) Représentation des contraintes subit par l'arbre en présence d'une contrainte extérieure de flexion σ_{flex} . Grâce aux contraintes de maturation σ_{mat} , l'arbre minimise l'impact en compression (solicitation face à laquelle le bois est le moins résistant). Les limites rouge et bleu représentent un ordre de grandeur des contraintes de ruptures du bois en compression et traction longitudinales [Kollman F (1968)].	56
1.13	Schéma d'un essai de flexion statique tel que proposé par Dahle et al. (2006)	62
1.14	Dispositif de mise en flexion de branches de Miesbauer et al. (2014). A l'aide d'un système de poulies au sol et de différents points d'ancrage, le système permet d'appliquer une charge en flexion de manière « continue » et homogène sur la branche.	63
1.15	Illustrations des trois modes de ruptures des branches décrits par Ennos and van Casteren (2010) : a) fissuration en traction transverse en coeur de branche, b) flambement en compression transverse, c) rupture en traction transverse.	64
1.16	Les trois modes de ruptures observés sur des petites branches [van Casteren et al. (2012)] : a) délaminage de la section après une initiation en traction transverse, b) propagation de la rupture en traction transverse et changement de direction (traction longitudinale), c) flambement de la partie inférieure (compression transverse).	65
2.1	Analyse de presse. Représentation de l'évolution du nombre d'article N_a et d'évènements N_e sur la période étudiée. Pour N_e , représentation de la part de chaque type de cause.	70
2.2	Analyse de presse. Type de conséquence de chaque rupture, en fonction de son origine.	71

2.3	Analyse de presse. Deux exemple de casses soudaines et inexplicuées, survenues lors d'évènements publics.	72
2.4	Analyse de presse. Distribution annuelle de chaque type de casse.	73
2.5	Analyse de presse. a) Répartition spatiale des casses provoquées par le vent. b) Répartition spatiale des casses inexplicuées.	74
2.6	Analyse de presse. Distribution des essences touchées par les casses inexplicuées (total de 32 reports de casse).	75
2.7	Formation biomécanique, novembre 2020. Caractérisation de l'origine des participants.	76
2.8	Enquête collaborative. Caractérisation de la communauté des participants.	81
2.9	Enquête collaborative. Appartenance des participants à des réseaux	81
2.10	Enquête collaborative. Caractéristiques des occurrences de casses de branches inexplicuées. (a) : Occurrence saisonnière, (b) : Importance relative des casses inexplicuées par rapport au nombre total de casses observées.	82
2.11	Enquête collaborative. Tentative de contextualisation des conditions climatiques lors des casses inexplicuées.	84
2.12	Enquête collaborative. Statut de l'arbre impliqué dans un évènement de casse de branche inexplicuée.	85
2.13	Enquête collaborative. Série de caractères permettant de décrire les branches cassant de manière inexplicuée dans l'arbre. En vert, une seule tendance se dégage majoritairement. En bleu, deux tendances se dégagent.	86
2.14	Enquête collaborative. Localisation de la rupture sur les branches concernées. La notion de « proche » ou « lointain » fait ici référence à l'éloignement par rapport au point d'insertion de la branche	88
2.15	Enquête collaborative. Identification d'un profil type d'arbre pouvant être touché par des ruptures inexplicuées : son âge (a), et l'orientation de ses branches (b) (plutôt horizontales, plutôt verticales, etc).	89
2.16	Enquête collaborative. Différentes essences touchées par les casses inexplicuées.	89
2.17	Enquête collaborative. Influence de l'élagage sur la propension à la casse.	90
2.18	Enquête collaborative. Distribution des réponses par groupes socio-professionnel aux questions sur les caractéristiques de branches. Pour illustration, sur la question de l'uniformité (figure 2.13c), les réponses possibles étaient : R1 : "branche horizontale", R2 "Indifférent", R3 "Je ne sais pas", R4 : "inclinée vers le bas", R5 : "Inclinée vers le haut", R6 : "Verticale"	92

3.2	Mesure de températures : arbres instrumentés à proximité des bâtiments du PIAF.	101
3.1	Dispositif de monitoring de température. Différentes étapes de fabrication et de pose des capteurs. a) Sondes soudées. b) Moulage des sondes dans la résine. c) Sonde moulée. d) Impression d'un boîtier de protection. e) Vue éclatée complète d'un dispositif de mesure : boîtier de protection, bouton poussoir, alimentation, carte d'acquisition et de communication. d) Dispositif intégré avec les sondes de températures. h) Pose du dispositif sur arbre. g) Dispositif fixé sur une branche.	102
3.3	Positionnement des points de mesure de température dans les branches (et troncs). Schéma des types de distributions mesurées. Le capteur en rouge est fixé à l'extérieur de la branche, sur la surface du secteur étudié. Les capteurs en bleu sont à l'intérieur de la branche. Chaque couleur correspond à une profondeur de mesure : du clair au foncé, cambium, intermédiaire et cœur. (a) : étude du gradient radial, (b) : étude du gradient longitudinal, (c) : influence de l'exposition au rayonnement solaire.	103
3.4	Mesure de température. Le dispositif de mesure au niveau du tronc du noyer <i>Juglans regia</i> . a) Photos du dispositif réel. b) Schéma des positions des points de mesures.	104
3.5	Mesure de température. Schéma de position des points de mesure. (a) Sur la branche de noyer, distribution longitudinale le long de l'axe. Puis distribution radiale sous plusieurs expositions. (b) Sur la branche de cèdre, distribution radiale sous différentes expositions au rayonnement solaire, et distribution radiale (en deux points seulement).	106
3.6	Tronc de <i>Juglans regia</i> : exemple de variations de température sur le secteur exposé à la radiation solaire (1 semaine d'enregistrement).	109
3.7	Tronc de <i>Juglans regia</i> : maximums locaux journaliers à différentes profondeurs en fonction des maximums en surface et de l'exposition au rayonnement solaire direct (enregistrement sur un an). La ligne en pointillés représente la bissectrice du repère. En dessous, les températures dans l'arbre sont inférieures aux températures de surfaces ; au dessus, elles sont supérieures.	110
3.8	Tronc de <i>Juglans regia</i> . Analyse par « différence d'exposition » : représentation des différences de température entre les faces exposée et non exposée au rayonnement solaire direct, pour différentes profondeurs.	112

- 3.9 Tronc de *Juglans regia*. En orange, les profils de température sur le secteur exposé. En bleu, sur le secteur non exposé. Pendant la période de repos végétatif (automne, hiver), le rayonnement direct induit une dissymétrie dans les profils de température entre ces deux secteurs. Cette dissymétrie se retrouve par diffusion dans le coeur du tronc. En été, la présence du feuillage bloque le rayonnement direct : les surfaces sont alors soumises à du rayonnement diffus, et la dissymétrie disparaît. En revanche, les profils s'inversent dans le coeur du tronc, suggérant un refroidissement plus important du secteur exposé. Cela suggère une compartimentation du secteur hydraulique. 113
- 3.10 Tronc de *Juglans regia*. Approche par « zones radiales ». Représentation des différences de températures entre deux profondeurs successives, pour différentes expositions au rayonnement solaire direct. La période d'activité végétative identifiée précédemment est mise en évidence par la couleur verte. . . 114
- 3.11 Tronc de *Juglans regia*. Schéma de l'interaction des différents flux régissant la dynamique thermique durant la période d'activité. L'exemple est pris sur le secteur exposé au rayonnement solaire. Entre l'écorce et la zone cambiale, un fort gradient est présent, expliqué par l'action conjuguée de la convection axiale (montée de la sève brute, froide, puisée dans le sol par les racines) et la diffusion radiale du rayonnement en surface. La zone intermédiaire est dominée par un phénomène de convection refroidissant, qui s'atténue au fur et à mesure, pour laisser la place à la diffusion. Cette dernière s'effectuant entre deux zones refroidies par le flux de sève ascendant est faible : les différences de températures sont petites. 116
- 3.12 Branche de *Juglans regia*. Approche « par zones radiales ». Représentation des différences de températures entre deux profondeurs successives, pour différentes expositions au rayonnement solaire direct. La période d'activité identifiée précédemment est mise en évidence (couleur verte). 118
- 3.13 Branche de *Juglans regia*. Gradient de température entre la surface et le coeur de la branche, pour différentes abscisses curvilignes (distance depuis l'insertion de la branche). Mise en évidence de l'effet longitudinal de la réponse thermique. En vert est représentée la période d'activité végétative. (enregistrement sur 1 an) 119
- 3.14 Branche de *Juglans regia*. Exemple de variation longitudinale de température en fonction de l'abscisse curviligne (distance donnée depuis l'insertion de la branche). A gauche, pendant la période de repos végétatif. A droite pendant la période d'activité végétative. (enregistrement sur 8 jours) 119

3.15	Branche de <i>Cedrus atlantica</i> : maximums locaux journaliers à différentes profondeurs en fonction des maximums en surface. Zone non exposée au rayonnement solaire direct (en haut) et exposée (en bas) et (enregistrements sur 1 an). La ligne en pointillés représente la bissectrice du repère. En dessous, les températures dans l'arbre sont inférieures aux températures de surfaces ; au dessus, elles sont supérieures. L0 représente la longueur depuis l'insertion de la première zone de mesure ; L1 celle de la deuxième zone, toutes les deux représentées dans la figure 3.5b.	120
3.16	Branche de <i>Cedrus atlantica</i> . Approche « par zones radiales ». Représentation des différences de températures entre deux profondeurs successives, pour différentes expositions au rayonnement solaire direct. La période d'activité végétative identifiée précédemment est mise en évidence par la couleur verte.	121
3.17	Branche de <i>Cedrus atlantica</i> . Températures maximum atteintes chaque jour pour le capteur CBE22 (11 mois d'enregistrements avec quelques points manquants).	122
4.1	Décomposition de l'évolution géométrique d'une section.	128
4.2	Représentation de la géométrie de section selon différentes configurations. Les sections sont représentées dans le repère de la moelle. Pour (a) et (b), l'excentricité est constante tout au long de la croissance radiale avec $e = 0$ en (a) et $e = 0,5$ en (b).	129
4.3	Représentation de deux cernes consécutifs et des éléments nécessaires au calcul des coordonnées de chaque quadrilatère.	130
4.4	Représentation du maillage de section selon différentes configurations. Les sections sont représentées dans le repère de la moelle.	131
4.5	Représentation de deux cernes consécutifs et des éléments nécessaires au calcul de l'incrément de rayon $\delta r(\theta)$	135
4.6	Situation de référence pour la validation du modèle numérique.	138
4.7	Représentation du champ de contrainte dans la section de la branche en figure 4.6. La section représenté est à l'insertion de la branche.	140
4.8	Représentation des contraintes sur l'axe $y=0$ pour différentes excentricités et différentes valeurs de N_c . Les courbes en rouge (resp. orange et bleu) représentent des contraintes obtenues pour une excentricité $e = 0$ (resp. $e = 0,7$ et $e = -0,7$). Les courbes pleines représentent la solution analytique, tandis que les cercles gris correspondent à la formulation incrémentale.	140
4.9	Représentation de la REQM entre les deux méthodes de calcul différentes valeurs de N_c . La courbe rouge (resp. orange et bleu) représente les REQM obtenues pour une excentricité $e = 0$ (resp. $e = 0,7$ et $e = -0,7$).	141

4.10	Représentation des contraintes sur l'axe $y=0$ pour différentes valeurs de P_b . De la couleur la plus foncée à la plus claire : $P_b = 0,25$, $P_b = 1,1$, $P_b = 2$. . .	143
5.1	Représentation des deux arbres simulés à différents âges. À gauche le merisier (feuillu), <i>Prunus avium</i> L. À droite, le pin maritime (résineux) <i>Pinus pinaster</i> Aiton.	147
5.2	Représentation d'une suite d'unités de croissance. UC_n représente la n -ième unité de croissance, G_n son centre de gravité, L_n sa longueur, O_n le centre de sa section amont, O_{n+1} de sa section aval. $D_{n,n+1}$ représentent les diamètres de ces deux sections.	148
5.3	Procédure de calcul des éléments de chargement. m_n désigne la masse de l' UC_n , \vec{N}_n l'effort induit par la masse de l'axe aval à l'unité n , \vec{g} le vecteur accélération de la gravité.	149
5.4	Exemple d'évolution d'une branche et représentation des variations allométriques de chargement pondéral (à l'insertion de la branche sur le tronc). . .	150
5.5	Variation des coefficients allométriques (λ_M, ν_M) de chacune des essences en fonction de différents marqueurs : rayon à l'insertion R , longueur de la branche L , hauteur d'insertion h	152
5.6	<i>P. avium</i> . Représentation du champs de contraintes à l'insertion des branches . Deux moteurs différents sont utilisés : a) Déformation de maturation dans le bois de tension, b) Asymétrie de croissance secondaire (excentricité). . . .	154
5.7	<i>P. avium</i> . Représentation des profils de contraintes sur l'axe $y=0$ (a) et de l'évolution de la contrainte associée dans le bois tension (b), pour différents scénarii : gris, section centrée ($e = 0$) ; vert, croissance épitrophique ($e = 0,5$) ; rose, croissance hypotrophique ($e = -0,5$).	155
5.8	<i>P. avium</i> . Représentation des profils de contraintes sur l'axe $y=0$ (a) et de l'évolution d'excentricité associée (b), pour différents scénarii : gris, pas de bois de réaction ($\sigma_{BT} = \sigma_{B0}$), rose, léger gradient de maturation ($\sigma_{BT} = 2\sigma_{B0}$) ; rouge, gradient important ($\sigma_{BT} = 3\sigma_{B0}$).	156
5.10	<i>P. pinaster</i> . Représentation des profils de contraintes sur l'axe $y=0$ (a) et de l'évolution de la contrainte associée dans le bois compression (b), pour différents scénarii : gris, section centrée ($e = 0$) ; vert, croissance épitrophique ($e = 0,5$) ; rose, croissance hypotrophique ($e = -0,5$).	157
5.11	<i>P. pinaster</i> . Représentation des profils de contraintes sur l'axe $y=0$ (a) et de l'évolution d'excentricité associée (b), pour différents scénarii : gris, pas de bois de réaction ($\sigma_{BC} = \sigma_{B0}$) ; bleu clair, léger gradient de maturation ($\sigma_{BC} = 0$) ; bleu foncé, gradient important ($\max(\sigma_{BC})$).	158

5.12	Evolution longitudinale des excentricités moyennes \bar{e} observées dans les travaux de littérature. L=0 représente le point d'insertion de la branche. Plus d'une dizaine d'essences de feuillu sont représentées.	159
5.13	Corrélation entre le retrait au séchage et les contraintes de maturation pour les feuillus (HW, en bleu) et les résineux (SW, en rouge). Extrait de Thibaut and Gril (2021).	162
5.14	a) Photo de la branche support de la mesure. b) Représentation de l'échantillonnage de la branche. Pour la mesure d'excentricité, 11 rondelles (S01-S11) ont été prélevées. Pour les déformations de maturation, 9 tronçons (T1-T9) ont été utilisés.	163
5.15	Procédure de mesure de l'excentricité. a) Section poncée. b) Détourage manuel de chaque cerne. c) Calcul du « bounding rectangle ». d) Mesure des coordonnées de la moelle (x_m, y_m) , du barycentre du cerne n (x_n, y_n) , ainsi que ses rayons vertical r_{xn} et horizontal r_{yn}	164
5.16	Évolution temporelle de l'excentricité locale de chaque section transversale. Deux types de trajectoires sont distinguées : a) les 4 premières sections, dont l'excentricité est épitrophique sur les années 2000-2018, puis chute brutalement pour devenir hypotrophique ; b) les 6 suivantes, dont le caractère épitrophique est globalement croissant.	165
5.17	Évolution spatiale de l'excentricité locale pour différentes années. En marron, la courbe de l'excentricité d'une année est mise en évidence. En gris clair, les courbes des autres années sont représentées.	166
5.18	Représentation de l'excentricité moyenne tout au long de la zone étudiée (0-4 m depuis l'insertion). Trois différentes années sont mises en évidence (marron), l'ensemble des autres années est représenté en arrière plan.	167
5.19	Mesure du retrait longitudinal. Appareil de mesure des longueurs de chaque échantillon.	168
5.20	Mesure de retrait longitudinal. Échantillonnage des sections, selon deux axes : vertical (bleu) et horizontal (orange), centrés sur la moelle.	168
5.21	Mesure du retrait longitudinal. Visualisation des différents points de mesures pour chaque échantillon d'une section.	169
5.22	Caractérisation du pourcentage de masse perdue Δm_p entre l'état vert et sec à l'air. Chaque état est défini par la stabilisation de Δm_p . Les mesures de masse ont été faites sur 9 échantillons pris aléatoirement dans le lot.	170
5.23	Caractérisation de l'incertitude liée à la méthode de mesure. Pour chaque côté et pour chaque état, 5 mesures ont été réalisées et la distribution des résultats est proposée sous forme de barre d'erreur. L'échantillon référence (3D) a été choisi au hasard.	171

5.25	Mesure des déformations de maturation à l'aide de la méthode du trou unique.	171
5.26	Comparaison des valeurs de déformations obtenues avec la méthode de la mesure du retrait longitudinal (échantillons A et E) et avec la méthode du trou (μ_{sup}, μ_{inf}).	172
5.27	Différentes valeurs de retraits longitudinaux obtenus sur le tronçon T2. En orange, les valeurs sont données suivant le diamètre horizontal. En bleu, les retraits suivant l'axe vertical.	173
5.28	Distribution spatiale des déformations de maturation en fonction de la position longitudinale dans la branche (distance depuis l'insertion) et de la position dans la section transversale. Les valeurs sont évaluées à partir des mesures de retrait longitudinal. Identification des différentes zones du bois : BT pour Bois de Tension, BO pour Bois Opposé, BN pour Bois Normal.	173
6.1	Étude expérimentale des branches, quelques illustrations : a) Pesée d'une branche ; b) Photographie de section, avant étude en laboratoire.	179
6.2	Distribution de chacun des paramètres mesurés ; selon chaque essence. R le rayon moyen (cm), L la longueur (m), L_g la longueur de la branche du point d'insertion au centre de gravité (m), γ l'angle moyen avec l'horizontale ($^\circ$), m la masse (kg), et \bar{e} l'excentricité moyenne.	180
6.3	Étude de sensibilité. Modèle géométrique de branche.	181
6.4	Étude de sensibilité. Distribution du paramètre $\chi = L_g/L$. Les limites en noir correspondent aux valeurs pour lesquelles l'équation 6.1 a deux solutions réelles distinctes.	182
6.5	Étude de sensibilité. Indices de Sobol du premier ordre pour chacun des paramètres étudiés. R est le rayon à l'insertion, (ν_L, λ_L) représentent l'allométrie en longueur, γ l'angle moyen avec l'horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l'excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.	186
6.6	Étude de sensibilité. Indices de Sobol du second ordre. R est le rayon à l'insertion, (ν_L, λ_L) représentent l'allométrie en longueur, γ l'angle moyen avec l'horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l'excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.	188
6.7	Étude OAT. Évolution de la densité d'énergie élastique stockée w_e en fonction de chacun des paramètres d'entrée du modèle. R est le rayon à l'insertion, (ν_L, λ_L) représentent l'allométrie en longueur, γ l'angle moyen avec l'horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l'excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.	189

6.8	Étude de sensibilité. Cas du résineux. Profil de contrainte longitudinale sur le diamètre $y = 0$, pour différentes valeurs de λ_L	191
7.1	Le surdimensionnement des branches. Illustration sur une branche d'amandier (longueur 4,5m).	194
7.2	Protocole d'évaluation du surdimensionnement mécanique des branches par rapport à leur poids propre : a) Sciage de la branche jusqu'à l'amorce de rupture, b) Exemple de profil typique après rupture, c) Mesures de la morphologie (ici mesure de la masse et positionnement du centre de gravité), (d-f) Étude des sections en laboratoire : e) Détourage de la section pleine, f) Détourage de la section résiduelle après coupe. Sur ces sections, h_c et la profondeur d'entaille et h_t et la dimension correspondante de la section sont également représentées.	196
7.3	Distribution fréquentielle de l'indicateur du surdimensionnement η_h	198
7.4	Evolution de l'indicateur de surdimensionnement η_h en fonction de la saison.	199
7.5	Variation de l'indicateur de surdimensionnement mécanique des branches η_h en fonction de l'essence (valeurs mesurées en automne, hiver et printemps).	200
7.6	Modélisation de l'essai de sciage. S_c représente la section coupée, S_r la section résiduelle et S_t la section totale. h_c représente la hauteur coupée, et h_t la hauteur totale de la section.	203
7.7	Modélisation de l'essai de sciage. Passage d'un maillage adaptatif (a), adapté à la modélisation du champ de précontraintes, à un maillage cartésien (b), adapté à la modélisation du trait de coupe.	204
7.8	Modélisation de l'essai sciage. Quelques éléments nécessaires au calcul : θ_h l'angle lié à la profondeur de coupe h_c , $ds(x)$ incrément de surface d'une tranche de longueur dx	206
7.9	Modélisation de l'essai de sciage. Comparaison entre la solution incrémentale (points) et pseudo-analytique (trait plein). Le rayon de la section est fixé à 8 cm, h_c représente la profondeur de coupe.	208
7.10	Modélisation de l'essai de sciage. Simulation d'une section précontrainte avec du bois de tension (cas de feuillu). a) Représentation du champ de contraintes total pour différentes profondeurs d'entaille h_c . b) Interpolation de la contrainte sur l'axe $y=0$, pour des profondeurs incrémentées de 1 cm.	209
7.11	Modélisation de l'essai de sciage. Simulation d'une section précontrainte avec du bois de compression (cas de résineux). a) Représentation du champ de contraintes total pour différentes profondeurs d'entaille h_c . b) Extrapolation de la contrainte sur l'axe $y=0$, pour des profondeurs incrémentées de 1 cm.	210

7.12	Modélisation de l'essai de sciage. Schématisation des différents éléments. Sur la section de gauche, les flèches de couleur (bleu, rouge, vert) représentent les points de suivi de l'évolution des contraintes. Sur le schéma de droite, les différentes grandeurs nécessaires au calcul sont représentées : la profondeur d'entaille h_c , l'incrément de rotation $\delta\omega$, l'incrément de fissure correspondant δl , l'incrément de déplacement δu , la force de chargement F et le bras de levier à partir du trait de scie Ls	212
7.13	Modélisation de l'essai de sciage. Représentation de l'évolution des profils de contrainte sur le front de l'entaille (au milieu en bleu, sur le côté en vert) et sur le point bas de la branche (rouge). En pointillé, le profil de précontrainte initial, en trait plein (marqueurs ronds), celui de la contrainte totale après redistribution. En pointillé noir, les limites supposées de rupture en traction et compression.	213
7.14	Modélisation de l'essai de sciage. Évolution du taux de restitution d'énergie G . En pointillé, le taux d'énergie limite pour lequel la rupture s'amorce. . . .	213
7.15	Modélisation de l'essai de sciage. Représentation de l'évolution des profils de contraintes sur le front de l'entaille (au milieu en bleu, sur le côté en vert) et sur le point bas de la branche (rouge foncé). En pointillé, le profil de précontrainte initiale, en trait plein (marqueurs ronds), celui de la contrainte totale après redistribution. En pointillé noir, les limites supposées de rupture en traction et compression. Différents cas d'excentricité sont explorés.	214
7.16	Modélisation de l'essai de sciage. Évolution du taux de restitution d'énergie G . En pointillé, le taux d'énergie limite pour lequel la rupture s'amorce. Différentes situations, pour différents rayons à l'insertion, sont représentées. .	215
8.1	Représentation de la loi élastoplastique implémentée. 4 situations sont envisagées. Elles sont décrites par les potentiels passages d'un état plastique ET1 à un état plastique ET0. La loi est une loi de Hooke précontrainte (σ_0 représente la contrainte de maturation) avec un seuil de limite plastique en compression Π (supposé constant dans cette illustration).	219
8.2	Modèle élastoplastique. Distribution des contraintes de croissance d'une branche rectiligne à l'échelle de la section (a) et calculée sur l'axe central $y=0$ (b). Trois lois de comportements sont illustrées : loi élastique (graphique (a) gauche et courbe en pointillés sur (b)) ; loi élastoplastique avec un seuil constant $\Pi = 50$ MPa (graphique (a) centre et courbe en points gris sur (b)), et loi élastoplastique avec un seuil constant $\Pi_{lim} = 28$ MPa (graphique (a) droite et courbe en points jaunes sur (b)). La valeur de seuil $\Pi_{lim} = 28$ MPa est la limite après laquelle le calcul diverge (i.e. la valeur seuil après laquelle la courbure de la branche ne peut plus rester constante).	222

8.3	Modèle élastoplastique. Distribution des contraintes sur l'axe $y=0$ (a). Variation de la courbure en fonction de la diminution du palier plastique imposé (b). La plastification est instantanée. Trois lois de comportements sont illustrées : loi élastique (trait pointillés) ; loi élastoplastique avec un seuil homogène $\Pi = 50$ MPa (points noirs), et loi élastoplastique avec un seuil homogène $\Pi_{lim} = 24$ MPa (points jaunes). La valeur de seuil de plastification $\Pi_{lim} = 24$ MPa est la limite avant la divergence du calcul (i.e. après laquelle la courbure de la branche ne peut plus rester constante).	223
8.4	Évolution de la courbure b de la branche en fonction de la plastification. Cas d'une loi élastoplastique, avec un seuil limite initialement imposé constant à $\Pi_{ini} = 60$ MPa. Au bout de $N_c = 50$ itérations, une décroissance brutale est imposée par incréments de 2 MPa jusqu'à la ruine de la branche. Les évolution des courbures résultantes sont représentées dans les cas d'une croissance secondaire hypotrophique ($\bar{e} = -0,5$) ou épitrophique ($\bar{e} = +0,5$).	224
8.5	Evolution des seuils limites Π_{lim} en fonction de l'excentricité e (supposée constante) de la section. Cas d'une loi élastoplastique, avec un seuil limite initialement imposé $\Pi_{ini} = 60$ MPa. Après $N_c = 50$ itérations, une décroissance brutale de ce seuil est imposée par incréments de 2 MPa jusqu'à la ruine de la branche.	225
B.1	Échantillonnage. Présentation des sections (et leur jumelle théorique) des 9 barreaux prélevés dans chaque tronçon. L'échantillonnage n'est pas homogène, dépendant principalement des dimensions de la section.	259
B.2	Caractérisation de l'incertitude liée à la méthode de mesure. Pour chaque côté et pour chaque état, 5 mesures ont été réalisées et la distribution des résultats est indiquée sous forme de barre d'erreur. Les 2 échantillons, 5B et 7C, ont été choisis au hasard. Pour chacune des représentations, l'incertitude liée à la mesure est très faible devant celle liée au retrait entre deux états.	260
B.3	Retraits longitudinaux. En orange, les valeurs sont données suivant le diamètre horizontal. En bleu, les retraits suivant l'axe vertical. Partie 1/2.	261
B.4	Retraits longitudinaux. En orange, les valeurs sont données suivant le diamètre horizontal. En bleu, les retraits suivant l'axe vertical. Partie 2/2.	262
C.1	Schématisation d'un tronçon de cône circulaire, et des données du problème.	263
D.1	Capteur de flexion. a) Dessin de conception du capteur ; b) principe de fonctionnement du capteur : la flexion de la branche dans l'axe entraîne une élongation des fibres de bois entre les vis (points A et B) vissées dans le bois, laquelle provoque la flexion du clinquant en acier équipé de jauges.	268

D.2	Capteur de torsion. a) Dessin de conception du capteur ; b) Principe de fonctionnement du capteur : la torsion de la branche entraîne un déplacement latéral du point C, lequel provoque la flexion du clinquant en acier équipé de jauges.	269
D.3	Différentes étapes dans la fabrication des capteurs de déformations. a) Découpe par jet d'eau des corps en POM ; b) Reprise des surfaces à la fraiseuse, c) Préparation des jauges ; d) Collage des jauges sur les clinquants ; e) Capteur assemblé, sur lequel on distingue le pont de mesure et le clinquant équipé de jauges ; f) Représentation de l'ensemble des capteurs avant étalonnage. . . .	270
D.4	Banc d'étalonnage des deux types de capteurs : a) capteur de flexion : le banc est une machine de traction-compression. La jonction entre la machine et le capteur est assurée à l'aide d'une vis de diamètre légèrement plus petite que les trous du capteur (pour permettre les rotations) ; b) capteur de flexion, le banc est spécialement conçu pour ce capteur. Il est composé d'une vis micrométrique qui impose le déplacement, et qui peut glisser dans un guide, pour tester différents points d'appuis.	271
D.5	Représentation des capteurs positionnés sur la branche étudiée. Les capteurs sont disposés circonférentiellement sur deux sections de la branche.	271
D.6	Module électronique d'acquisition et de transmission des données associé aux capteurs.	272
D.7	Évolution de la vitesse du vent dans le secteur d'expérimentation, sur le mois d'octobre 2021. Deux zones sont isolées, suivant le vent qui les caractérise : bleu représente un faible vent ; rouge représente un fort vent.	273
D.8	Évolution de la déformation des jauges en fonction du temps, pendant la période peu ventée (bleu) et la période ventée (rouge).	273
D.9	Évolution de la déformation des jauges en fonction du temps, pendant la période peu ventée (bleu) et la période ventée (rouge). (a) et (c) : signal BF ; (b) et (d) : signal HF.	274
D.10	Analyse fréquentielle du signal, pendant la période peu ventée (bleu) et la période ventée (rouge). Deux pics sont identifiés : un en basse fréquence ($f=0.01$ Hz) et un autour de $f=0.4$ Hz. Le deuxième pourrait représenter la fréquence propre de la branche. Les graphes (a) et (c) représentent l'analyse sur l'ensemble du spectre fréquentiel ; les graphes (b) et (d) sont un zoom sur la plage $[0,1]$ Hz.	275

D.11 Données de déformations sur le mois d'octobre 2021, filtrées en basse fréquence avec une fréquence de coupure $f_c = 2$ Hz. Découpage du signal autour de la fréquence de coupure $f = 1/3600$ HZ (T=1h) : (a) sollicitations BF, correspondant aux variations journalières de la tige (cycle jour/nuit lié au phénomène d'évapotranspiration) ; b) variations HF, correspondantes aux sollicitations du vent (en adéquation avec la figure D.7). 276

Liste des tableaux

3.1	Récapitulatif de l'ensemble des capteurs utilisés pour la campagne de mesure de température	105
5.1	Distribution géométrique des branches étudiées.	150
5.2	Distribution des coefficients allométriques de chargement	151
5.3	Caractéristiques des branches choisies pour l'étude mécanique.	153
6.1	Caractéristiques moyennes des branches échantillonnées.	179
6.2	Caractérisation de la loi allométrique $L(R) = \lambda_L R^{\nu_L}$	182
6.3	Étude de sensibilité. Intervalle de variation de chacun des paramètres d'entrée. 184	
6.4	Étude de Sobol. Poids des paramètres sur l'énergie élastique stockée, pour chacun des modes de croissance.	186
6.5	Étude OAT. Valeurs nominales de chaque paramètre.	189
7.1	Test ANOVA à un facteur sur l'impact des saisons.	198
7.2	Test de Tuckey sur l'impact des saisons	199
7.3	Test ANOVA à un facteur sur l'impact des essences.	201
7.4	Coefficients de Pearson entre l'indicateur de surdimensionnement η_h et l'ensemble des paramètres de croissance mesurés sur la branche $(R, \chi, \zeta, \gamma, \bar{e})$. . .	201

Introduction générale

Contexte général et objectifs

Présents sur terre depuis des millions d'années, les arbres sont des structures évolutives, qui ont su s'adapter à un environnement instable et changeant, pour aujourd'hui représenter plus de 30% de la surface des terres émergées du globe. Objets d'intérêt scientifique pour leur nombreuses aptitudes dans des domaines très variés, c'est leurs performances mécaniques qui seront mises à l'honneur dans ce travail. Plus particulièrement celles des branches, dont l'étude mécanique a très souvent été délaissée au profit de celle du tronc qui les supporte, pour des raisons aussi bien économiques que fonctionnelles. Souvent vouées à l'élagage, artificiel ou naturel, elles emportent avec elle les secrets de leur prouesse mécanique : assurer une posture qui défie la gravité, souvent sur de grandes longueurs, en dépit des aléas souvent imprévisibles de leur environnement. Cette capacité à tenir leur propre poids, qui augmente avec le temps, et fluctue dans l'année chez certaines espèces, à de quoi faire rougir les structures les plus ambitieuses construites par l'homme.

Et pourtant, il arrive que ces branches rompent. En général, la raison est évidente et c'est souvent une tempête, une surcharge de neige ou un problème sanitaire qui est diagnostiqué comme responsable. Mais il arrive aussi qu'elles rompent sans raison apparente. L'une des illustrations remarquable des casses inexplicables de branche est celle de la « casse estivale » (summer limb drop, de l'anglais d'où le phénomène a été nommé) : des branches qui cèdent sous leur poids propre, lors de journées chaudes, sans vent. Pour peu que ces chutes brutales surviennent dans des zones urbaines, les conséquences, humaines et matérielles, peuvent s'avérer lourdes. Dans un monde où les arbres urbains font figure de proue pour lutter contre les événements caniculaires dans les villes, ces casses inexplicables et soudaines prennent une importance grandissante. L'enjeu est de mise, et la communauté des professionnels du diagnostic et de la gestion de l'arbre en ville en est consciente. Les experts sont complètement démunis face à de tels événements. Les outils dont ils disposent pour évaluer le risque de casse du tronc ne s'appliquent pas, et l'observation de la branche après la chute ne fait apparaître aucune dégradation interne ou cause structurelle susceptible d'expliquer l'accident. Le mécanisme sous-jacent reste donc à ce jour inconnu.



Cèdre de l'Atlas, le 26 septembre 2021 à Saint-Nazaire, France.



Marronnier, le 8 août 2020, à Pézenas, dans l'Hérault, France.

Illustration de casses inexplicables de branches. Les deux branches sont tombées en fin de journées chaudes, sans vent. La première (a) dans un parc pour enfant, la seconde (b) sur une place publique. Dans les deux situations, aucune victime n'est à déplorer.

C'est dans ce cadre exploratoire que se situe le travail de thèse ; à la frontière de plusieurs domaines - mécanique, thermique, social - et sur un sujet dont les connaissances sont aujourd'hui très peu développées. Cette thèse s'est déroulée à Clermont-Ferrand, dans les laboratoires du PIAF¹, et de l'Institut Pascal. Ces deux laboratoires ont permis d'apporter une expertise sur la biomécanique des branches, sur des volets expérimentaux et théoriques. Des collaborations ont aussi été mises en place avec l'UMR AMAP², à Montpellier, constituée de botanistes et modélisateurs de la croissance des plantes, et avec le LMGC³, un laboratoire spécialisé dans la mécanique du bois, à Montpellier également. Au delà de la problématique des casses inexplicables de branches, ce travail de doctorat s'inscrit dans une dynamique de sciences participatives. L'un des objectifs est de développer un lien pérenne avec la communauté des professionnels de l'arbre urbain. Dans ce cadre, une attention particulière a été accordée au volet social, en collaboration avec l'anthropologue P. Moity-Maïzi, professeur à l'Institut Agro de Montpellier et membre de l'UMR SENS⁴.

Deux principaux verrous scientifiques ont été identifiés, et seront développés dans ce travail de thèse :

- (i) La nécessité de développer une compréhension phénoménologique de l'évènement « casses inexplicables » : peut-on trouver des déterminants communs aux casses inexplicables ? Certaines essences sont-elles plus touchées que d'autres ? Le phénomène suit-il une distribution, temporelle ou spatiale, particulière ?
- (ii) Plus fondamentalement, la nécessité de comprendre la problématique biomécanique de la construction mécanique des branches, et de leur dimensionnement. C'est l'un des

1. UMR 547, Laboratoire de Physique et Physiologie intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant
 2. UMR AMAP : botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations
 3. UMR 5508, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
 4. UMR SENS : Savoirs, ENvironnement, Sociétés

fers de lance de ce sujet : pour comprendre ce qui peut amener une branche à casser, il faut dans un premier temps se figurer son état mécanique avant la casse. Il y a donc un véritable enjeu de compréhension des paramètres qui peuvent influencer le dimensionnement mécanique des branches et leur propension à la casse.

Organisation de la thèse

Ce manuscrit s'organise autour de 8 chapitres :

1. Tout d'abord, un premier volet de bibliographie, permet de positionner le sujet dans la littérature scientifique. Cette étude mettra notamment en lumière le côté lacunaire des connaissances sur le phénomène des casses inexplicées, et, plus généralement, sur le dimensionnement et la biomécanique des branches.
2. Le deuxième chapitre peut s'apparenter à une bibliographie de terrain. Il a pour objectif de compléter le manque de connaissances sur le phénomène, en rassemblant et formalisant les connaissances empiriques des professionnels du monde de l'arbre. Il prend la forme d'une enquête sociale, couplée à une analyse de presse sur le phénomène. L'analyse de cette récolte d'information de terrain permettra de proposer des pistes et d'échafauder de hypothèses dont certaines seront testées par la suite.
3. Le caractère estival des casses inexplicées semblant impliquer le facteur température, nous nous sommes intéressés aux variations de températures que pouvait subir une branche au cours de l'année. C'est l'objet du chapitre 3. Dans ce travail, des capteurs de température ont été installés dans les branches pendant plus d'un an, et une analyse physique des phénomènes qui pilotent la dynamique thermique des branches est proposée. Ce travail a permis d'élaborer des hypothèses sur le caractère thermique des casses inexplicées.
4. Afin de tester une partie de ces hypothèses, et parce que la rupture d'une branche est avant tout une histoire de mécanique, un modèle biomécanique 1D de la mise en place des contraintes longitudinales dans une branche a été développé. Le chapitre 4 en décrit la formulation et la validation. Ce modèle prend en compte des paramètres de chargements évolutifs (représentés par la charge de la branche, au cours des ans), ainsi que les moteurs qui permettent à la branche de maintenir une orientation défiant la gravité.
5. Dans le chapitre 5, ce modèle a été appliqué sur des branches virtuelles, mais réalistes. Ces modélisations ont pour objectif d'étudier comment les moteurs dont la branche dispose pour assurer une orientation peuvent être utilisés. Une comparaison avec les quelques mesures existantes de la littérature permettra de discuter de l'usage que la branche fait de ces différents moteurs.
6. À cette application du modèle au dimensionnement des branches succède une étude de sensibilité du modèle basée sur la densité moyenne d'énergie élastique stockée par la branche au cours de sa croissance. Dans ce travail, cette densité d'énergie est supposée

être un indicateur de la propension d'une branche à casser. Il s'agira notamment d'essayer de comprendre quels paramètres de croissance conditionnent l'état mécanique de la branche. Cette étude de sensibilité s'appuie sur une étude morphologique de terrain, menée sur les branches de différentes essences.

7. Aux deux chapitres précédents, très théoriques, répond une approche expérimentale : le chapitre 7 est une tentative de caractérisation expérimentale du surdimensionnement des branches, et de sa variabilité. Si les deux chapitres précédents ont permis de comprendre certaines clés du dimensionnement des branches, ce chapitre évalue la qualité de ce dimensionnement sur le terrain, à l'aide d'un protocole simple et novateur.
8. Enfin, le chapitre 8 consiste à faire évoluer le modèle en implémentant une loi élastoplastique. Celle-ci permet alors de tester l'une des hypothèses sur le changement de comportement mécanique et le risque de casse lié à une montée en température des branches.

L'ensemble de ces volets se répondent, se nourrissent, et interagissent ensemble, pour raconter une histoire exclusivement consacrée aux branches d'arbres, longtemps restées dans l'ombre du tronc qui les supporte. Bonne lecture !

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Sommaire

1.1	Structure et anatomie du bois dans l'arbre	38
1.1.1	Échelle macroscopique	38
1.1.2	Échelle tissulaire	40
1.1.3	Échelle cellulaire	40
1.2	Propriétés mécaniques du bois	42
1.2.1	Notion d'orthotropie	42
1.2.2	Paramètres conditionnant les propriétés mécaniques du bois	43
1.2.3	Visco-élasticité du bois	45
1.3	Le contrôle postural de l'arbre	45
1.3.1	Contraintes de croissance	45
1.3.2	Bois de réaction et contraintes induites	48
1.3.3	Modélisation des contraintes de croissance	55
1.3.4	Acclimatation de l'arbre aux sollicitations mécaniques dues au vent : la thigmomorphogenèse	58
1.4	Biomécanique des branches : un panorama	59
1.4.1	Propriétés anatomiques et mécaniques des branches	59
1.4.2	Contraintes de maturation et excentricité dans les branches, moteurs des réactions tropiques ?	60
1.4.3	La casse des branches : études, questionnements et limites	61
1.5	Conclusion	65

1.1 Structure et anatomie du bois dans l'arbre

L'arbre est une plante terrestre, composée d'une partie souterraine, appelée système racinaire, et d'une structure aérienne, constituée d'un tronc sur lequel s'insèrent des branches, formant le houppier. Le système racinaire a une fonction d'ancrage au sol et d'extraction d'eau et nutriments. Au-dessus du sol, la partie aérienne se subdivise en différents organes. Citons les feuilles qui captent l'énergie de la lumière et combinent le dioxyde de carbone de l'air avec l'eau pour fabriquer des sucres. C'est la photosynthèse. Les autres organes (tronc, branches) sont constitués du matériau bois. Dans l'arbre, trois principales fonctions sont généralement attribuées au bois : (i) le soutien mécanique (fonction de squelette de la structure), (ii) la conduction de sève brute (eau et minéraux du sol) des racines jusqu'aux feuilles, et (iii) le stockage d'une part de la sève élaborée (sucres fournis par les feuilles), et la défense contre des parasites externes. Ces fonctions sont assurées par une organisation complexe, dont nous proposons une description à travers trois échelles : macroscopique, mésoscopique et microscopique. C'est une lecture classique qui permet de décrypter les principaux déterminants structurels du bois et les enjeux associés. Dans cette section introductive, de nombreuses informations sont issues du l'ouvrage de M.C. Trouy sur l'anatomie du bois [Trouy. (2015)], ainsi que de son cours¹ en ligne.

1.1.1 Échelle macroscopique

La croissance des arbres fait intervenir deux mécanismes distincts : la croissance primaire, qui se manifeste par un allongement des axes (croissance axiale), et la croissance secondaire, qui en constitue un épaississement en diamètre (croissance radiale). Ces deux mécanismes interviennent dans une temporalité ordonnée. Dans un premier temps, la mise en place de la croissance primaire est effectuée par des méristèmes primaires. Ce sont des tissus spécialisés dans la croissance, localisés au niveau des bourgeons terminaux. Dans un second temps, la croissance secondaire est assurée par deux méristèmes périphériques, situés entre l'écorce et le bois : le cambium et le phellogène. En région tempérée, cette activité secondaire est saisonnière, ce qui explique la présence de cernes. Dans ce travail, une attention est portée au développement de la croissance secondaire :

- Le cambium. Ce dernier génère de la croissance dans deux directions : une vers le centre de la section, par la production de xylème secondaire (ou bois), et une vers la périphérie, par la production de phloème secondaire (ou liber). Une fois produit, le xylème constitue l'aubier durant les premières années de sa vie, puis se transforme en duramen. Les rôles de ces deux états sont complémentaires : l'aubier, constitué de cellules vivantes, a des fonctions de transport de la sève brute depuis les racines, de stockage des réserves ainsi que du support mécanique. Le duramen, intégralement constitué de cellules mortes, joue majoritairement un rôle mécanique. La croissance du

1. MOOC sur l'anatomie du bois : <https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/anatomie-du-bois/>

bois se développant depuis la périphérie, la zone du duramen correspond logiquement au centre de la section. Le processus de vieillissement du bois peut être accompagné de transformations biochimiques qui confèrent au duramen certaines propriétés, et une meilleure durabilité. Parallèlement à la production de xylème, le cambium génère du liber vers l'extérieur. Ce tissu dispose d'une fonction de conduction de la sève élaborée (sucres issus de la photosynthèse) pour la distribuer vers les puits.

- Le phellogène. Cette assise génératrice produit aussi des tissus dans les deux directions. Vers l'extérieur, du suber (ou liège), qui a un rôle de protection. Vers l'intérieur, le phelloderme qui est un tissu de réserve.

On appelle usuellement « écorce » l'association du suber, du phelloderme et du liber. Une illustration d'une section de bois, avec l'ensemble des différents tissus mentionnés, est proposée dans la figure 1.1.

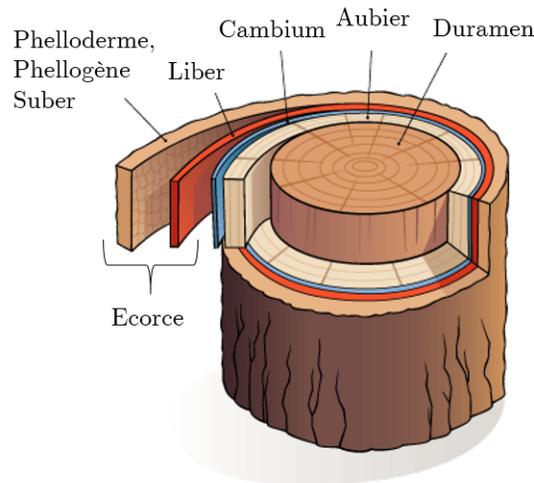


FIGURE 1.1 – Description macroscopique du bois. Illustration d'une coupe transversale (tronc ou branche). Les différents tissus issus de la croissance secondaire sont représentés. Image adaptée de Van Diem (2017).

Le premier bois créé par la croissance secondaire est appelé « bois juvénile ». La délimitation du périmètre de ce bois n'est pas précise. Au fur et à mesure de la croissance de l'arbre, le bois dit « mature » se met en place. Le bois juvénile a généralement des propriétés mécaniques plus faibles (module d'Young, seuils de rupture) que le bois mature [Bao et al. (2001)]. Il résulte donc de cette transition du bois des gradients radiaux de propriétés mécaniques. En plus de cette différenciation bois juvénile/bois mature, des bois spécifiques, appelés « bois de réaction », participent à l'hétérogénéité des caractéristiques mécaniques d'une section d'arbre. Ces bois particuliers seront décrits ultérieurement.

1.1.2 Échelle tissulaire

Pour décrire correctement cette échelle, il convient de différencier les deux principaux groupes d'arbres : les gymnospermes (ou résineux) et les angiospermes (ou feuillus). Si la différenciation première de ces deux groupes est le mode de reproduction, nous nous intéresserons principalement ici aux différences anatomiques et structurelles de leurs bois. Ces derniers ont en effet des organisations cellulaire et tissulaire bien distinctes :

- Les gymnospermes. Ils ont une organisation tissulaire relativement simple, constituée de deux types de cellules : les trachéides et les parenchymes. Les premières représentent plus de 90% du volume cellulaire. Leur forme se rapproche de celle de tubes de différentes sections (hexagonale, rectangulaire, ronde). Orientées majoritairement dans la direction axiale, elles ont un double rôle de soutien mécanique et de conduction de sève. Les cellules de parenchymes sont généralement orientées dans le sens radial. Elles ont un rôle de stockage et transport radial des réserves, complémentaire à celui des trachéides. Un assemblage de parenchymes constitue un rayon ligneux. Une représentation de l'architecture cellulaire type des gymnospermes est proposée dans la figure 1.2a.
- Les angiospermes. Ils ont une diversité de structure que ne présentent pas les gymnospermes. Cette diversité s'explique par un plus grand nombre de types de cellules de tailles très variables. Dans la direction axiale, citons les trois principaux types : fibres trachéides, vaisseaux, parenchymes axiaux. Les premières, légèrement plus courtes que celles des gymnospermes, ont plus une fonction de soutien mécanique. Les deuxièmes, de section transversale plutôt cylindrique, ont une fonction de conduction hydraulique. Les parenchymes axiaux peuvent assurer les deux fonctions de conduction et de soutien, mais sont généralement peu abondants. Dans la direction radiale, nous trouverons les mêmes cellules (parenchymes) que chez les gymnospermes. Une représentation des différents types de cellules est proposée dans la figure 1.2b.

1.1.3 Échelle cellulaire

Après leur formation par le cambium, les cellules de bois grandissent et mûrissent : différentes couches se déposent alors au sein des cellules, de l'extérieur vers l'intérieur. Le processus de maturation a une importance cruciale pour la stabilité mécanique de l'arbre, qui sera décrite dans la section 1.3.1. Les couches de la paroi cellulaire sont constituées de trois polymères en proportion variable : la cellulose (polymère semi-cristallin), la lignine et les hémicelluloses (polymères amorphes). Systématiquement, la lignine joue un rôle de ciment entre les fibrilles de celluloses. Les hémicelluloses ont un rôle d'interface entre les fibrilles cellulosiques et la matrice de lignine. De l'extérieur vers l'intérieur, les différentes couches sont :

- La lamelle mitoyenne (M) : commune à deux cellules voisines et majoritairement composée de lignine.

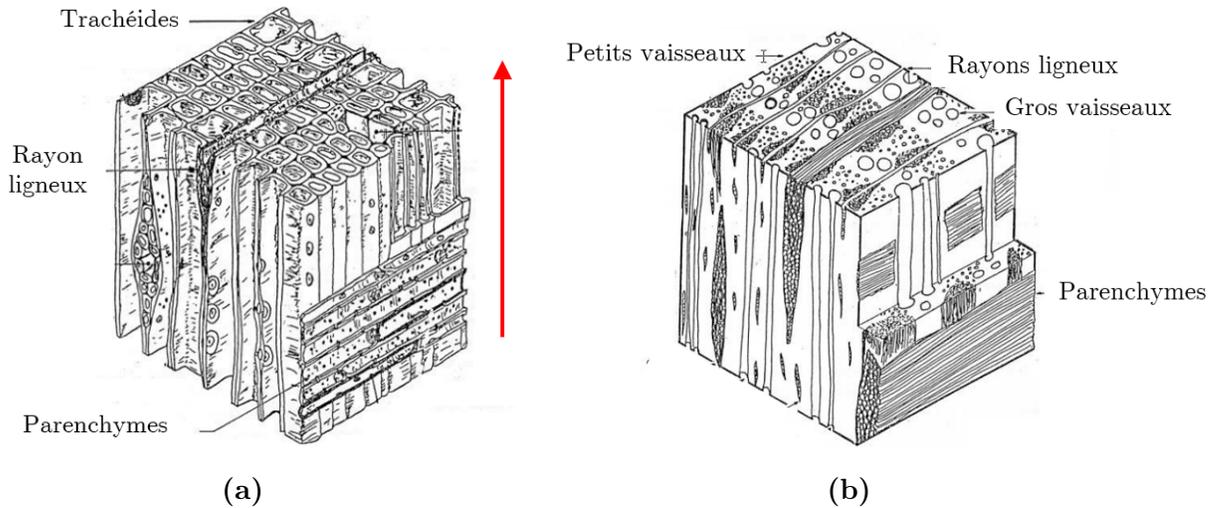


FIGURE 1.2 – Description méso-microscopique du bois à l'échelle tissulaire. Organisation cellulaire type d'un gymnosperme a), et d'un angiosperme b). La flèche rouge représente la direction longitudinale. Images adaptées de Niez (2018).

- La paroi primaire (P) : c'est une paroi très fine, qui apparaît lors de l'expansion cellulaire de la cellule. En contact direct avec la lamelle mitoyenne, elle est majoritairement composée d'eau, puis d'une matrice de lignine contenant des microfibrilles de cellulose, réparties aléatoirement.
- La paroi secondaire (S), qui se développe une fois la taille définitive de la cellule atteinte. Contrairement à la paroi primaire, l'arrangement des fibrilles de cellulose qui la constitue est ordonné. C'est une paroi multicouche : de l'extérieur vers l'intérieur, elle est constituée des couches S1, S2 et S3. L'arrangement des microfibrilles dépend de la couche considérée, et est caractérisé par une disposition en hélice dont l'angle formé avec la direction longitudinale est appelé AMF (angle des microfibrilles). La paroi S1 est une fine paroi avec des AMF compris entre 60° et 80° . La paroi S2 représente 75% à 85% de la paroi secondaire. Sa densité de microfibrilles est plus importante, et l'AMF de ces dernières est généralement compris entre 10° et 30° . La couche S3 est plus fine et légèrement moins dense en cellulose, présente un AMF entre 60° et 90° . Les fibrilles de cellulose ayant une rigidité longitudinale bien supérieure à celle de la lignine, leur orientation joue un rôle crucial dans les propriétés mécaniques du bois. Dans ce contexte, la couche S2, la plus volumineuse, est déterminante pour comprendre les propriétés mécaniques du bois.

L'ensemble de ces différentes couches pariétales, ainsi que la distribution des principaux polymères les composant sont résumés dans la figure 1.3.

Au centre de la cellule se trouve une cavité appelée lumen. A la mort de la cellule, le lumen

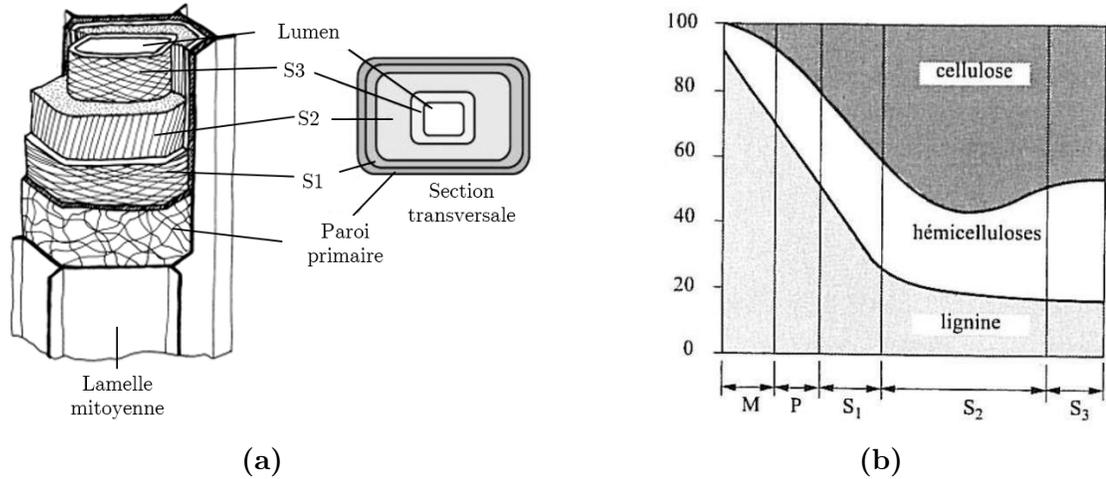


FIGURE 1.3 – Description à l'échelle cellulaire de l'anatomie du bois : a) organisation structurale d'une fibre de bois, adaptée de Plomion et al. (2001) et Trouy. (2015); b) distribution des trois composants polymériques dans les différentes couches d'une cellule [Panshin and De Zeeuw (1970)].

devient un conduit rempli d'eau permettant ainsi la conduction de la sève brute des racines aux feuilles. Cette eau est appelée « eau libre », contrairement à l'eau contenue dans les parois appelée « l'eau liée ». Lorsque le bois sèche, l'eau libre est d'abord extraite, sans induire de modification structurale ni de retrait. Le taux d'humidité (rapporté à la masse anhydre) à partir duquel il ne reste plus que de l'eau liée est appelé PSF (Point de Saturation des Fibres). Un séchage prolongé entraîne une évaporation au-dessous du PSF, qui induit des changements structurels de la cellule (retrait et déformation du bois). Le PSF varie d'essence à l'autre, mais se situe autour de 30%.

1.2 Propriétés mécaniques du bois

1.2.1 Notion d'orthotropie

Le bois est souvent considéré comme un matériau homogène orthotrope, et les travaux présentés ne feront pas exception. L'arrangement anatomique décrit dans la section précédente lui confère en effet une forte anisotropie : la direction privilégiée est celle du sens des fibres, appelée direction longitudinale (L). Avec la direction radiale (R) perpendiculaire aux cernes et la direction tangentielle (T) perpendiculaire aux deux précédentes, elles forment un repère usuellement utilisé pour décrire le matériau bois. L'orthotropie admise est alors la conséquence des symétries du bois, dans les plans radial (direction LR) et transverse (direction RT). Les 3 directions du bois ainsi que les plans de référence associés sont représentés dans la figure 1.4.

Les mesures ont montré que le module d'Young longitudinal du bois (à 12% d'humidité) est entre 10 et 20 fois supérieur à celui des autres directions [Kollman F (1968)]. .

Les modules de cisaillement des plans (LR) et (LT) sont à peu près égaux. Chez le résineux, ils sont environ 10 fois supérieurs à celui du plan transverse, tandis que chez le feuillu, le rapport est plutôt entre 3 et 5 [Kollman F (1968)] Bien que décrite à l'échelle macroscopique, cette anisotropie se lit dans les trois échelles structurelles du bois. Une bonne synthèse sur le sujet est proposée dans le travail de Pot (2012).

Enfin, cette anisotropie a aussi des conséquences sur les propriétés de retrait-gonflement du bois. Notamment, les propriétés de retrait-gonflement tangentielles sont plus importantes que les propriétés radiales, qui sont bien supérieures à celles dans la direction longitudinale [Siau (1984)].

Bien que ces situations de séchage et gonflement affectent surtout le bois sec à des faibles taux d'humidité, elles peuvent aussi survenir en cas d'une baisse du PSF sur du bois vert (voir section 3.1.1).

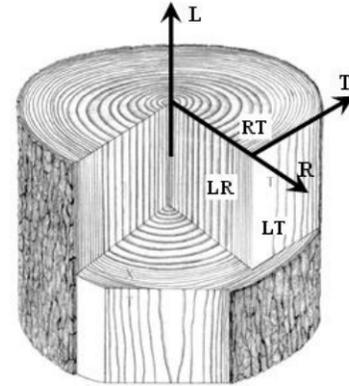


FIGURE 1.4 – Les trois directions de référence (Radial R, Longitudinal L, Tangentielle T), ainsi que leurs plans associés (transverse RT, radial LR et tangentiel LT). [Cloutier (2005)].

1.2.2 Paramètres conditionnant les propriétés mécaniques du bois

Densité

La densité ρ est considérée comme un paramètre déterminant dans la mécanique du bois. C'est un paramètre fortement variable, d'une essence à l'autre, d'un individu à l'autre, et même au sein d'un arbre. Au premier ordre, cette densité rend compte de la quantité de matière contenue dans le milieu cellulaire.

Témoin de la forte dépendance des propriétés mécaniques à la densité, une loi statistique en puissance a été établie par Guitard and El Amri (1987). Cette dernière permet d'estimer les coefficients de rigidités à partir des mesures de densité. Chez le bois vert, la mesure de l'infradensité ρ_i (rapport de la masse sèche d'un échantillon à son volume saturé) est généralement préférée à celle de la densité. Les travaux de Fournier et al. (2006) ont fourni l'équivalent des lois de Guitard and El Amri (1987) pour le module d'Young longitudinal E_L du bois vert en fonction de l'infradensité. Les deux lois (équation 1.1) sont quasi-linéaires, et permettent d'estimer l'influence que peut avoir la densité sur la rigidité :

$$\left\{ \begin{array}{l} [\text{Guitard (1987)}] \quad E_L = 14,4 \left(\frac{\rho}{0,65} \right)^{1,03} \\ [\text{Fournier et al. (2006)}] \quad E_L = 10,4 \left(\frac{\rho_i}{0,53} \right)^{1,03} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

avec E_L en GPa. La densité présente aussi une forte dépendance au taux d'humidité w . Les variations $\rho(w)$, $\rho_i(w)$ sont quantifiées dans les travaux de Kollman F (1968) et Guitard (1987).

Angle des microfibrilles

Comme mentionné précédemment, l'AMF de la couche S2 affecte aussi fortement le comportement mécanique du bois. La dépendance entre les rigidités et l'AMF est plus complexe que celle impliquant la densité. Néanmoins, plusieurs modèles se sont essayés à la description de cette dépendance [Xu and Liu (2004)]. Si une quantification précise est difficile, le module d'Young longitudinal augmente avec la diminution de l'AMF [Navi et al. (1995)]. Contrairement au cas de la densité, les variations AMF(E_L) sont fortement non linéaires, avec une diminution du module très forte pour un AMF compris entre 0° et $15-20^\circ$, puis, une chute plus modérée [Navi et al. (1995); Yang and Evans (2003)] pour un AMF supérieur à 20° . Ces deux indicateurs sont souvent utilisés conjointement pour déterminer les variations des rigidités [Yang and Evans (2003); Yamamoto and Kojima (2002)]. Dans la direction longitudinale, une forte densité couplée à un faible AMF donnera un bois rigide. Inversement, un bois de faible rigidité aura généralement un fort AMF et une densité faible. Par exemple, les jeunes tiges (tronc ou branche), ont généralement un fort AMF, ce qui leur permet de fléchir au vent plutôt que de casser [Lindström et al. (1998)]!

Angle du fil

L'angle du fil est un paramètre déterminant qui conditionne fortement les propriétés mécaniques du bois. L'angle du fil représente l'angle que forment les cellules avec la direction longitudinale de l'axe. Un angle nul signifie que les cellules sont orientées parallèlement à la direction de l'axe. Dès que l'angle augmente, les cellules tendent à former « une hélice ». Les propriétés longitudinales des cellules vont alors basculer de la direction longitudinale de l'axe vers les directions transversales (et inversement). Logiquement, une augmentation forte de l'angle du fil entraîne donc une diminution des propriétés mécaniques longitudinales à l'échelle de l'axe (module d'Young, seuils de rupture) : sur 4 espèces, les travaux de Mania et al. (2020) ont montré qu'un angle du fil de 15° pouvait entraîner une chute du module d'Young longitudinal de 50%, avoisinant les 70% chez certaines espèces. Dans ces travaux, les mêmes facteurs se retrouvent d'ailleurs pour les seuils de rupture en flexion. De manière générale, un angle du fil de 15° peut entraîner une perte de 50% des caractéristiques mécaniques longitudinales du bois [Laboratory (2010)].

Singularités du bois

Les singularités du bois représentent des particularités (noeuds, cavité, ondulations du fil, etc), dont la structure et les propriétés locales diffèrent du « bois parfait » décrit précédemment. Bien que les situations soient variables, l'influence des noeuds sur le bois a été investigué dans la littérature. Ces derniers sont des singularités très denses, mais avec des orientations de cellules variables au sein du noeud. Suivant leur position, il peuvent ainsi s'avérer être des renforts mécaniques ou au contraire points de faiblesses structurelles. Cependant, il semble que lorsqu'ils sont présents en proportion importante, ces derniers dégradent les propriétés mécaniques du bois de manière significative [Rocha et al. (2018); As et al. (2006); Koman et al. (2013)]. Bien que toutes les singularités seront négligées dans les travaux qui suivent, il est important de garder à l'esprit que ce sont des parties intégrantes du matériau bois dont la présence peut avoir des conséquences cruciales sur le risque de rupture.

1.2.3 Visco-élasticité du bois

Le bois est un matériau visco-élastique, en particulier lorsqu'il est à l'état vert ou très humide. Cela signifie que sa réponse à un stimulus mécanique se fait en deux temps. Tout d'abord une réponse instantanée, puis une réponse différée, dont l'expression dépend fortement de facteurs extérieurs, notamment la température et l'humidité [Bach (1966)]. Les mesures des caractéristiques visco-élastiques du bois vert sont aujourd'hui peu nombreuses [Pot (2012)]. Dans les travaux présentés, la composante visco-élastique du bois n'est pas prise en compte.

1.3 Le contrôle postural de l'arbre

L'arbre est en permanence soumis à un environnement fluctuant. Malgré la rudesse et les aléas des facteurs environnementaux extérieurs (vent, lumière, pluie, sol, ...), il doit maintenir une structure perenne stable. Ceci implique deux problématiques : (i) la résistance aux épisodes temporaires et (ii) l'élaboration de processus pour assurer la stabilité mécanique à long terme. L'objet de cette section est de décrire les phénomènes engagés dans la stabilité à long terme.

1.3.1 Contraintes de croissance

Les contraintes de croissance sont l'ensemble des contraintes engendrées par les processus de développement de l'arbre. Leur rôle est double : elles sont à la fois responsables de l'optimisation de la résistance à la flexion de la tige, mais aussi du contrôle postural de la structure [Alméras et al. (2008)]. L'étude de ces contraintes a permis d'en distinguer deux contributions additives [Archer (1986)] : les contraintes de support et les contraintes de maturation.

Les contraintes de support

Ce sont les contraintes engendrées par la charge de gravité. L'arbre est une structure évolutive, dont le poids augmente tous les ans par l'augmentation du nombre et des dimensions de ses axes. En particulier, chaque année, l'ajout de nouvelles cellules en périphérie par la croissance secondaire se traduit par des incréments de charge sur le bois existant. L'ancien bois (au cœur du tronc) subit alors l'ensemble des incréments de charge du bois déposé après lui : il est fortement contraint. A contrario, le bois nouvellement formé (en périphérie), ne supporte que son propre poids. Les couches au sein de chaque cerne étant très fines, son chargement est infime. Une illustration de la mise en place des contraintes de support est proposée dans la figure 1.5 dans le cas d'un tronc qui supporte en compression la masse de son houppier.

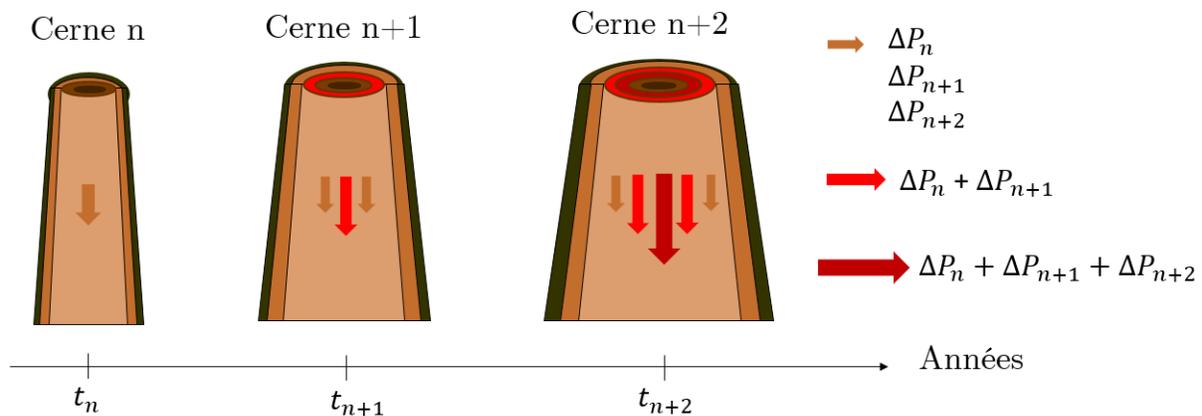


FIGURE 1.5 – Mise en place des contraintes de support dans un tronc vertical. A l'instant t_n , le bois subit l'incrément de poids du cerne n (charge marron, ΔP_n). A l'instant t_{n+1} , un nouveau cerne apparaît : il ne subit que son poids (ΔP_{n+1}), mais le bois plus ancien doit subir son poids et le poids du cerne précédent (charge rouge, $\Delta P_n + \Delta P_{n+1}$). Même raisonnement pour l'instant t_{n+2} .

Dans le cas d'un tronc droit, les sollicitations des incréments de supports sont de la compression axiale. Cependant, le port de l'arbre (structure élancée et jamais parfaitement verticale) ainsi que l'éventuelle dissymétrie de son houppier induisent sur les cellules des contraintes de flexion. Ces dernières sont dans les faits bien supérieures aux contraintes de compression axiale [Fournier (1990)]. C'est donc plus la résistance de la tige en flexion que de la compression qui est mise en jeu par les contraintes de support. À titre d'illustration, les contraintes de support dans un axe de rayon $R = 5$ cm, longueur $L = 5$ m, et masse $m = 40$ kg sont données, lorsque celui-ci croît verticalement (figure 1.6a) ou horizontalement (figure 1.6b). Les contraintes mises en jeu pour la configuration horizontale sont 100 fois supérieures à celles de la configuration verticale. Dans les deux cas, les chargements maximums sont dans la zone centrale, et les contraintes en périphérie nulles. Comme l'illustre la figure 1.6b, l'état de flexion n'est pas celui résultant d'une mise charge instantanée (profil linéaire, face supérieure en traction et face inférieure en compression), comme il est couramment vu en génie civil.

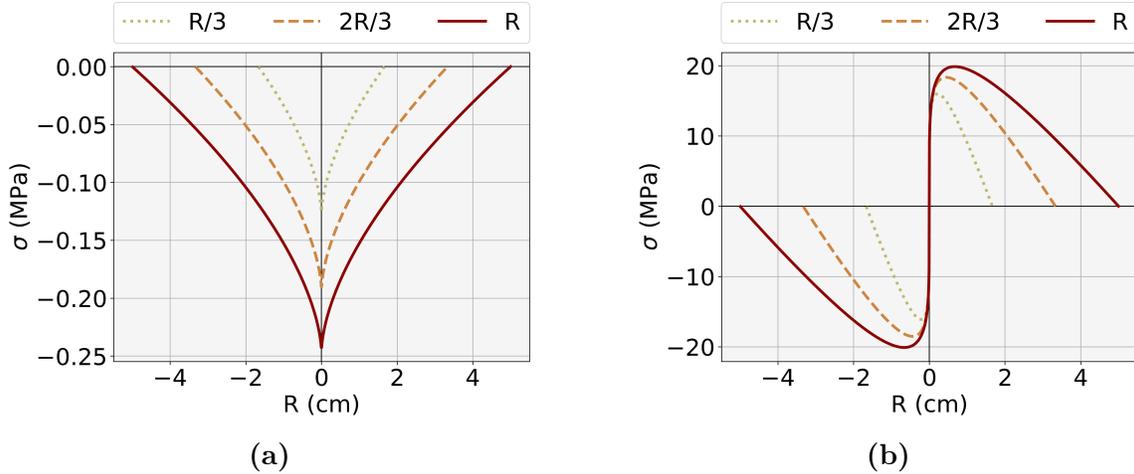


FIGURE 1.6 – Allure des profils et ordre de grandeurs des contraintes de support en fonction de la position dans la section ($R=0$ est alors le centre de l’axe) : a) dans une branche parfaitement verticale (compression axiale seule); b) dans une branche parfaitement horizontale (flexion). Les dimensions de l’axe sont les mêmes, mais les ordres de grandeurs des contraintes de support varient grandement en fonction de son orientation.

Le profil d’évolution de ces contraintes est bien plus complexe, pondéré par des cinétiques de croissances variables (poids, longueur, diamètre) et une courbure qui évolue dans le temps. À ce sujet, Fournier et al. (1991a) a étudié l’influence de différents scénarios de croissance (arbre se déséquilibrant, arbre symétrique, etc.) sur les profils des contraintes de support. Ses travaux ont mis en relief que la vision à un instant donné de l’arbre n’est qu’un regard infime de l’histoire du chargement. Ainsi, sans connaître son historique de formation, il est difficile d’avoir une idée précise du profil des contraintes de support présentes dans ses axes.

Les contraintes de maturation

La maturation des cellules est un processus qui se déroule quelques semaines à quelques mois après leur formation, par division cellulaire au niveau de l’assise cambiale. Ce processus correspond à la lignification de la paroi secondaire, qui s’accompagne de modifications structurelles partiellement comprises, mais dont les conséquences sur les propriétés mécaniques sont bien connues : on observe une tendance à l’expansion tangentielle et radiale, et un rétrécissement longitudinal [Alméras and Clair (2016)]. Dans nos travaux, nous nous intéressons principalement à la composante longitudinale. Cette tendance au rétrécissement longitudinal est contrainte par l’adhésion des cellules « en maturation » aux cellules pré-existantes, beaucoup plus rigides. Ces cellules en maturation se retrouvent dans un état de tension longitudinale et de fait, compriment les cellules plus anciennes. Le processus de retrait de maturation est illustré dans la figure 1.7.

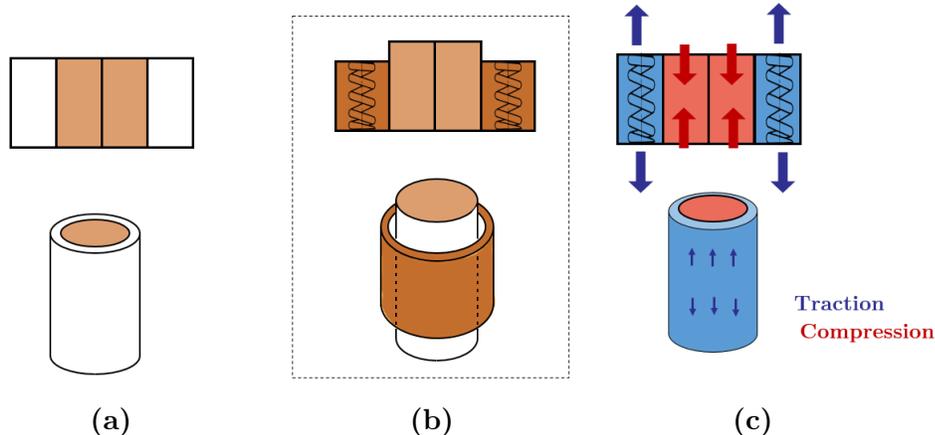


FIGURE 1.7 – *Mise en place des contraintes de maturation. a) Formation d'une nouvelle couche de cellules ; b) Maturation de la nouvelle couche : retrait axial libre (situation fictive) ; c) Situation réelle : adhésion aux cellules pré-existantes, génération de contraintes de tension longitudinale en périphérie, compression au centre.*

La contrainte de tension des nouvelles cellules en périphérie est alors équilibrée par l'ensemble des incréments de contraintes en compression des cellules déjà existantes. Ce phénomène conduit à un champ de contraintes mécaniques particulier, théorisé dans un premier temps par Kübler (1959b) puis largement repris dans la littérature (voir section 1.3.3). Ce profil de contrainte peut être modifié par l'axe pour maintenir ou changer son orientation, en introduisant des dissymétries de part et d'autre de la tige. C'est le propre du bois de réaction, qui est décrit dans la partie suivante.

En définitive, l'histoire de chargement d'une cellule de bois est particulière : à sa création, cette cellule va d'abord être libre de toute contrainte, puis va progressivement être mise en tension lors du processus de maturation. Elle va ensuite subir (i) les incréments de contraintes de poids de toutes les cellules formées après elle, (ii) les incréments en compression (ou tension, voir section suivante) en réponse à la maturation des cellules formées après elle. Le profil final de contraintes dépend de l'historique de formation de l'axe et ne peut pas être estimé simplement à partir de l'observation de la structure à un instant donné.

1.3.2 Bois de réaction et contraintes induites

Malgré des conditions de croissance très variées, les arbres présentent généralement un port érigé et droit. Ceci vient de leur capacité à s'orienter activement. Cette motricité est l'un des piliers du maintien de l'espèce, car c'est elle qui permet d'adapter la structure mécanique de l'arbre à un environnement changeant. Pour une plante, il y a deux moyens de changer la

courbure d'un axe [Mouliou and Fournier (2009)] :

- Pendant la croissance primaire, grâce à un différentiel de croissance longitudinale entre deux faces.
- Lors de la croissance secondaire, où deux leviers peuvent être utilisés : (i) la formation de « bois de réaction », décrit dans les paragraphes suivants, (ii) la formation d'excentricité, qui est différentiel de croissance radial de part et d'autre de la moelle.

Le bois de réaction est un bois particulier qui se forme au moment de la maturation des cellules. Il est généralement prêté au bois de réaction de nombreuses définitions et origines, selon les professions et les avancées de la recherche [Jourez (1997a)]. Mais aujourd'hui, selon l'IAWA (International Association of Wood Anatomists) [IAWA (1964)], c'est « *un bois qui présente des caractères anatomiques plus ou moins distinctifs [...] présents dans des portions de tiges penchées ou coudées et dans les branches [...] comme si le végétal s'efforçait de reprendre une position normale* ». En réalité, Fisher and Stevenson (1981) ont montré que le bois de réaction est constamment présent, même dans les troncs droits. Les auteurs mettent alors en avant deux explications : (i) l'arbre doit en permanence adapter son comportement aux conditions extérieures (sol pas parfaitement plat, vent locaux, etc.) et (ii) un tronc droit à un instant t peut avoir été penché par le passé. Il existe par exemple des modèles d'architectures où l'axe apical primaire se développe avec une certaine inclinaison, puis finit par se redresser [Hallé et al. (1978)].

L'évolution a sélectionné deux mécanismes efficaces qui font intervenir deux types de bois de réaction : le « bois de compression » et le « bois de tension ». Dans les paragraphes suivants, une description plus détaillée de ces tissus permet de comprendre comment ces derniers, par la redistribution des contraintes de croissances qu'ils engendrent, participent au processus de contrôle postural.

Le bois de compression

Découvert et très étudié durant le siècle dernier [Westing (1968)], c'est un bois caractéristique des gymnospermes. Il se forme sur la face ventrale (inférieure) de l'axe incliné qui tente de retrouver sa verticalité. Contrairement au mouvement induit par la maturation du bois normal, la cellule du bois de compression tend à l'élongation longitudinale. Son adhésion aux cellules pré-existantes la met alors dans un état de compression (d'où le nom « bois de compression »). Les cellules dans le bois opposé (face supérieure) sont dans un état de tension, et l'asymétrie de maturation qui en résulte est à l'origine du processus de courbure qui conduit au redressement de l'axe (figure 1.8) : les cellules sur la partie ventrales sont « poussées », celle de la partie dorsale « tirées ». Cette asymétrie dans la maturation est très souvent accompagnée d'une excentricité dite « hypotrophique » de la moelle : les cernes sont excentrés, plus larges sur la partie inférieure de l'arbre (figure 1.8). Sur certains individus, le bois de compression est également distinguable par sa coloration [Westing (1965); Timell (1986)]. La figure 1.8 propose une représentation mécaniste du bois de compression.

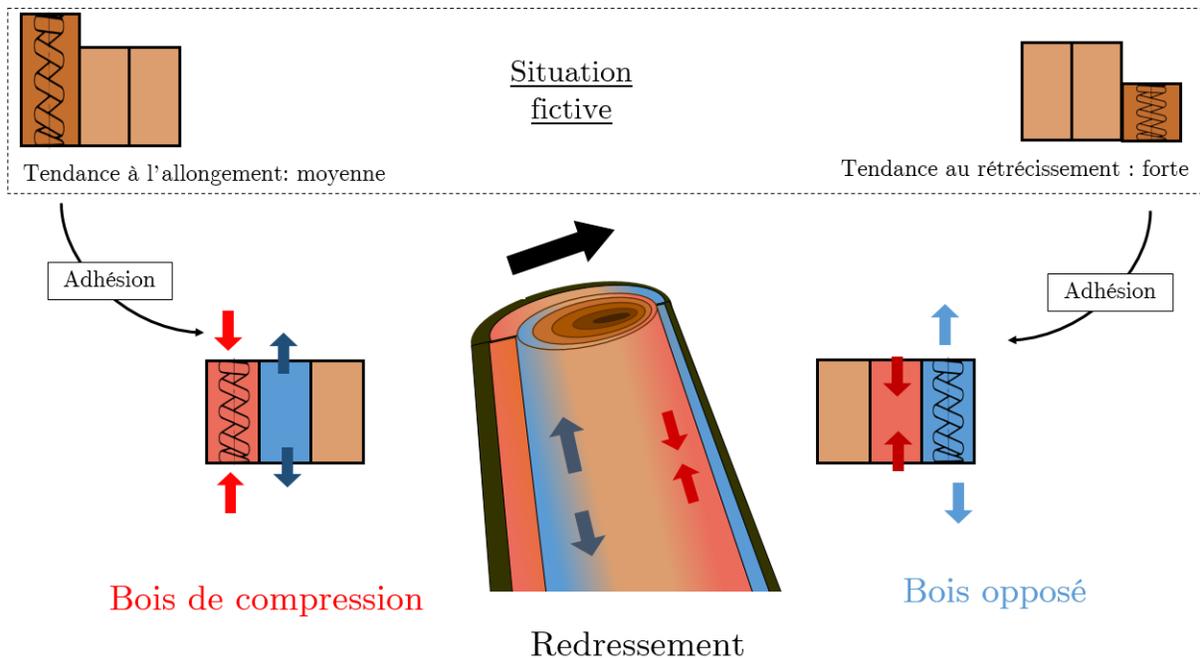


FIGURE 1.8 – Axe incliné en cours de redressement par la création de bois de compression. Sur la partie inférieure de l'axe incliné, on observe la tension (bleu) induite par la maturation des cellules du bois de compression. Sur la partie supérieure de l'axe, on observe la compression induite par la maturation du bois opposé (rouge). L'asymétrie résultante provoque le redressement.

Le bois de compression est plus dense (+10 à +40%) que le bois normal [Westing (1965, 1968)], avec un fort retrait axial [Jourez (1997a)]. Cette forte densité s'accompagne cependant d'un module d'élasticité plus faible, mais d'une résistance à la compression plus élevée (en termes de propriétés longitudinales) [Kollman F (1968)].

Anatomiquement, il présente des trachéides plus courtes avec des parois plus épaisses, signe d'une lignification plus développée. Dans la paroi cellulaire, la couche S3 est absente et la paroi S2 est plus épaisse. Au sein de cette même paroi, l'AMF est plus élevé ($>30^\circ$, contre 10° à 30° dans le bois normal) [Westing (1965, 1968)]. C'est ce fort AMF qui est responsable la mise en compression des nouvelles cellules [Baillères et al. (1995)]. Une représentation d'une cellule de bois de compression est proposée dans la figure 1.10.

Le bois de tension

Caractéristique des angiospermes, c'est un bois qui se forme en général sur la partie supérieure de l'axe incliné qui tend à se redresser. Lors de leur maturation, les cellules de ce bois tendent à se rétracter fortement, ce qui génère la tension, tels des câbles, à l'origine du redressement de l'axe. Une représentation du processus de redressement via la formation de bois de tension est proposée dans la figure 1.9.

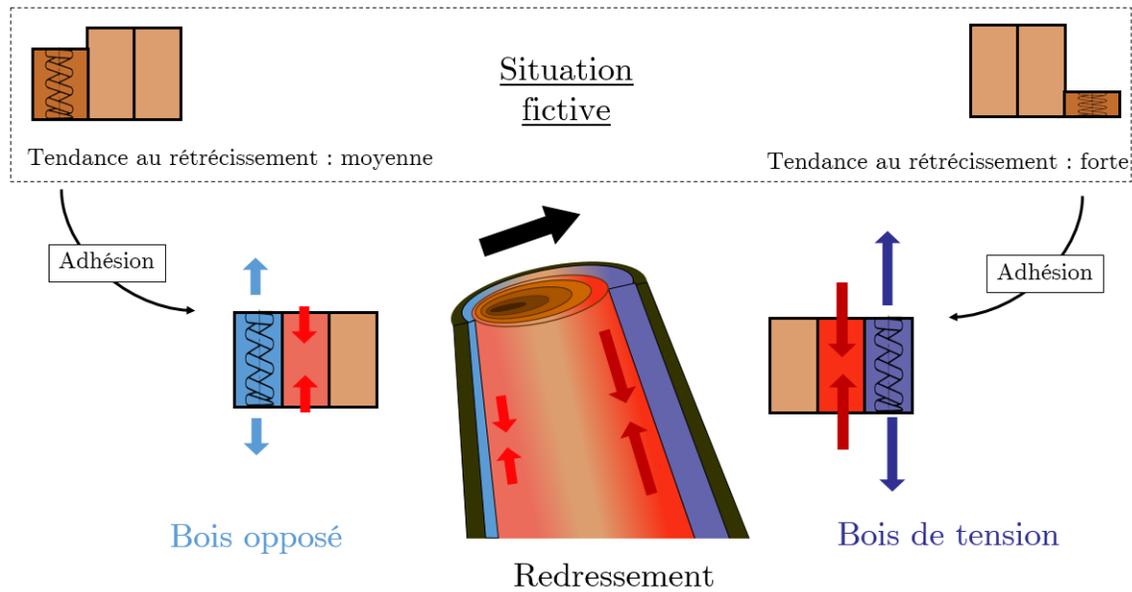


FIGURE 1.9 – *Axe incliné en cours de redressement par la création de bois de tension. Sur la partie supérieure, on observe la forte compression (rouge foncé) induite par la maturation des cellules du bois de tension. Sur la partie inférieure de l'axe, on observe la compression moyenne induite par la maturation du bois opposé (rouge clair). L'asymétrie obtenue provoque la courbure et ainsi le redressement.*

Le bois de tension est généralement 5% à 10% plus dense que le bois normal. Mais chez certaines essences, la différence peut être plus importante (jusqu'à 30%) [Hughes (1965); Dadswell and Wardrop (1955)]. Anatomiquement, le bois de tension est très riche en fibres. On y trouve logiquement une présence moindre de vaisseaux. C'est une structure également caractérisée par une très forte teneur en cellulose, ainsi qu'un angle des microfibrilles très faible (environ 5°). Chez une grande partie des feuillus, un des déterminants les plus connus de ce tissu est la présence d'une couche cellulosique dans les fibres. Cette couche, appelée « couche G » du fait de son apparence gélatineuse, peut se déposer selon plusieurs cas de figures : substitution de la couche S3, remplissage de la couche S2 ou encore une combinaison des deux configurations [Dadswell and Wardrop (1955)]. La figure 1.10 schématise des fibres de bois de compression, de bois « normal » et de bois de tension (dans la configuration où la couche G substitue la couche S3 seulement).

La couche G n'est cependant pas un indicateur exclusif de la présence de bois de tension. Dans une étude concernant plus de 120 essences de feuillus différentes, [Fisher and Stevenson (1981)] ont montré que seulement une moitié de ces derniers présentaient une couche G. Chez certaines espèces pour lesquelles la fibre G est absente, les fibres de bois de tension peuvent alors être mécaniquement caractérisées par une forte tension, d'intensité similaire à celle de la fibre G [Clair et al. (2006)].

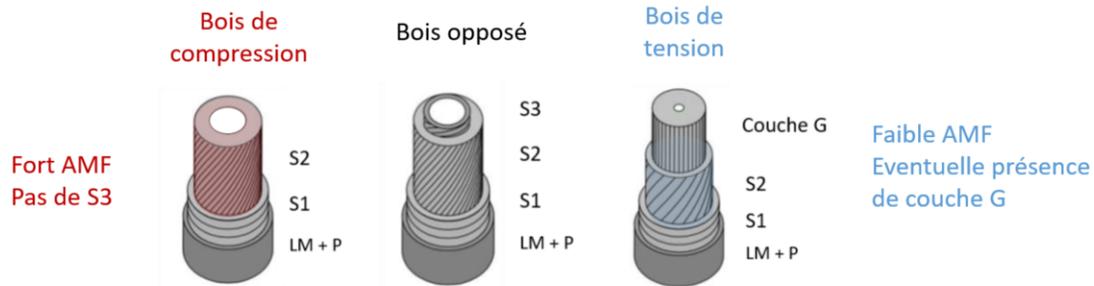


FIGURE 1.10 – Structures de fibres de bois de compression (gauche), tension (droite) et bois normal (centre). *LM* : lamelle mitoyenne, *P* : paroi primaire. Schémas adaptés de [Déjardin et al. (2010)].

Aujourd’hui, la méthode qui permet de caractériser un bois de réaction de manière universelle (pas de dépendance vis-à-vis de certains traits anatomiques) est mécanique. Elle consiste en la mesure des déformations liées aux relâchements locaux de contraintes. Le paragraphe 1.3.2 décrit les principales méthodes de mesure de ces déformations. Il semble cependant important de garder en tête que dans le siècle dernier, peu d’auteurs ont inclus ces considérations mécaniques lors de leurs études sur le bois de tension. Ces derniers se sont généralement basés sur (i) la présence de fibres G, et (ii) des considérations géométriques (tiges en redressement, troncs penchés, etc) [Ghislain and Clair (2017)]. Ainsi les études majeures de Höster and Liese (1966); Fisher and Stevenson (1981) et Fisher (1985) sur le bois de tension ne font pas état des traits mécaniques de ce dernier. Enfin, si pour les gymnospermes, le lien entre le bois de compression et l’excentricité est connu, il est moins clair pour le bois de tension [Jourez and Avella-Shaw (2003); Wang et al. (2009)].

Bois de réaction et conséquences sur le matériau d’ingénierie

Les contraintes accumulées lors de la formation du bois (support et maturation) sont généralement libérées lors des opérations de transformation de l’arbre (abattage, sciage, conditionnement). Cette annulation des contraintes de croissance conduit à une déformation des cellules, caractérisée par une forte expansion tangentielle et une légère contraction radiale [Gril, J et al. (1993)]. Cette anisotropie de déformation peut conduire à des fissurations et des fentes. Lors de l’abattage, on retrouve notamment la fissuration à cœur en étoile ou en rouleur. Lors du sciage, la ligne de découpe ne suivant souvent pas le fil naturel du bois, on peut observer différents types de défauts : planches courbées, vrillées, tuilées. Enfin, lors du séchage le résultats est inverse à celui généré par l’annulation des contraintes de croissance : on observe alors une fissuration radiale partant de la périphérie [Gril, J et al. (1993)]. Les déformations sont d’autant plus intenses que l’arbre présente une forte proportion de bois de réaction. Quelques représentations des schémas classiques de fissuration sont proposées dans la figure 1.11.

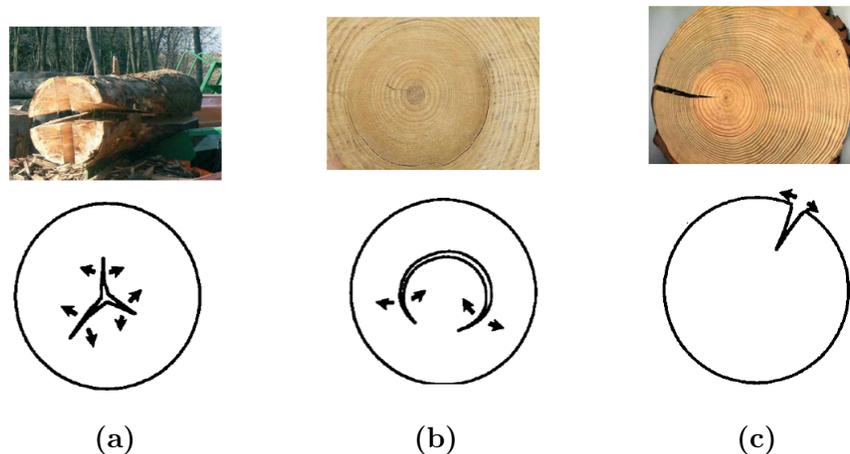


FIGURE 1.11 – Quelques exemples de cas classiques de fentes à la suite d'opérations sur les grumes. Relaxation des contraintes de croissances : a) Fentes à cœur en étoiles (photo²), b) Roulures à cœur (photo³). Retrait anisotrope dû au séchage : c) fentes en périphérie (photo⁴). Schémas issus de Gril and Thibaut (1994).

Une autre conséquence industrielle est celle liée à l'étuvage du bois vert. Lorsque ce dernier est chauffé pour la première fois, on observe des déformations propres à l'annulation des contraintes de croissance. Ce phénomène est appelé « recouvrance hygro-thermique » [Yokota T (1962)]. Découvert par Kübler (1959a), il a ensuite été largement étudié [Jullien, D and Gril, J (1996); Ueda Matsuo et al. (2016); Sujun et al. (2016)]. La recouvrance hygro-thermique, c'est l'expression différée de la libération des contraintes de croissance engendrée par une décharge (opération d'abattage par exemple). De même que tout processus visqueux, ce phénomène peut être thermiquement activé. On le retrouve même particulièrement actif à partir de 65°-70° [Gril et al. (1993)].

Les propriétés et les contraintes de travail industriel du bois dépendent donc grandement du niveau de tension/compression dans lequel se trouvent les tissus. Il y a une grande variabilité de bois de réaction entre les essences, mais il peut aussi y avoir un gradient d'intensité élevé au sein d'un même arbre (à la fois sur les parties aériennes et racinaires), dans la section d'une même tige ou encore dans un même cerne [Jourez (1997b)]. Le bois de réaction est l'image de l'histoire de l'arbre. Il traduit une nécessité de contrôle postural, dont l'origine peut être transitoire (forts vents, phototropisme) ou stationnaire (sol incliné ou inclinaison permanente de l'arbre, ou plus généralement de l'axe).

2. <https://www.bioenergie-promotion.fr/478/valoriser-les-pieds-de-grumes-en-buches/>

3. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Roulure>

4. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/botanique-bois-formation-structure-475/page/>

Caractérisation des contraintes de maturation

La caractérisation des contraintes de maturation s'effectue généralement par une mesure de leur relâchement suite à une décharge locale. Les méthodes de mesure de ces précontraintes portent le nom de « mesures de DTM ou DLM » (Déformations Transverses de Maturation ou Déformations Longitudinales de Maturation), et consistent à mesurer les déformations des cellules entre l'état de repos et l'état après libération des contraintes. Généralement, la déformation étudiée concerne les cellules en périphérie. Comme ces cellules participent très peu à l'action de support de l'arbre, la relaxation observée correspond pleinement aux contraintes de maturation [Fournier et al. (1994)]. Plusieurs méthodes se distinguent aujourd'hui, et notamment :

- La méthode du « trou » : il s'agit de la mesure de la variation de distance entre deux pointes lorsqu'un trou est percé entre ces dernières [Raymond et al. (2004)].
- La méthode de Nicholson [Nicholson (1971)] : elle consiste en l'extraction d'une lamelle de bois. Au préalable, cette dernière a été marquée de repères, ce qui permet de mesurer ses variations de dimension et donc de caractériser ses déformations et courbures.
- La méthode des « deux traits de scie » : c'est la mesure de la déformation longitudinale engendrée par deux traits de scie de part et d'autre de la zone de mesure [Fournier, M et al. (1994)]. Suivant la taille du diamètre de l'axe et l'espace entre les traits, le capteur de déformation peut être différent (extensomètre, jauge).

Ces mesures locales permettent d'évaluer le profil de contrainte de maturation en périphérie. Elles servent à qualifier l'éventuelle présence de bois de réaction et donnent un profil circumférentiel de contraintes. Bien que représentant un travail expérimental très conséquent, les méthodes de Nicholson et du trait de scie sont applicables sur des tranches de section, ce qui peut permettre de remonter à l'historique des contraintes de maturation dans la section [Gril et al. (2017); Alméras et al. (2018)]. Ces mesures sont aujourd'hui limitées et rares.

En parallèle à ces approches expérimentales généralement complexes à mettre en oeuvre (notamment pour remonter à l'historique des contraintes de maturation), des modèles biomécaniques ont été développés. Ils permettent de mieux comprendre comment sont impliqués les différents processus dans le contrôle postural.

1.3.3 Modélisation des contraintes de croissance

Modèles biomécaniques

Modèle de Kübler : description, intérêt et limites

C'est Kübler [Kübler (1959a)] qui établit au siècle dernier le premier modèle biomécanique de contraintes de croissance. Le problème est supposé axisymétrique, centré sur la moelle. L'axe est donné droit et parfaitement cylindrique. Le comportement mécanique du bois est supposé homogène, élastique et isotrope transverse. Les déformations de maturation sont fixées constantes tout au long du processus de croissance et supposées s'exprimer instantanément. Les contraintes dans la direction radiale sont supposées nulles. L'expression des contraintes de maturation d'un tronc de rayon final R s'écrit alors :

$$\begin{cases} \sigma_L(r) = \hat{\sigma}_L \left[1 + 2 \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] \\ \sigma_R(r) = \hat{\sigma}_T \ln \left(\frac{r}{R} \right) \\ \sigma_T(r) = \hat{\sigma}_T \left[1 + \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] \end{cases} \quad (1.2)$$

avec $\hat{\sigma}_i$ les contraintes de maturation moyennes dans chaque direction.

Un exemple de profil de contrainte de maturation de Kübler (direction L) est proposé dans la figure 1.12a, pour un axe de rayon final $R = 5$ cm, et une contrainte moyenne $\hat{\sigma}_L = 5$ MPa. On retrouve le profil décrit qualitativement dans la section précédente : une compression à cœur et une tension en périphérie. Ce modèle simpliste permet déjà de comprendre l'une des deux fonctions des contraintes de maturation [Alméras et al. (2008)] : celle d'une amélioration de la résistance de la tige en flexion.

Soit une source de contraintes en flexion (vent par exemple). En superposant le champ de contrainte en flexion et celui des contraintes de maturation, on obtient les contraintes subies par l'axe. Cette superposition est montrée dans la figure 1.12b. Par rapport à une poutre qui ne serait pas précontrainte, l'axe est d'avantage sollicité en tension en périphérie, et en compression à cœur. Or, le bois a une résistance longitudinale en compression (rouge sur la figure 1.12b) plus faible qu'en traction (bleu). Cette redistribution préserve donc la périphérie vitale pour l'arbre, au détriment éventuel du cœur, sacrificable. En ce sens, la distribution des contraintes de croissance est bénéfique pour l'arbre.

La figure 1.12a permet aussi d'illustrer l'une des principales limites du modèle de Kübler : l'artefact à la moelle conduit à des valeurs de contraintes irréalistes.

Modèles biomécaniques de croissance

À la suite du modèle de Kübler, de nombreux biomécaniciens se sont attelés à développer des outils de modélisation biomécanique. Un deuxième modèle analytique connu est celui

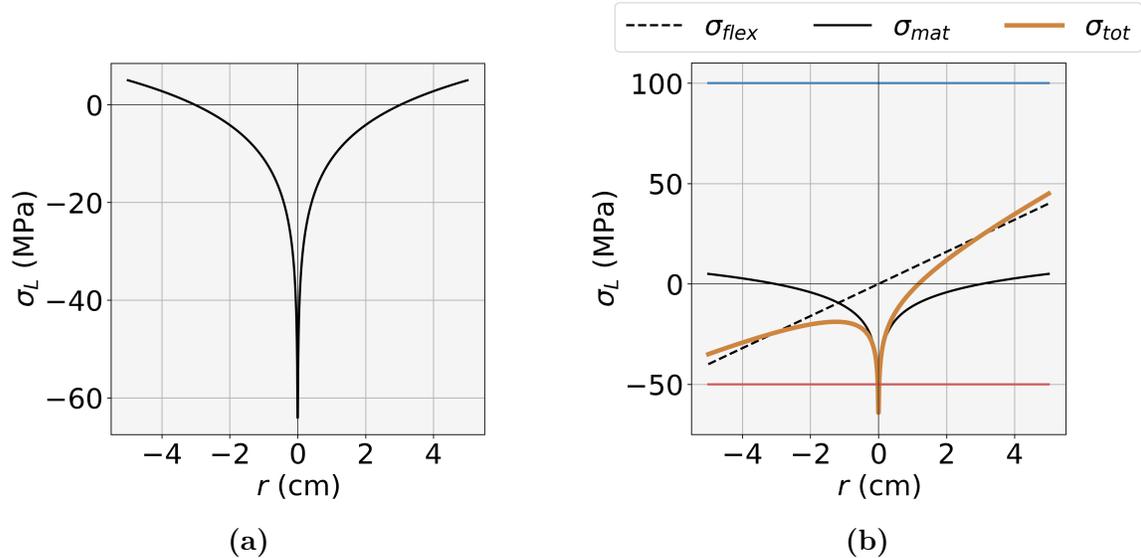


FIGURE 1.12 – Modèles biomécaniques. a) Profil de Kübler pour une contrainte longitudinale moyenne $\hat{\sigma}_L = 5$ MPa. b) Représentation des contraintes subit par l'arbre en présence d'une contrainte extérieure de flexion σ_{flex} . Grâce aux contraintes de maturation σ_{mat} , l'arbre minimise l'impact en compression (solicitation face à laquelle le bois est le moins résistant). Les limites rouge et bleu représentent un ordre de grandeur des contraintes de ruptures du bois en compression et traction longitudinales [Kollman F (1968)].

de Archer (1976), qui s'est affranchi de l'hypothèse d'isotropie transverse, et a commencé à prendre en compte la dissymétrie des contraintes de croissance [Archer and Byrnes (1974); Archer (1976, 1986)]. Quelques années plus tard, Fournier (1989); Fournier et al. (1991a,b) développent le premier modèle semi-analytique de contraintes de croissance. Fournier (1989) propose en particulier d'intégrer des variations circulaires de rigidité et maturation, ainsi que la possibilité de prendre en compte des contraintes de torsion.

Par la suite, Fournier et al. (1994) sont les premiers à établir le lien entre les contraintes de croissance et la réponse gravitropique. Le modèle proposé est alors un modèle analytique 1D basé sur l'asymétrie des contraintes de maturation. Les auteurs supposent que c'est aux caractéristiques longitudinales du bois que l'on doit une majorité de la réponse gravitropique. C'est un modèle qui a été utilisé par Coutand et al. (2007, 2014) pour mieux comprendre la réponse gravitropique. Notamment, Coutand et al. (2007) l'a éprouvé pour expliquer le processus de redressement de troncs de jeunes peupliers. Cette étude montre alors la nécessité d'un modèle plus élaboré, car sur des temps courts comme la saison, le modèle explique seulement 32% de la variation de courbure totale.

Ce modèle de Fournier et al. (1994) a par ailleurs été largement repris et amélioré : en 2002, Yamamoto et al. (2002) y ajoutent une modélisation de la croissance primaire, et remontent au calcul de courbure pour expliquer l'orientation d'axes durant les premiers stades de développement. En 2009, Alméras and Fournier (2009) y adjoignent la prise en compte du

moment fléchissant de la structure, l'excentricité de la croissance et un gradient de rigidité. Une étude de sensibilité est alors mise en place pour qualifier le rôle de chaque paramètre. Des prédictions théoriques ont été établies sur les critères de design d'un arbre et les conditions pour une stabilité mécanique à long terme. Enfin, les travaux de Huang et al. (2010) s'inspirent aussi de ce modèle. À la différence des travaux de Alméras and Fournier (2009), les auteurs ne se basent pas sur une méthode géométrique pour l'estimation du moment de flexion, mais sur une déformation de retour élastique « spring back strain » (SBS). Le SBS représente la déformation obtenue après coupe d'un axe et donc libération de ses contraintes de croissance. À l'image des travaux de Alméras and Fournier (2009), l'étude de 4 facteurs impliqués dans la correction gravitropique est proposée : les contraintes de croissance, la rigidité, l'excentricité et le rayon initial qui permet de prendre en considération la rigidité de flexion initiale de l'axe. Ce modèle a ensuite été repris dans la littérature pour caractériser la correction gravi-tropique de troncs inclinés et de branches [Tsai et al. (2012); Hung et al. (2016, 2017)].

Dernièrement, Alméras et al. (2018) ont développé un ensemble de formulations analytiques dérivées du modèle de Fournier et al. (1994), intégrant certains scénarios de croissance (pas de variation de courbure dans le temps par exemple) et lois d'évolutions paramétriques (rigidité, déformations de maturations, etc.).

Enfin, au début du XXI^e siècle, des modèles à l'échelle de l'arbre ont vu le jour [Fourcaud et al. (2003); Ancelin et al. (2004)]. Ce sont des modèles par éléments finis qui prennent en compte les contraintes de maturation, avec une formulation basée sur la théorie de Kübler.

Comprendre les acteurs moteurs du contrôle postural

Les travaux d'Alméras et al. (2005) montrent que sur 17 arbres en redressement actif, l'asymétrie des contraintes de maturation est l'acteur majeur du changement de courbure. Les mesures effectuées expliquent plus de 57% du redressement chez les angiospermes et 90% chez les gymnospermes. En deuxième position, vient l'excentricité, puis le gradient de rigidité. Chez les gymnospermes, le gradient de rigidité semble contrecarrer le redressement (résultat confirmé par Huang et al. (2010)). On peut alors se demander pourquoi la sélection naturelle a conservé ce type de bois. Alméras et al. (2005) y voient notamment deux hypothèses explicatives possibles : (i) la fonction de ce bois ne serait pas seulement de contrecarrer l'effet dû au poids, mais surtout de prévenir d'éventuelles ruptures. Or, les charges pondérales engendrent souvent des contraintes de compression susceptibles de mener à de la rupture, charges face auxquelles le bois de compression est plus résistant. Pour ce trait, l'arbre donnerait donc priorité à la résistance mécanique, et le redressement passerait en second plan ; (ii) comparé au bois normal, le bois de compression est plus riche en lignine et moins en cellulose. Or la lignine est moins coûteuse à produire. Ainsi le bois de compression serait un bon compromis entre coup de production et efficacité biomécanique

Si les effets isolés sont importants, ils n'expliquent pas à eux seuls tout le contrôle postural. Lorsque l'on couple les effets, l'excentricité prend de l'importance [Alméras et al. (2005)]. Cette dernière pourrait faire figure de moyen préférentiel pour garantir la stabilité de l'arbre à

long terme, en permettant d'augmenter le contrôle de la posture à moindre coût de construction (elle sous-tend une relocalisation des ressources et non pas une production accrue de bois [Clair et al. (2003)]).

Pour caractériser la stabilité biomécanique à long terme de peupliers, Alméras and Fournier (2009) ont introduit la notion de performance gravitropique, définie par le ratio de « la perturbation » (provoquée par les efforts extérieurs, ici le poids de la structure) à « la correction » (initiée par la structure pour contrecarrer l'effet de la perturbation gravitationnelle). Chez les peupliers, cette performance est plus efficace si la rigidité, le gradient de contrainte de maturation, l'élanement et le diamètre sont importants. Plus généralement, il a été mis en évidence que la correction gravitropique contraignait l'allométrie de croissance $L(R)$ de la tige (avec L sa longueur, R son rayon). Dans le cas d'axes (branches ou troncs) inclinés, elle vient notamment limiter l'augmentation de la longueur, ce qui dans certains cas peut limiter certains comportements, notamment la recherche de lumière. Avec son modèle, Huang et al. (2010) aboutit globalement aux mêmes considérations que Alméras et al. (2005); Alméras and Fournier (2009). Son modèle est plus basique, et prend logiquement en compte moins de situations.

1.3.4 Acclimatation de l'arbre aux sollicitations mécaniques dues au vent : la thigmomorphogenèse

Le vent, par la déformation des organes qu'il provoque, régule la croissance des arbres. Lorsqu'elle est suffisamment importante, cette déformation est perçue à l'échelle cellulaire, induisant une réponse de l'arbre qui adapte sa croissance. Pour un arbre exposé au vent, cela se traduit généralement par une diminution de la croissance primaire et une augmentation de la croissance secondaire [Cutand et al. (2009); Moulia et al. (2015); Bonnesoeur (2016); Niez (2018)]. La réponse physiologique aux sollicitations mécaniques a été nommée « thigmomorphogenèse ». La paternité du terme est attribué à Jaffe (1973), mais les premiers travaux sur le sujets sont ceux de Boyer (1967). Pour les arbres, les travaux sur ce processus se sont surtout concentrés sur l'étude des troncs. Par exemple, en comparant des arbres dont la déformation a été artificiellement réduite (à l'aide de haubanages) avec des arbres libres de tout mouvement [Meng et al. (2006); Bonnesoeur (2016)]. Les deux situations montrent des caractéristiques de croissances très différentes : les arbres haubanés ont une croissance primaire plus importante, tandis que les arbres libres ont une croissance secondaire plus développée.

De plus lorsque les sollicitations du vent ont une direction privilégiée, on observe une ovalisation des sections transversales [Roignant et al. (2018); Niez (2018)], et la formation d'un bois particulier, appelé « bois de flexion ». Ce dernier se différencie par ses caractéristiques anatomiques, présentant généralement un AMF plus élevé que le bois normal, des fibres et éléments de vaisseaux plus courts, avec en conséquence une densité légèrement supérieure [Telewski (1989); Badel et al. (2015)] et des propriétés particulières [Niez et al. (2020)]. En plus de modifier la géométrie et l'anatomie de la section à l'échelle locale, la sollicitation

au vent entraîne aussi des modifications à distance, avec une allocation préférentielle de la biomasse vers les racines, favorisant probablement l’ancrage au sol [Coutand et al. (2008)]. Enfin, cette acclimatation aux stimuli mécaniques semble être un processus déterminant pour l’arbre, en produisant des effets bénéfiques même en situation de stress hydrique, probablement indispensable à sa pérennité dans un environnement fluctuant [Niez et al. (2019)].

Même si aucun travaux n’a à ce jour été effectué exclusivement sur les branches, il semble légitime de faire l’hypothèse a priori que ces structures élancées et avec des ramifications particulières (pas de houppier centré comme il se trouve généralement sur les troncs) sont aussi capables d’ajuster leur géométrie et l’anatomie de leur bois aux sollicitations mécaniques dues au vent. Cependant, malgré l’importance potentielle de cet aspect, il n’est pas traité dans les travaux présentés.

1.4 Biomécanique des branches : un panorama

Si les connaissances et recherches sur la biomécanique des troncs inclinés ont été importantes, il reste encore beaucoup d’incertitudes et de questionnements sur l’étude des branches. L’objet de cette section est de poser un bilan sur l’état des connaissances de la biomécanique des branches.

1.4.1 Propriétés anatomiques et mécaniques des branches

En termes anatomiques, l’AMF moyen chez les branches de résineux est généralement plus élevé que celui des troncs [Färber et al. (2001); Reiterer et al. (1998)]. Färber et al. (2001) ont mesuré l’AMF le long de branches de *Picea abies*, dans le bois de compression (zone inférieure) et le bois opposé. Il ont alors montré que l’AMF dans le bois de compression diminuait avec la distance à l’insertion. L’AMF dans le bois opposé connaît un schéma particulier, en chutant brusquement sur la partie centrale (dans la direction longitudinale) de la branche. Cela suggère que ce dernier joue un vrai rôle dans la tenue mécanique, en rendant cette portion de la branche plus rigide. Fait intéressant, les distributions radiales de l’AMF des bois de compression et opposé sont uniformes à la base de la branche. Cette observation a été confirmée par Burgert and Jungnikl (2004), qui ont montré que les densités, AMF et modules d’Young longitudinaux des branches de *Picea abies* et *Taxus baccata* ne présentaient pas de variations radiales dans cette zone. Cela suggère un dimensionnement différent du tronc (flexible dans les premiers stades de développement, puis qui se rigidifie) : le tissu à la base de la branche a un AMF important (plus grande flexibilité), et ce tout au long du développement de l’organe. Ce caractère uniforme peut s’expliquer par le dimensionnement à la charge de gravité continûment croissante et présente dès les premiers stades de développement.

Cannell and Morgan (1987) ont mesuré les module d’Young de branches de 4 espèces tempérées, 3 résineux *Picea sitchensis*, *Larix decidua*, *Pinus contorta* et un feuillu *Betula pendula*. Ces derniers ont confirmé la bonne corrélation entre le module d’Young longitudinal et l’in-

fradensité. Conformément aux observations de Reiterer et al. (1998); Färber et al. (2001); Gurau et al. (2008), les modules d'Young des branches mesurées sont plus faibles que ceux des troncs. Plutôt que de proposer une mesure unique de la rigidité, Dahle and Grabosky (2010) proposent une mesure des variations longitudinales des modules d'Young longitudinaux dans des branches de *Acer platanoides*. La rigidité chute alors de manière continue entre le côté de l'insertion et la partie distale de la branche, avec une chute de plus de 70% entre les deux extrémités.

L'anatomie du bois de tension chez les branches, a fait l'objet de questionnements et expressions d'intérêt. Contrairement aux troncs inclinés, la formation de la couche G dans le bois de tension chez les branches est discontinue [Fisher and Stevenson (1981); Tsai et al. (2012); Hung et al. (2017)]. Si ces fibres semblent jouer un rôle dans la tension des tissus situés sur la face supérieure, elles sont aussi présentes dans les tissus situés sur la face inférieure, sans que ces derniers ne présentent de tensions particulièrement élevées. Enfin, Wang et al. (2009, 2010) ne trouvent pas de déterminants anatomiques du bois de réaction. Les auteurs se sont alors penchés sur la structure moléculaire de la lignine, et soulèvent l'hypothèse que cette structure peut jouer un rôle dans les propriétés mécanique des branches.

Enfin, des travaux spécifiques sur les propriétés anatomiques et mécaniques des tissus à la jonction branche/tronc sont mentionnés [Shigo (1985); Müller et al. (2006); Müller et al. (2015); Müller et al. (2018)], mais ne seront pas développés dans ce travail.

1.4.2 Contraintes de maturation et excentricité dans les branches, moteurs des réactions tropiques ?

Contraintes de maturation

Les déformations de maturation mesurées dans les branches présentent des distributions très variables, suggérant des configurations particulières (lumière, concurrence, etc) que l'on ne retrouve pas forcément chez les troncs inclinés [Tsai et al. (2012); Huang et al. (2005); Hung et al. (2017)].

Les mesures observées ne font d'ailleurs pas de preuve de généralités : sur les branches de *Koelreuteria henryi* Dummer (angiosperme), Hung et al. (2017) ont montré que les contraintes dans des branches orthotropes (branches dont l'angle avec la verticale est inférieur à 45° pour les auteurs) étaient similaires à celles trouvées dans des troncs inclinés (cellules en forte tension sur le côté supérieur, cellules en tension moyenne sur le côté inférieur), et que celles des plagiotropes (branches dont l'angle avec la verticale est supérieur à 60°) ont des profils beaucoup plus variés, marqués par la présence de cellules en relâchement (caractéristiques d'un bois de compression), parfois des deux côtés ! Inversement, sur *Chamaecyparis formosensis* (gymnosperme), Huang et al. (2005) ont mis en évidence que les branches plagiotropes présentaient des distributions de déformations cohérentes avec celles des tiges inclinées (bois de compression sur la partie inférieure, bois opposé en tension moyenne), alors que sur les branches orthotropes, les auteurs observent des zones de bois de

compression sur toute la périphérie de la branche (notamment autour de l'insertion), dont l'intérêt biomécanique reste encore aujourd'hui inexpliqué. Par ailleurs, tout comme Hung et al. (2017), Tsai et al. (2012) ont mesuré des contraintes en compression sur la partie inférieure de branches d'angiospermes.

Pour Fisher and Stevenson (1981), la variabilité observée n'est pas seulement une réponse à des stimuli extérieurs, mais est aussi l'expression d'un développement architectural particulier indépendant de ces stimuli. Par exemple, certains modèles architecturaux présentent des axes dont la courbure change naturellement avec la croissance. Ceci se fait entre autres grâce à la formation de bois de réaction, ce qui peut expliquer des répartitions bien particulières. Ainsi, dans le modèle architectural d'Aubrèville [Hallé et al. (1978)], certaines branches ont tendance à fléchir activement vers le bas dès le début de la croissance primaire, puis à se redresser de nouveau [Fisher (1978)]. Les bois de réaction chez les branches ne seraient donc pas directement corrélés à la perturbation gravitropique, comme c'est très souvent le cas chez les troncs. Ceci peut expliquer que l'on trouve parfois des schémas de bois de tension assez particuliers dans les branches ; même si ce n'est sûrement pas la seule raison de la grande diversité des profils rencontrés (qui peut être aussi intra-essence, en témoigne Wang et al. (2009)). Des travaux complémentaires sont nécessaires pour comprendre les relations entre tropismes et moteurs de courbure chez les branches.

Excentricité

Le rôle de l'excentricité est quant à lui aussi loin de faire consensus. Tsai et al. (2012) et Hung et al. (2017) trouvent tous les deux une croissance hypotrophique (production de bois vers le bas, caractéristique des bois de résineux) pour des branches de feuillus ; ce qui est contraire aux observations dans des troncs en redressement [Alméras et al. (2005)]. Ces observations posent d'ailleurs la question de la corrélation qu'il y aurait entre le bois de tension et la présence d'excentricité chez les branches (généralement, chez les troncs des angiospermes, la croissance est épitrophique).

En revanche, un schéma récurrent est celui de la diminution de l'excentricité avec l'augmentation de la distance à l'insertion [Wang et al. (2009, 2010); Hung et al. (2017)]. Enfin, toutes les mesures d'excentricités sont des mesures moyennes (faites à un instant t et intégrant les variations de l'excentricité depuis le début de la vie des branches). À ce jour, sa trajectoire temporelle n'a pas été mesurée et finalement, malgré son importance biomécanique, peu de travaux ont étudié ce paramètre.

1.4.3 La casse des branches : études, questionnements et limites

Dans nos travaux, nous nous sommes concentrés sur les ruptures liées au poids propre (flexion dans l'axe), en l'absence de vent. Si le phénomène de thigmomorphogenèse n'a pas été analysé sur les branches, leur rôle et tenue lors d'évènements climatiques forts (tempête et ouragan) a été étudié [Bruederle and Stearns (1985); Hauer et al. (1993); Duryea et al. (2007)]. Dans

ces travaux, la branche n'est pas considérée comme un objet d'étude à part entière, mais plutôt comme une partie constitutive d'un tout : c'est son rôle dans la tenue générale de l'arbre qui est visé. Les ruptures de branches en réponse à des sollicitations transverses (le vent par exemple) ne seront pas développés dans ce mémoire.

Essais statiques en flexion *in situ*

Concernant les casses « statiques », les études sont un peu plus fournies [Lilly and Sydnor (1995); Gilman (2003); Smiley (2003); Dahle et al. (2006); Detter et al. (2009)], et se positionnent généralement autour d'essais mécaniques en flexion *in situ* de branches d'arbre sur pied. Un exemple de dispositif de flexion est proposé dans la figure 1.13.

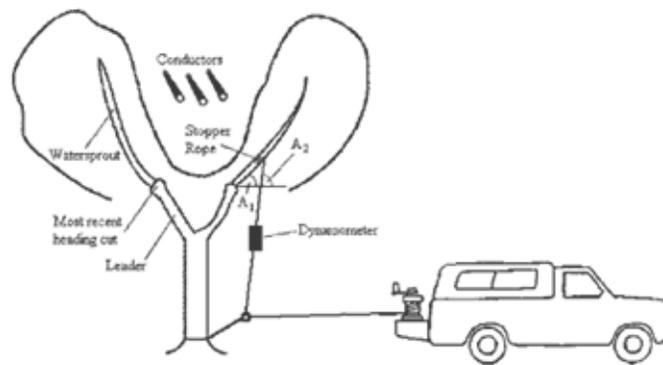


FIGURE 1.13 – Schéma d'un essai de flexion statique tel que proposé par Dahle et al. (2006)

Cet essai consiste en la mise en flexion progressive de branches, par chargement vertical ; éventuellement jusqu'à rupture. Grâce à ces essais, Gilman (2003) a mis en évidence que la contrainte de rupture en flexion de branche diminue en fonction du ratio (diamètre de la branche à l'insertion)/(diamètre du tronc) ; un petit ratio étant synonyme d'une meilleure résistance à la rupture. Pour les petits ratio (<0.7), la rupture a lieu préférentiellement sur la branche (contrairement aux ratios importants pour lesquels la rupture a lieu quasi-systématiquement dans la zone d'insertion de la branche sur le tronc). Les travaux de Detter et al. (2009) suggèrent que les ruptures surviennent majoritairement dans des zones de concentration de contrainte (nœuds, blessures), mais des mesures complémentaires seraient à réaliser pour confirmer ces propos. Néanmoins, ce type d'essais reste très complexe et rend l'analyse délicate. Detter et al. (2009) en cite notamment trois inconvénients :

1. Le positionnement de la rupture, qui survient parfois dans la zone d'insertion de la branche.
2. Le positionnement de la charge, qui n'est appliquée qu'en un seul point, n'est pas très réaliste par rapport aux contraintes subies par la branche (poids supplémentaire comme la neige, le vent, ou le développement du houppier).

3. La grande capacité de flexion des branches, qui rend l'orientation de la sollicitation variable et ne sollicite pas les mêmes caractéristiques du bois à chaque essai.

Pour pallier au deuxième inconvénient, Miesbauer et al. (2014) ont développé un banc de mise en flexion de branches, dont l'objectif est de mettre en charge la branche le plus uniformément possible (comme le ferait une charge statique comme la neige par exemple). Différents points de charge sont utilisés et contrôlés par un système de poulies au sol. Une illustration de ce dispositif novateur est en figure 1.14. L'essai est testé sur des branches réorientées verticalement et horizontalement. Les résultats ont montré que les branches réorientées horizontalement sont approximativement deux fois plus résistantes que les branches réorientées verticalement. Très souvent, l'objectif appliqué des études est de mieux conseiller et orienter les méthodes d'élagage des arbres, dans le but de minimiser les chutes de branches. Ainsi Gilman (2003) conseillent de ne garder que les branches dont le diamètre est petit (relativement au tronc). Dahle et al. (2006) ont montré que l'élagage en "V" (développement du houppier en forme de V, illustré sur la figure 1.13) favorisait grandement la rupture.

Detter et al. (2009), lui, conseille de ne pas garder les branches en compétition (ressources divisées par deux), qui sont de plus souvent des branches en haut de houppier.

Enfin Shigo (1985) a montré que les branches avec des angles d'insertion importants étaient plus sujettes au problème d'écorce incluse que les autres, ce qui génère une singularité qui favorise la rupture [Smiley (2003)]. Miesbauer et al. (2014) suggèrent que les branches horizontales sont mieux dimensionnées pour subir des charges statiques (neige, glace), que les branches verticales. Il y a encore beaucoup d'inconnues sur l'influence de l'élagage sur la tenue mécanique des branches. Luley et al. (2002) ont recensé les occurrences de casses de branche dans la ville de Rochester pendant plusieurs années, dans des secteurs élagués et non élagués. Les résultats ont montré que l'élagage ne diminuait en aucun cas le nombre de branches tombées.

Cependant, il convient d'être prudent vis-à-vis de ces conclusions, qui ne prennent en aucun cas en considération les champs de précontraintes dans les branches.



FIGURE 1.14 – Dispositif de mise en flexion de branches de Miesbauer et al. (2014). A l'aide d'un système de poulies au sol et de différents points d'ancrage, le système permet d'appliquer une charge en flexion de manière « continue » et homogène sur la branche.

Caractérisation des modes de rupture de branches en flexion

Ennos and van Casteren (2010) proposent une réflexion sur les différents modes de ruptures possibles chez les branches. S'appuyant sur la théorie de la résistance des matériaux, les auteurs théorisent de manière simple comment des ruptures peuvent survenir en fonction des caractéristiques géométriques et anatomiques des branches. En effet, si lors d'essais de flexion, la contrainte longitudinale est dominante devant les effets transverses, l'anisotropie du bois amène à reconsidérer l'influence des effets transverses. L'auteur énumère alors trois types de ruptures possibles, illustrés dans la figure 1.15.

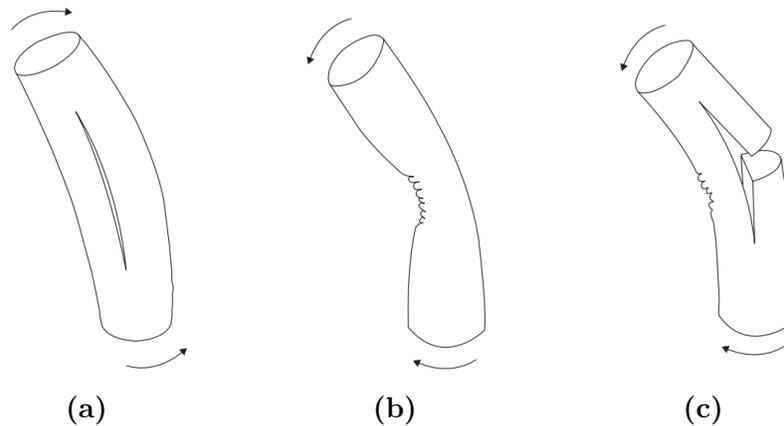


FIGURE 1.15 – Illustrations des trois modes de ruptures des branches décrits par Ennos and van Casteren (2010) : a) fissuration en traction transverse en coeur de branche, b) flambement en compression transverse, c) rupture en traction transverse.

1. Cas d'une branche initialement incurvée dans le sens inverse de la flexion : dans cette configuration (typiquement une branche incurvée vers le haut, et que le poids tend à fléchir vers le bas), la branche devrait casser sur la ligne neutre, là où la traction transverse est maximum, puis se prolonger axialement (figure 1.15a)
2. Cas d'une branche initialement droite : le mode de rupture dépendrait de la densité du bois. Les bois peu denses (faible résistance transverse) seraient amenés au flambement en compression transverse sur la partie concave (figure 1.15b). Au contraire, les bois denses (grande résistance transverse) devraient fissurer plus facilement en traction transverse sur la partie convexe. La propagation de la contrainte transverse se ferait alors jusqu'à ce que la sollicitation en traction longitudinale provoquée par la propagation de la fissure devienne supérieure à la résistance du bois en traction longitudinale. À cet instant, on aurait un changement de la direction de propagation, avec une fissure qui deviendrait longitudinale.

Quelques années plus tard, van Casteren et al. (2012) ont éprouvé cette théorie sur des petites branches de feuillus à savoir frêne *Fraxinus excelsior*, noisetier *Corylus avellana* et saule *Salix alba*. Les résultats font émerger deux des ruptures prédites (figures 1.16b, 1.16c),

et un troisième type, plus complexe, qui se rapproche du délaminage de la section (figure 1.16a) Les résultats semblent confirmer le rôle non-négligeable de la densité : plus de 90%

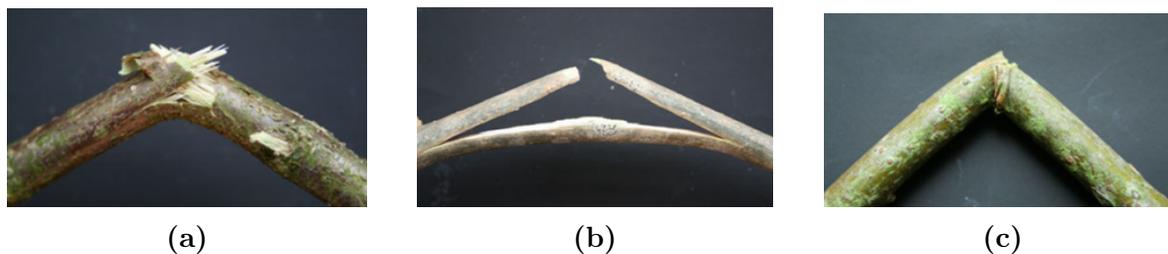


FIGURE 1.16 – Les trois modes de ruptures observés sur des petites branches [van Casteren et al. (2012)] : a) délaminage de la section après une initiation en traction transverse, b) propagation de la rupture en traction transverse et changement de direction (traction longitudinale), c) flambement de la partie inférieure (compression transverse).

des modes de rupture du saule, qui est l'espèce la moins dense, se font en flambement (compression transverse de la partie inférieure, figure 1.16c). Pour les deux autres espèces, plus denses, les modes de rupture sont systématiquement initiés par de la traction transverse. La propagation de la fissure est alors plus difficile à prédire. Cependant, le frêne présente une plus grande proportion de casses « nettes » (figure 1.16b) que le noisetier, ce qui pourrait être expliqué par le rapport (résistance en traction longitudinale)/(résistance en traction transverse), qui est chez le noisetier presque deux fois plus faible.

Ces résultats ont été obtenus sur des branches relativement jeunes (fléchies à la main), la question de leur extrapolation sur des plus gros organes se pose donc. Également, à l'image des travaux précédents, aucune considération des contraintes de croissance n'est suggérée dans la démarche des auteurs. Cela rend l'étude limitée, mais reste intéressant pour comprendre les différents phénomènes impliqués dans les ruptures de branches.

Récemment, Yang et al. (2019) ont proposé un modèle avancé de prédiction de modes de rupture des branches, testé sur des branches de plus grande taille. Ce dernier prend en compte la forte anisotropie du bois, certaines caractéristiques anatomiques (différentiation aubier, moelle, duramen, etc) et est couplé à une interface graphique réaliste. Cependant, les auteurs font encore une fois l'impasse sur les champs de précontrainte.

1.5 Conclusion

La structure anatomique et cellulaire du bois lui confère une forte anisotropie, que l'on retrouve à différentes échelles. Les propriétés du bois découlent de certains déterminants anatomiques, comme la densité ou l'AMF, mais aussi de singularités importantes telles que les nœuds que nous n'évoquerons cependant que très peu dans ce mémoire. Le mode de croissance des axes induit la mise en place de contraintes, qui évoluent au fur et à mesure de la vie de l'arbre. Ces contraintes de croissance sont l'expression de la trajectoire mécanique

de l'axe : sa courbure et son chargement mécanique. Ce sont elles qui assurent la stabilité mécanique des arbres sur le long terme. Elles permettent notamment, par le biais des bois de réaction, le contrôle de la courbure et donc de l'orientation de l'axe. Si la répartition de ces contraintes et leurs conséquences ont été bien étudiées sur les troncs, peu de travaux ont finalement été menés sur les branches, qui montrent comme principale différence d'être généralement bien plus inclinées et élancées que les troncs. La question de leur dimensionnement mécanique est encore aujourd'hui mal connue, malgré quelques travaux sur leur comportement mécanique élastique et leur mode de rupture. L'objectif de nos travaux est de développer la connaissance sur ce dimensionnement mécanique, et de la discuter dans le cadre de la problématique des casses inexplicables de branches, souvent rapportées et redoutées en milieu urbain.

Chapitre 2

Enquête : la casse des branches dans la société

Sommaire

2.1	Introduction	68
2.2	Analyse de presse	68
2.2.1	Matériel et méthodes	68
2.2.2	Résultats et discussion	70
2.2.3	Conclusion	74
2.3	Sciences collaboratives	75
2.3.1	Matériel et méthodes	75
2.3.2	Résultats et discussion	78
2.3.3	Création d'un groupe de recensement des casses inexplicées	91
2.4	Conclusion	93

2.1 Introduction

Le phénomène de « casses inexplicées » est un enjeu important pour la sécurité de l'arbre en ville et porte une forte dimension socio-professionnelle : les gestionnaires de parcs et les experts de l'arbre urbain y sont régulièrement confrontés. Cependant, leur savoir empirique sur les marqueurs de ces ruptures, bien qu'important par les pistes de recherche qu'il peut fournir, ne circule qu'un sein de leur communauté (en particulier au travers de réseaux, cf section 2.3.2). Nous avons donc entrepris une collecte de ce savoir, afin de (i) développer des pistes de recherche, et (ii) confirmer ou non les hypothèses scientifiques, basées sur un nombre très restreint d'observations. Comme décrit précédemment, ce chapitre prend la forme d'une « bibliographie de terrain », en faisant appel aux sciences collaboratives. L'enjeu est ici double : il consiste dans un premier temps à établir un lien avec la communauté professionnelle, utile pour toute collaboration future, et dans un deuxième temps à recueillir leur savoir empirique. Cette collecte de connaissances, ou plutôt d'expériences, (et son application au problème scientifique des « casses inexplicées ») sera réalisée à l'aide d'une enquête, co-construite avec une partie de cette communauté, et largement diffusée.

En parallèle de ce travail, nous avons voulu estimer l'impact de ce sujet dans la société civile. Pour cela, une analyse de presse a été mise en place durant toute la période du projet. L'objectif est ici d'estimer le volume que représentent les chutes de branches en France (dans le paysage médiatique), ainsi que la part de casses inexplicées et leurs conséquences. Ce travail permet aussi de récolter quelques informations sur les circonstances des événements et les branches concernées. Cela permet, sous réserve des nombreux biais que présente ce type d'étude, de discriminer certains déterminants apparents de ces casses. Les résultats de cette analyse seront mis en regard avec les résultats de l'enquête sociale. L'ensemble de la démarche a été accompagné par l'anthropologue Pascale Moity-Maïzi,¹ spécialiste des études collaboratives sur des sujets scientifiques à portée socio-professionnelle.

2.2 Analyse de presse

2.2.1 Matériel et méthodes

Pour construire l'analyse de presse, un recensement de l'ensemble des cas de chutes de branches dans la presse depuis le mois de février 2020 a été mis en place. Ce dénombrement s'est fait au moyen d'une alerte Google sur les articles de presse contenant les mots-clés « chute », « branche », « casse », « estivale », « arbre ». Les journaux étudiés sont de fait restreints à ceux dont les articles sont publiés sur internet. Chaque article a alors été trié et répertorié selon les catégories suivantes :

- Date de l'évènement : ceci permet une discrétisation temporelle du nombre d'articles (à l'échelle du mois), et donc in fine d'identifier certaines éventuelles corrélations entre

1. Professeure en Socio-Anthropologie, HDR. UMR SENS, Institut Agro, Montpellier

la cause des chutes et la période de l'année.

- Identité de l'évènement : un évènement remarquable peut donner lieu à plusieurs articles. Généralement, l'importance d'un évènement (tempête, rupture inexplicée, accident de bûcheronnage, etc) est assez bien corrélée au nombre d'articles publiés sur le sujet. En recoupant l'identité de l'évènement avec le nombre d'articles correspondant, il est donc possible d'estimer le côté marquant de celui-ci. Pour la suite de l'étude, le nombre d'évènements sera noté N_e et le nombre d'articles N_a .
- Lieu de l'évènement : département et région. Ces champs permettent de regarder si la répartition spatiale des chutes de branches peut être caractéristique de certains climats ou géographies, et ce suivant le type de la casse.
- Sujets : ce champ permet d'identifier l'objet de la rupture. Il peut s'agir d'une branche, d'un arbre, ou encore d'un groupe d'arbres ou de branches (fréquent par exemple lors de tempêtes). Il s'agit d'un filtre qui est utilisé pour distinguer les chutes de branches seules des chutes d'arbres qui entraînent des chutes de branches par exemple.
- Essence : cette catégorie permet d'identifier si un type de casse touche plus certaines essences que d'autres.
- Cause de l'évènement : ce champ est important, car il permet de distinguer les différents phénomènes pouvant être à l'origine de chutes de branches. Notre analyse a permis d'identifier quatre situations :
 1. *Le vent* : facilement identifiable, c'est l'une des causes principales des chutes de branches. Souvent associé à des phénomènes orageux (pluie, grêle).
 2. *L'homme* : cette catégorie représente l'ensemble des accidents liés à des chutes de branches provoquées par l'homme. Il s'agit pour la plupart d'accidents de bûcheronnage, amateur ou professionnel.
 3. *Les casses inexplicées* : cette catégorie est la plus subjective. Pour essayer de réduire les biais d'interprétation, nous avons considéré comme « casses inexplicées » des casses soudaines, sans vent, imprévisibles, touchant des arbres a priori sains, dont la rupture n'apparaît pas à l'insertion de la branche (dans ce cas, il s'agit très souvent d'une casse résultant d'une fragilité mécanique qui peut être causée par un phénomène d'écorce incluse ou la présence d'un pathogène lignivore). Volontairement, aucun critère concernant la température extérieure, la saison ou un état de sécheresse n'a été pris en compte dans cette catégorie.
 4. *Autres* : dans cette catégorie se trouvent toutes les causes qui sont jugées mineures. On distinguera notamment les cas où sont évoquées des raisons sanitaires (champignons, vieillissement, déracinement), climatiques (neige, givre) ou des cas pour lesquels la raison n'a pas été évoquée, mais pour laquelle la casse ne respectait pas les critères évoqués juste au-dessus. Le choix de rassembler ces différentes causes se justifie par le fait que ce sont des casses qui représentent un volume de réponse assez faible, rendant la restitution visuelle plus complexe et ne donnant pas lieu à des discussions (trop peu de données pour affirmer des tendances).

- Conséquences : cette catégorie donne un indicateur de la gravité de l'impact humain de l'évènement. Lorsque la rupture a donné lieu à des dégâts humains (décès ou hospitalisations), la conséquence a été classée « humaine ». Lorsque que les conséquences sont seulement matérielles (coupure du courant, interruption du trafic, fermeture de parc, report d'évènement), les conséquences sont dites « matérielles ». Dans cette analyse, nous considérons que la discrimination dégât matériel/dégât humain suffit à caractériser la gravité de l'évènement.
- Autres : des précisions concernant les causes ou conséquences, analysables pour une éventuelle description plus fine de ces deux catégories.

2.2.2 Résultats et discussion

Considérations générales

L'analyse de presse s'étend du mois de février 2020 au mois de décembre 2022. Sur cette période, $N_a = 240$ articles ont été recensés, pour un total de $N_e = 147$ évènements différents. L'évolution de ces deux variables est donnée dans la figure 2.1. Chaque année, la part de chaque type de cause (en termes d'évènements) y figure également.

Quelques points importants se dégagent déjà de cette première représentation :

- **Le nombre d'évènements N_e par année est important et relativement stable** (courbe verte sur la figure 2.1, entre 48 et 54 évènements), contrairement au nombre d'articles parus N_a (courbe marron sur la figure 2.1, qui double presque entre 2020 et 2022). Cela met en évidence que l'année 2022 à un rapport article/évènement beaucoup plus élevé. Il convient néanmoins d'être prudent, car ce changement de ratio est généralement dû à un ou deux évènements importants dans l'année. Par exemple, le 4 septembre 2022, lorsqu'une grosse branche de peuplier² tombe subitement dans un parc lors d'un rassemblement, 2 blessés sont à déplorer. Le

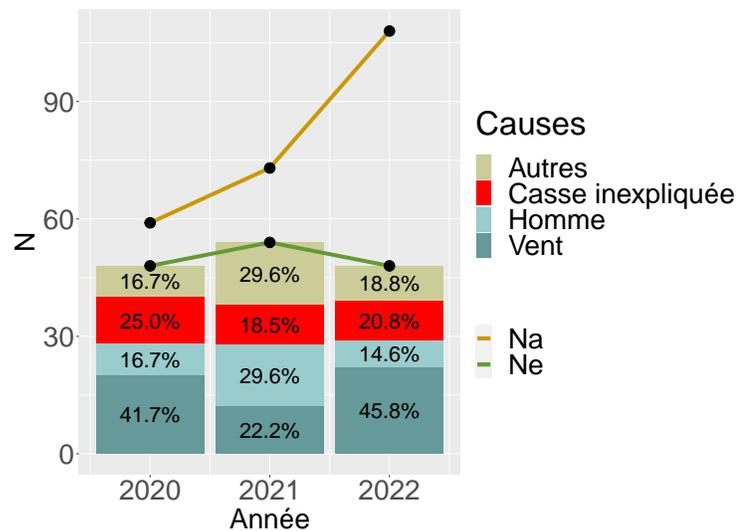


FIGURE 2.1 – Analyse de presse. Représentation de l'évolution du nombre d'article N_a et d'évènements N_e sur la période étudiée. Pour N_e , représentation de la part de chaque type de cause.

2. <https://www.rtbef.be/article/liege-une-branche-d-arbre-tombe-sur-un-stand-2-blessees-11059968>

fait que l'évènement soit arrivé en public a généré une résonance médiatique forte à cette rupture unique, avec 13 articles reportés !

- Même si la répartition des causes varie un peu suivant les années, **la part de chute de branches catégorisée comme « casse inexplicquée » reste stable chaque année**, occupant entre 18,5% et 25% des chutes totales. C'est une part importante qui n'est pas intuitive mais qui est à nuancer : le biais médiatique ne fait ressortir que les évènements non anticipés, et venant perturber une situation de la vie civile : coupure de circulation, d'alimentation électrique, fermeture de lieux publics, dégât humain/matériel, etc. Il peut s'agir de chutes de grosse branche comme de petites, mais dans des endroits souvent très fréquentés pour justifier la rédaction d'un article. Les casses inexplicquées sont ici sûrement sur-représentées, car ce sont celles qui sont par nature le moins prévisibles.

Une tentative de caractérisation de la dangerosité d'une chute de branche en fonction de sa catégorie est proposée dans la figure 2.2. Comme précisé ci-dessus, le caractère dangereux est associé au dégât humain. À première vue, du fait du caractère soudain et imprévisible de la casse estivale, on pourrait penser que la part de dégâts humains (conséquences dites majeures) est assez forte pour ce groupe ; au contraire du vent par exemple, facilement appréhendable par le citoyen puisqu'il est dans la conscience sociale de ne pas s'attarder sous un arbre en pleine tempête.

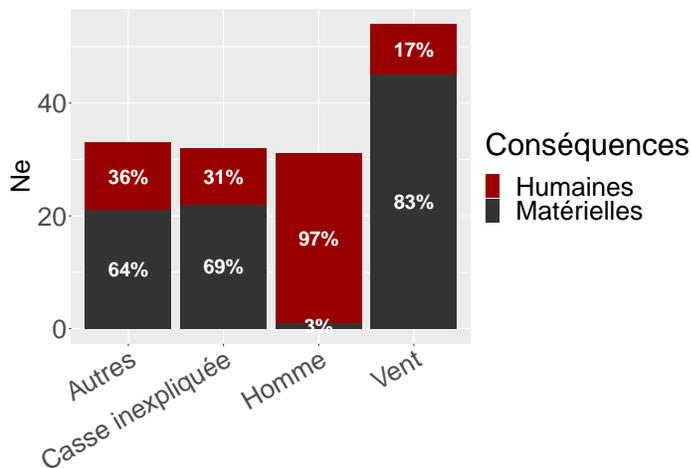


FIGURE 2.2 – Analyse de presse. Type de conséquence de chaque rupture, en fonction de son origine.

Les données auraient plutôt tendance à nuancer la gravité des casses inexplicquées (relativement aux autres familles) : là où près d'un tiers de ces casses reportées provoquent des dégâts humains (conséquences majeures), c'est 97% des casses de la catégorie « Homme » (constitué majoritairement d'accidents) qui ont des conséquences humaines. Sur le bilan total, cette catégorie représente la moitié des victimes totales. La casse inexplicquée représente quant à elle un volume de 16%, derrière la catégorie « Autres » (20 %) ; ce qui reste un niveau très élevé ; d'autant plus anxiogène pour le public et les

gestionnaires par son caractère non-anticipable.

La proportion d'articles par évènement en fonction de la cause a également été analysée, et il n'y a pas de tendances particulières. Dans la majorité des cas (casse inexplicquée comprise),

il y a un seul article par évènement. Pour la catégorie « vent », il arrive que plusieurs articles (4-6) soient publiés si l'évènement climatique est important. Pour la casse estivale, le vent et la catégorie 'Autres', il y a une minorité d'évènements qui ont une portée médiatique un peu plus importante (2-4 articles), même s'il ne semble pas y avoir de différence notable entre les groupes. Quelques exceptions existent, à l'image de la casse soudaine du 4 septembre 2022², mentionnée ci-dessus.

À titre d'illustration, deux photos de casses inexplicées survenues dans des lieux fréquentés sont proposées dans la figure 2.3. La première (figure 2.3.a) est tombée sur un stand pendant un évènement public, dans un parc urbain. Sa chute a entraîné l'hospitalisation de deux personnes². La deuxième (figure 2.3.b) n'a pas eu de conséquence humaine.



(a) Peuplier, septembre 2022. Parc la Boverie pendant un évènement public. Liège, Belgique.



(b) Platane, juillet 2018. Marché de la croix rouge, Lyon, France

FIGURE 2.3 – *Analyse de presse. Deux exemple de casses soudaines et inexplicées, survenues lors d'évènements publics.*

Distribution annuelle des casses de branches

L'étude de la distribution temporelle de chaque famille de casse est illustrée par la figure 2.4. Chaque année, les casses inexplicées recensées se situent dans la période mai-octobre, avec une majorité de cas entre juillet et septembre. Cette répartition marquée suggère qu'il y a un effet du climat (chaleur et sécheresse) sur ce type de casse. Cet effet peut être direct, et/ou indirect, en modifiant par exemple l'état physiologique de l'arbre. Or, il est rappelé que lors de la caractérisation du type de casse, la température et la sécheresse n'ont pas été prises comme déterminants. Il n'y a donc pas de biais d'interprétation sur un potentiel effet des facteurs chaleur/sécheresse. Dans les autres familles, le vent et 'Autres' n'ont pas de schéma temporel précis. En revanche, il y a une grande majorité d'accidents d'origine humaine en

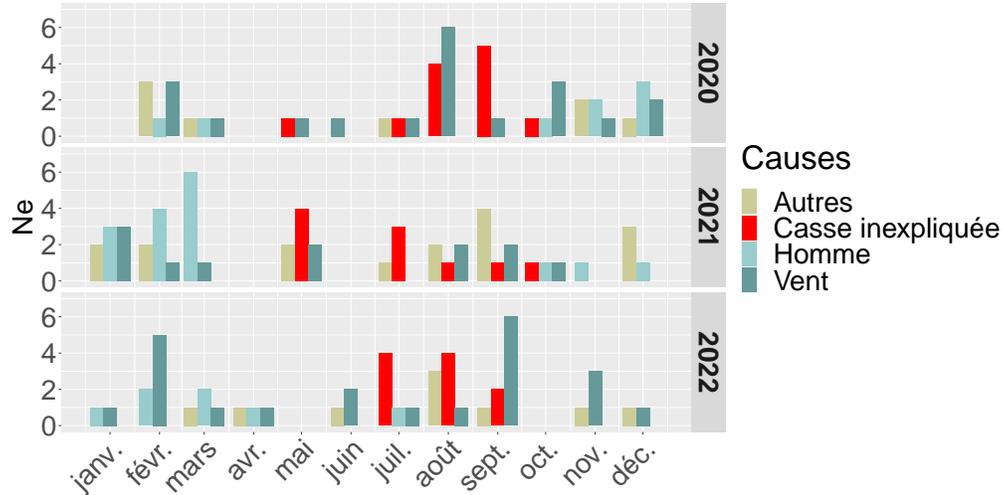


FIGURE 2.4 – Analyse de presse. Distribution annuelle de chaque type de casse.

hiver. Ceci concorde avec la période de travail de bûcheronnage en ville (les programmes de tailles sont souvent répartis sur les mois d’automne et d’hiver). Les particuliers ont aussi plus tendance à élaguer l’hiver.

Distribution spatiale des casses de branches

La distribution spatiale des casses inexplicquées et des casses provoquées par le vent est illustrée dans la figure 2.5. Les autres groupes n’ont volontairement pas été représentés, car il ne semblait pas pertinent d’avoir ce type de données : il n’y a a priori pas de raison évidente que les accidents aient plus lieu dans une région que dans une autre. De même, la catégorie « Autres » recouvre un trop grand nombre de causes pour qu’une analyse puisse être effectuée). Concernant le facteur « vent », la répartition semble relativement uniforme, avec un pic en Bretagne, région connue pour ses forts vents (deuxième région³ la plus ventée de France sur la période étudiée). En revanche, l’essentiel des casses inexplicquées semble être réparti sur la moitié nord du territoire. Les régions Pays de la Loire, Normandie, Île de France et Grand Est cumulent à elles seules plus de 60% des cas de chutes inexplicquées. Il faut être prudent quant à l’interprétation de ces données, plus sujette à des biais que celle de la distribution temporelle. Même si plusieurs explications sont plausibles (différence de volume des espaces arborés, effets de microclimats particuliers, etc.), il n’y a pas de corrélation évidente entre un type de déterminant géographique (relief, densité d’habitant, climat) et la distribution de ces casses. On considèrera donc que la casse estivale ne présente pas de distribution privilégiée en réponse à un type de climat.

3. <https://www.nouvelobs.com/transition-ecologique/20200921.OBS33638/dans-quelles-regions-a-t-on-le-plus-de-vent.html>

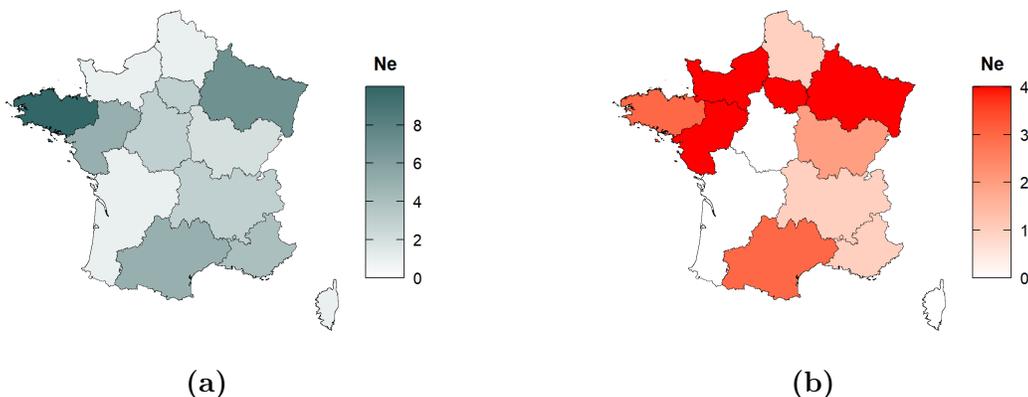


FIGURE 2.5 – *Analyse de presse. a) Répartition spatiale des casses provoquées par le vent. b) Répartition spatiale des casses inexplicées.*

Type d'arbre touché

Les articles concernant les casses inexplicées concernent généralement les arbres en ville. La distribution des essences touchées est proposée dans la figure 2.6. Dans la majorité des articles (41% des cas), les essences ne sont pas précisées et difficilement identifiables sur les photos. La part restante des essences touchées recouvre un spectre assez large d'architectures et de types d'arbre. Le marronnier semble se distinguer (6 occurrences de chutes) mais pour les autres essences, trop peu de données sont recensées (entre 1 et 3 cas par essences) pour tirer des conclusions.

Sur les 9 essences recensées, seulement une (le cèdre) est un résineux. Il y a un biais assez important lié à la sélection des essences pour les arbres d'alignement et les parcs urbains. Malheureusement, nous ne disposons pas de ce type de données, qu'il serait très intéressant de comparer avec la distribution des essences concernées par la casse.

2.2.3 Conclusion

L'analyse de presse permet de mettre en évidence les déterminants suivant :

- Les cas de casses inexplicées représentent un peu moins de 20% des reports de chutes de branche dans la presse, ce qui correspond à une trentaine de report sur 3 ans. La fréquence de ces reports par année est stable.
- Contrairement à leur réputation, les casses inexplicées ne donnent pas beaucoup plus lieu à des dégâts humains que les autres familles de casse (vent, autres) et sont même loin derrière les chutes de branches associée à une activité humaine (pour la très grande majorité accidentelles).

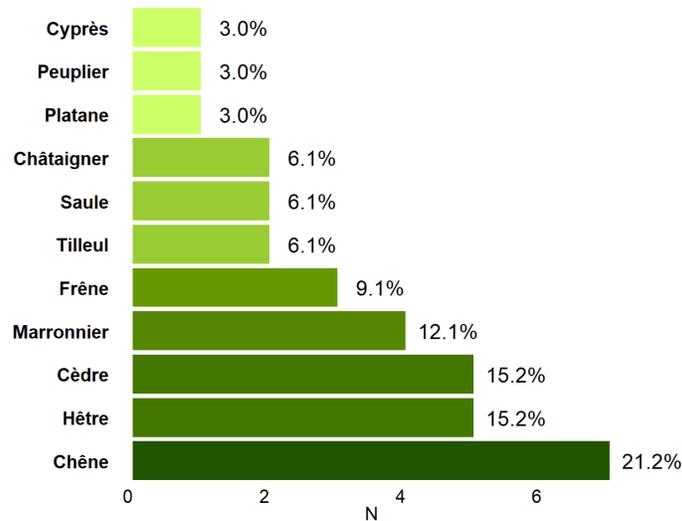


FIGURE 2.6 – *Analyse de presse. Distribution des essences touchées par les casses inexpliquées (total de 32 reports de casse).*

- La distribution temporelle des chutes de branches inexpliquées souligne l'effet « estival » et suggère donc un possible lien entre des paramètres météorologiques (température, sécheresse) ou l'état physiologique de l'arbre et ce type de casse.
- La distribution spatiale à l'échelle de l'hexagone ne semble pas corrélée à un type de climat ni à des caractéristiques géographiques.
- Le spectre d'essences touchées est assez large, avec une proportion un peu plus importante de marronnier. Il semble que les angiospermes soient plus touchés. Mais le biais de la gamme des essences dans les espaces urbains rend délicat toute interprétation hâtive.

Il est maintenant intéressant d'observer l'avis des professionnels sur la question des casses inexpliquées afin de comparer leur expérience avec les tendances données par l'analyse de la presse.

2.3 Sciences collaboratives

2.3.1 Matériel et méthodes

Processus de création de l'enquête

La récolte des informations a été réalisée sous forme d'une enquête basée sur un questionnaire donné en annexe A. Il a été co-construit au terme d'une discussion avec une assemblée

d'une quinzaine de professionnels (gestionnaires et experts de l'arbre urbain) lors d'une formation sur la biomécanique de l'arbre, proposée par le cabinet Dellus⁴. Une préformation en visioconférence avait été donnée le 23 novembre 2020 (le covid nous ayant contraint à repousser la formation en octobre 2021). Durant cette première formation, une intervention scientifique a été faite sur la casse inexpliquée des branches, suivie d'un échange, ébauchant ainsi les grands axes du questionnaire. Un aperçu de la provenance ainsi que de la profession des interlocuteurs est donné dans la figure 2.7. Le public cible était constitué de professionnels, majoritairement des cabinets « d'expert conseil arbre urbain » (6), une profession non-sujette à une certification ou à une préparation diplômante. On trouve aussi le nom « expert conseil », qui correspond à la même classe. Également étaient présents 3 experts forestiers. Contrairement au titre précédent, ce titre témoigne non seulement d'un niveau d'étude dans le domaine (plusieurs voies possibles, mais un niveau bac+5 est requis), mais aussi d'un diplôme délivré par les pairs. Ce titre témoigne de l'aptitude du professionnel à pouvoir gérer une forêt. Il y avait aussi un grimpeur (titre qui exige une formation diplômante de 1 an). Enfin, cinq « techniciens territoriaux » viennent compléter l'auditorat. Ce sont des professionnels employés par des municipalités sur un concours public. Le niveau requis est de niveau IV, c'est-à-dire bac ou équivalent (voir plus de détail dans la section suivante, où la complexité associée aux titres et professions sera abordée en détail). La provenance du public

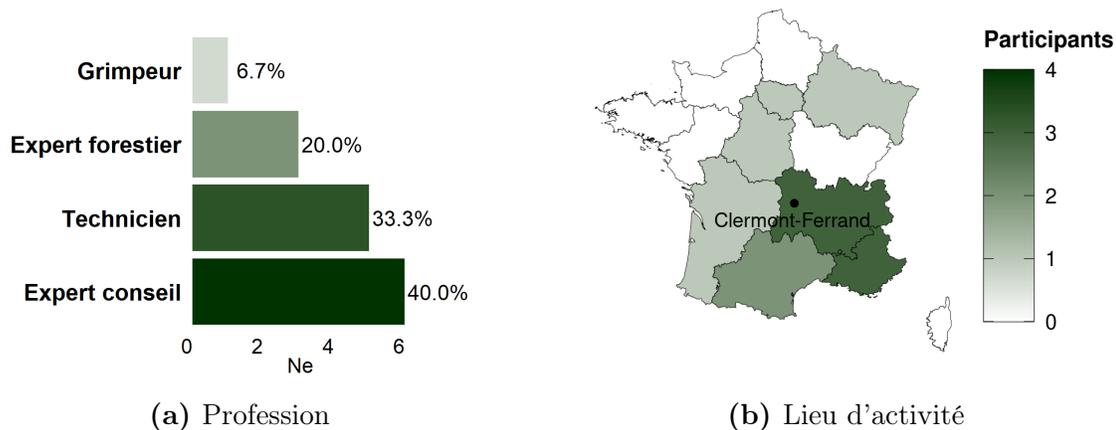


FIGURE 2.7 – Formation biomécanique, novembre 2020. Caractérisation de l'origine des participants.

cible était donc assez diverse, et représente un bon indicateur de la structuration de la profession. De plus, bon nombre d'entre eux font partie de réseaux, qui sont des voies privilégiées d'échange et de transfert de compétence au sein de cette communauté. Notamment, 5 d'entre eux sont membres du GECAO (⁵ (Groupement des Experts Conseils en Arboriculture Ornementale)). Concernant la localisation, la population reste concentrée autour de Clermont-Ferrand

4. Cabinet Dellus : <https://www.expertisearbre.fr/>

5. <https://www.gecao.fr>

(figure 2.7b), lieu de la formation. Ainsi, malheureusement l'échantillon ne couvrait pas la partie nord-ouest du territoire, (Bretagne, Normandie, Hauts-de-France Pays de la Loire) mais on peut considérer que leur expérience était assez représentative de ce qui s'observe dans l'hexagone pour pouvoir construire le questionnaire.

À la suite de cette interaction, riche de pistes évoquées et avec l'aide de l'anthropologue P. Moity-Maizi, une première version du questionnaire a vu le jour. Pour une phase de test, cette version a été diffusée au groupe précédemment décrit le 4 décembre 2020. À la suite des remarques et conseils, le 15 décembre 2020, une version améliorée a été mise en place, sous la forme d'une enquête « google form » (annexe A.1). Il a alors été demandé au groupe de diffuser le questionnaire à l'ensemble de son réseau professionnel pouvant être confronté au phénomène des casses inexplicables. Nous avons en parallèle diffusé ce questionnaire à des réseaux et associations :

- la Société Française d'Arboriculture SFA ⁶, qui a diffusé l'enquête à son réseau par mail et lors de sa chronique mensuelle (février 2021 ⁷)
- le département de l'ONF (Office National des Forêts) Arbres Conseil® ⁸, dont le président David Chevet a assuré la transmission du questionnaire à ses agents.
- le GECAO, avec qui des contacts avaient été préétablis sur le sujet lors d'un stage en 2019 ⁹.
- Enfin, le questionnaire a été diffusé à deux groupes Facebook : « Arboristes Grimpeurs Trucs & Astuces » ¹⁰ et « Arboriste grimpeur : métier/passion » ¹¹. Ce sont des groupes gérés par des professionnels.

Ne voulant pas que le temps soit un facteur limitant, nous avons laissé le questionnaire en libre accès (sous réserve d'avoir le lien) pendant 1 an. 89 personnes ont répondu. Suite à cela, quelques remaniements de forme ont été faits, notamment la reformulation de certaines questions ouvertes. Ces dernières peuvent être complexes à analyser, mais ont une fonction heuristique, par leur caractère essentiellement exploratoire sur un thème ou un problème, utile lorsque l'on ne connaît pas d'avance la diversité des réponses possibles. Ainsi les réponses à cette version ont justifié une nouvelle formulation de certaines questions pour affiner l'information à recueillir, donnant lieu à cette seconde version du questionnaire, diffusée au réseau Plante & Cité ¹², dans sa lettre mensuelle de janvier 2022 ¹³. Le questionnaire a été clôturé le 31 mai 2022, totalisant 112 réponses. Les versions 1 et 2 du questionnaire ont ensuite été fusionnées pour l'analyse. Elles sont proposées dans les annexes A.1 et A.2.

6. <https://sfa-asso.fr>

7. La chronique de l'arbre - février 2021 : <https://urlz.fr/j4r7>

8. <https://www.actu-environnement.com/in/onf/032016/plaquette-arbre-conseil.pdf>

9. Lucie Heim. *Comportement mécanique des branches lors de températures extrêmes et conséquences sur le risque de casse*, mémoire de fin d'étude M2 AETPF, Nancy, 2019.

10. <https://www.facebook.com/groups/1445512075676115>

11. <https://www.facebook.com/groups/105845106121864>

12. <https://www.plante-et-cite.fr>

13. La lettre de Plante & Cité N°148 - Janvier 2022 : <https://urlz.fr/j4rs>

Présentation du questionnaire

Le questionnaire, dans sa version finale, est organisé en 8 sections (annexe A.2) :

1. Questions 1-3 : identité et coordonnées du participant.
2. Questions 4-7 : profession du participant et éventuelle implication dans des organismes rattachés au milieu professionnel du monde de l'arbre.
3. Questions 8-12 : renseignement sur les conditions de l'évènement « casse inexplicée » : moment de l'année, moment de la journée et conditions extérieures.
4. Questions 13-19 : renseignements sur le type de branche amenées à casser sans explication : position dans l'arbre, structure, forme, taille.
5. Question 20 : une seule question sur la rupture elle-même. C'est une question qui reste d'ordre « macroscopique ». Il n'y a volontairement pas de questions sur les profils de rupture, qui nécessiterait un niveau de connaissance en mécanique qui n'est pas forcément celui du public visé.
6. Questions 21-25 : renseignements sur le type d'arbre pouvant présenter ce type de casse : âge, architecture, essence. Éventuelle influence de la présence d'élagage.
7. Questions 26-27 : champs plus ouverts sur la capacité du répondant à identifier une potentielle branche pouvant rompre de manière soudaine et inexplicée.
8. Question 28 : commentaires/remarques/attentes du répondant par rapport au questionnaire.

2.3.2 Résultats et discussion

Avant de rentrer dans une analyse détaillée des réponses, quelques précisions sont nécessaires :

- Après élimination des doublons, des non-réponses ou des réponses incomplètes (arrêt du formulaire avant la fin), l'échantillon concerne $N = 104$ réponses. Ce nombre est suffisamment conséquent pour nous livrer une image réaliste, plausible, des perceptions de l'évènement « casse inexplicée » qu'ont les professionnels, dans leur diversité.
- Ces individus forment un échantillon représentatif d'un état des connaissances, mais non d'une population que l'on ne connaît pas dans son entier.

Profession et expérience des participants

Initialement, nous pensions majoritairement toucher des « experts » ainsi que des « gestionnaires de parcs ». Or, à l'issue de la première version du questionnaire (89 réponses,

en annexe A), nous avons obtenu plus de 40% de personnes se présentant sous la catégorie « Autres », témoignant ou d'un oubli de notre part de catégories sociales professionnelles ; ou d'une incompréhension, d'une non-identification des personnes à ces deux catégories-là. Heureusement, une question ouverte (question 5 en annexe A.1) sur la profession exercée nous a permis de comprendre un peu plus finement l'échantillon et d'identifier deux catégories supplémentaires : « arboriste » et « technicien ». Cependant, il a aussi été constaté qu'un même individu se présente rarement sous une seule catégorie de profession : on a généralement des « cas mixtes », d'individus se déclarant « expert arboriste », « expert arboricole », « technicien arboriste », ou encore , « expert en arboriculture ornementale ». Nous avons ainsi mis en évidence qu'il n'y a pas de cadre formel permettant à chacun de se représenter et de décrire la diversité des activités professionnelles autour de l'arbre. De plus, et faute de ce cadre de référence, les personnes peuvent répondre ce qu'elles ont été et ce qu'elles sont aujourd'hui. Elles peuvent aussi exprimer des appréciations ou représentations individuelles de leurs propres compétences et relations aux arbres. S'ajoute à cela l'absence d'un corps de métiers dont le titre témoignerait d'une formation diplômante. Si la nébulosité du terme « expert » paraît alors évidente, la même confusion émerge par exemple avec la catégorie « arboriste » : en France , il existe certes une formation diplômante pour le statut « d'arboriste grimpeur ¹⁴ ». Mais il est aussi possible, légitime, de se déclarer « arboriste » ou « arboriste conseil » sans cette formation ; ce qui donne également à ce statut un caractère ambigu. Enfin, on constate que les deux termes « arboriste » et « grimpeur » peuvent recouvrir une diversité d'activités plus importante qu'on le pensait : diagnostic, conseil, taille, gestion d'espace arborés, etc.

Pour essayer d'éclaircir ce que recouvrent ces termes, quelques entretiens ont été organisés avec différents participants, notamment Patrick Bujon, chef d'entreprise chez SARL AGENCE DE L'ARBRE ¹⁵ :

- Comme pressenti, il ressort que les dénominations « experts », « arboriste », « expert arboricole », « arboriste conseil » sont des termes génériques, adoptés au bon gré du professionnel, qui concernent globalement des activités de diagnostic de l'arbre en général, urbain ou non, chez des clients privés ou publics. On pourrait donc rassembler les termes ou catégories « expert » et « arboriste ». On choisira cependant ici de les différencier. La pertinence de ce choix sera évaluée à la lumière d'une comparaison des réponses de chacun de ces groupes.
- La distinction des catégories, « techniciens » et « gestionnaires », est plus claire. Un gestionnaire (souvent sous la tutelle d'une municipalité, d'une métropole, etc) s'occupe de la gestion de parcs et arbres d'alignement. Il en a la responsabilité, la fonction et le titre. C'est donc a priori celui qui sera le premier en contact avec des ruptures de branches. De plus, s'ils n'ont pas vocation à être spécialistes du diagnostic de la santé des arbres, les gestionnaires avec qui nous avons échangé sont généralement des passionnés qui en savent beaucoup sur le diagnostic et la prévention.

14. <https://urlz.fr/jnqQ>

15. <http://agencedelarbre.com/>

Le technicien de l'arbre¹⁶, comme le gestionnaire, détient un statut officiel, correspondant à un niveau de formation. Il peut travailler aussi bien dans le privé que dans le public. Le niveau requis pour être technicien est plus ambigu au sens où il existe plusieurs grades de techniciens, le plus avancé étant lié à un diplôme d'ingénieur (bac +5). Parmi les techniciens, il peut donc y avoir un panel assez large d'activités, dépendant de la taille de la municipalité (ou de la métropole, etc.) et des strates administratives où se situe chacun. Certains techniciens vont par exemple être « chef de service espace vert » et ne pas être directement au contact des arbres. Au contraire, d'autres peuvent avoir une activité beaucoup plus opérationnelle (élagage, gestion de terrain) et seront en conséquent au contact quotidien avec des arbres. Dans tous les cas, l'activité du technicien est caractérisée par le diagnostic et la gestion d'espaces/patrimoines arborés. Il coordonne très souvent (directement ou par des intermédiaires) une ou plusieurs équipes de grimpeurs/élagueurs. Il semble donc que le statut de technicien témoigne d'une certaine expérience de terrain.

Pour encore mieux comprendre l'échantillonnage de participants, une analyse quantitative a été réalisée. Les parts de chaque catégorie ainsi que la provenance de chaque participant sont présentées dans la figure 2.8. Les constats suivants sont tirés :

- La répartition des participants couvre bien le territoire français, avec une forte concentration dans le Grand Est. Mise à part cette région, la couverture est relativement homogène. Sur les 104 réponses, 7 proviennent de Belgique et 3 de Suisse, ce qui correspond à un peu moins de 10% des réponses. C'est assez intéressant, car l'analyse de presse, initialement cantonnée à l'hexagone, a mis en évidence un certain nombre de d'évènements de ruptures en Belgique. Le sujet y est donc aussi d'intérêt pour les professionnels.
- Les experts et les arboristes (plus de 50% des participants) sont les deux groupes les plus représentés. Parmi les arboristes, à peu près 60% détiennent le diplôme « d'arboriste grimpeur ». Chez les experts, seulement 16% sont « expert forestier ». En tout, cela veut dire que plus de 60% de ces deux « professions » sont des titres auto-attribués. Leurs activités se retrouvent sur leur site, montrant un panel important d'activités autour de l'arbre.
- Dans les catégories les moins représentées, on trouve les gestionnaires de parcs et les techniciens, qui à eux deux, cumulent 25% des réponses.
- La catégorie « Autres », qui correspond à 20% de l'effectif total, couvre aussi un large panel. On y trouve notamment 20% de professionnels retraités (sans formation précisée), 10% de formateurs (grimpe, élagage, taille, etc.) et 10% d'ingénieurs (activité non précisée). Le reste est constitué de professions trop vaguement décrites pour que nous puissions en tirer plus d'informations : « responsable environnement », « expert maîtrise végétation », « dessinateur infographiste » en sont des exemples. S'il doit y

16. <https://urlz.fr/j4y2>

avoir une catégorie qui présente moins d'expérience de la casse estivale que les autres, ce serait celle-là. Ainsi, il sera particulièrement intéressant de regarder les tendances de réponses de cette catégorie pour la comparer aux autres groupes.

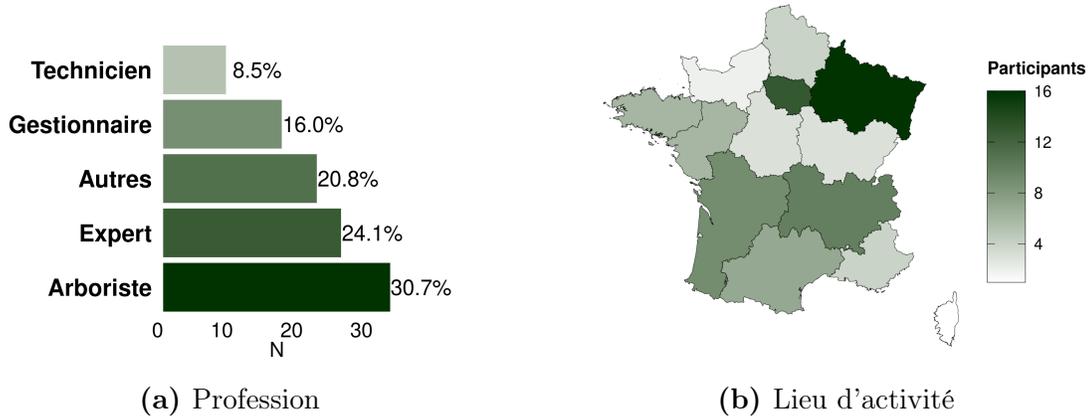


FIGURE 2.8 – Enquête collaborative. Caractérisation de la communauté des participants.

La diversité des formations et des professions de cette communauté de participants est donc importante ; ce qui donne du sens à l'enquête, car les résultats refléteront des tendances concernant une grande partie de la communauté réelle des professionnels de l'arbre. Il est toutefois central de garder à l'esprit que le titre déclaré n'est pas le plus important dans cette enquête : ce qui compte vraiment, c'est l'expérience qu'ont les interlocuteurs vis-à-vis des casses inexplicées.

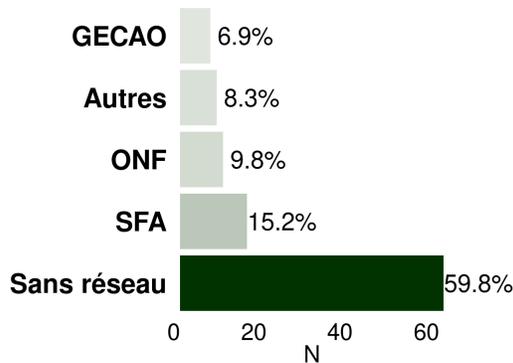


FIGURE 2.9 – Enquête collaborative. Appartenance des participants à des réseaux

À ce sujet, la question sur les liens individuels à des réseaux particuliers est relativement importante. Ces liens témoignent en effet d'une certaine réputation et donc d'une expertise (généralement basée sur l'expérience). La figure 2.9 représente la diversité des réseaux d'appartenances des participants. On constate que près de 60% des individus sont des indépendants qui ne se rattachent à aucun réseau. Or, le lancement du questionnaire s'est essentiellement basé sur une diffusion large dans des réseaux pré-identifiés importants (SFA, GECAO et ONF). Nous nous attendions donc a priori à ce que ces réseaux soient sur-représentés.

Finalement, ce chiffre nous montre que le questionnaire s'est diffusé au-delà de ces réseaux et a relativement bien circulé au sein d'une large communauté d'intéressés.

Discussion et analyse des réponses

Pour une approche visuelle des tendances observées, un traitement des réponses par couleur est proposé :

- La couleur verte (par exemple sur la figure 2.10a) correspond à une tendance prononcée qui se dégage des réponses : le groupe partage une même perception. Cela donne donc des indications fortes sur le phénomène.
- La couleur bleue (par exemple sur la figure 2.11a) correspond à des réponses variées sans qu'un type ou une tendance domine franchement les autres. On a néanmoins quelques tendances qui se dégagent, ce qui signale l'existence de légères divergences au sein de la communauté. Les réponses peuvent être analysées avec d'autres prismes.
- Enfin, la couleur rouge (par exemple sur la figure 2.17) correspond à des réponses très dispersées, sans tendance particulière qui se dégage. Il peut alors y avoir plusieurs explications à cette forte dispersion des réponses : ce sont des questions qui contiennent des biais (géographiques, d'expérience, par exemple), des questions inadaptées (trop précises ou au contraire trop vagues) qui mériteraient d'être retravaillées, ou encore des questions qui font débat et qui soulèvent des controverses puisque les individus ne partagent pas les mêmes points de vue.

La casse estivale : où et quand ?

Cette section retranscrit l'expérience des interlocuteurs sur la fréquence des casses inexplicées et les conditions extérieures le jour de la rupture. Concernant la fréquence et la saisonnalité du phénomène, il semble y avoir un consensus au sein de la communauté interrogée. Les résultats sont représentés dans la figure 2.10. Deux tendances principales émergent :

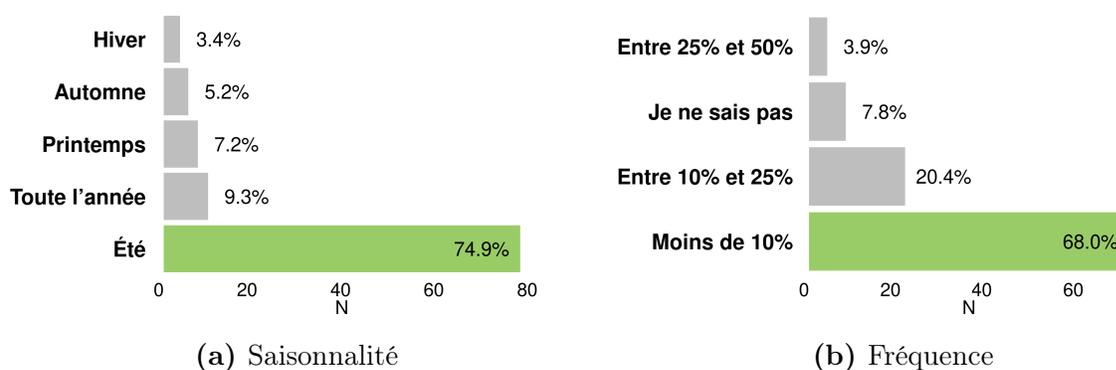


FIGURE 2.10 – *Enquête collaborative. Caractéristiques des occurrences de casses de branches inexplicées. (a) : Occurrence saisonnière, (b) : Importance relative des casses inexplicées par rapport au nombre total de casses observées.*

- Saisonnalité du phénomène (Fig. 2.10a) : pour 75% des interlocuteurs, les casses inexplicées surviennent l'été. Ceci explique l'association qui est souvent faite entre les termes « casse estivale » et « casse inexplicée ». La temporalité du phénomène semblerait donc assez bien corrélée avec la saison, cela confirme par ailleurs les tendances qui émergeaient de l'analyse de la presse. Dans la suite du travail proposé, les termes « casse estivale » et « casse inexplicée » seront alors confondus.
- Les casses inexplicées ne concerneraient qu'une minorité des cas de casses : moins de 10 % pour la grande majorité des professionnels (Fig. 2.10b). Ce résultat est cohérent avec les données issues de la presse, pour lesquelles les casses inexplicées représentent un peu moins 20% des casses totales. Or, comme mentionné ci-dessus, il y a un biais important introduit par la presse sur l'importance du phénomène en termes de conséquences sociales : ne sont mentionnées seulement les casses visibles et importantes, la plupart du temps dans des espaces publics. On peut donc considérer qu'il y a une convergence entre les tendances indiquées par l'analyse de presse et celles données par les professionnels. Dans un deuxième temps, cela amène à prendre avec précaution et recul les réponses à ce questionnaire. La plupart des interlocuteurs basent leurs réponses sur quelques cas auxquels ils ont pu être confrontés, mais l'expérience qu'ils ont vis à vis de ces casses est généralement faible. Cela induit alors un biais statistique important : un professionnel qui a quelques années de carrière et qui durant cette durée n'a vu que peu de casses inexplicées aura du mal à répondre avec exactitude aux questions posées. D'ailleurs, de nombreux participants en sont conscients et le précisent dans leur réponse. Pour illustration, il était commun de trouver des commentaires comme ceux-ci après les questions : « Les cas sont quand même peu courants donc pas facile de se faire une synthèse et répondre précisément », « une précision, les cas de ruptures inexplicées que j'ai pu observer ont été très peu nombreux », etc. Enfin, la catégorie « je ne sais pas » est largement sous-représentée. Cela signifie que la grande majorité des interlocuteurs a une expérience, ou du moins un avis, sur la question. C'est un constat qu'on retrouve dans la majorité des questions posées. Autrement dit, les personnes qui ont bien voulu répondre à ce questionnaire se sentent assez compétentes pour nous fournir des informations. Les participants ne se sont pas manifestés, ou rarement, en tant que simples « personnes consultées », potentiellement ignorantes, mais curieuses. Même s'il s'agit d'auto-jugement, c'est aussi un point qui donne de la crédibilité aux résultats.

Ensuite, une tentative de contextualisation plus fine des conditions climatiques lors des casses inexplicées a été mise en place ; dans un premier temps sous forme de question ouverte (question 10 en annexe A.1). Cela a permis de dégager des catégories et de mieux formaliser le champ de réponses possibles dans la deuxième version (questions 11 et 12 en annexe A.2). Les résultats sont présentés dans la figure 2.11. Les réponses ont pu être réparties en deux catégories. La première (Fig 2.11a) sur les conditions météorologiques au moment de la casse et la deuxième (Fig 2.11b) sur le moment de la journée :

- Pour la première catégorie, les mentions des facteurs « chaleur » et « sécheresse » cumulent à elles seules 60% des avis. L'absence de vent a elle spontanément été citée

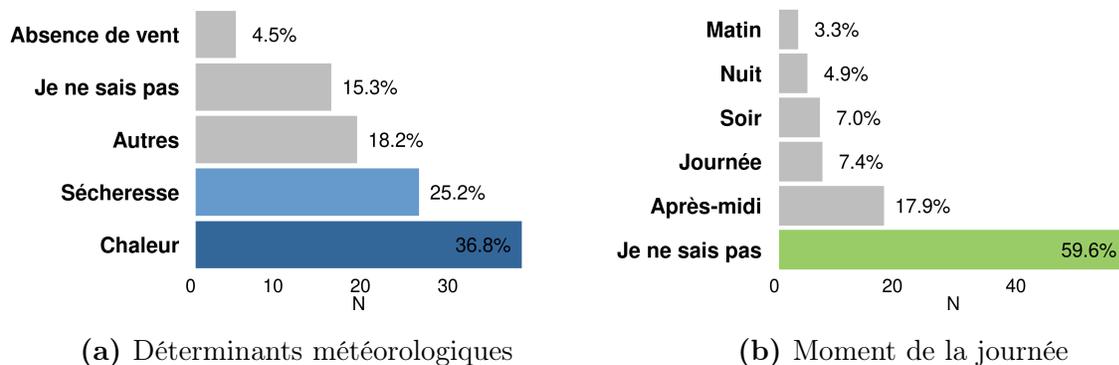


FIGURE 2.11 – *Enquête collaborative. Tentative de contextualisation des conditions climatiques lors des casses inexpliquées.*

plusieurs fois. Ce critère est un peu sous-représenté par rapport à ce qu’il peut ressortir de nos discussions avec la communauté. Par exemple, lors de la visioconférence du 23 novembre au PIAF, la quasi-totalité de l’assemblée pouvait me confirmer qu’il n’y avait pas de vent lors des casses inexpliquées. Cette potentielle sous-représentation peut être due au fait que la question était ouverte, ne suggérant pas cet aspect météo là. Or, dans l’inconscient de beaucoup, le vent explique une bonne partie des casses et une casse « inexpliquée » intervient donc implicitement un jour sans vent. Il n’est donc pas étonnant de retrouver peu de mention au vent dans ce questionnaire. Dans la catégorie « Autres », on trouve notamment le rôle de la pluie, des écarts de température jour/nuit, du vent et de la neige.

- L’autre catégorie était celle des moments de la journée. Contrairement à ce que nous avons régulièrement entendu, *i.e.* que les casses inexpliquées auraient lieu en fin de journée, on s’aperçoit que la très grande majorité des participants n’ont pas d’avis sur la question. La catégorie « je ne sais pas » a ici un statut particulier, car elle est à la fois composée des personnes qui n’ont pas mentionné de moment dans le premier questionnaire et de ceux du deuxième qui ont pu préciser explicitement qu’ils ne savaient pas. Dans tous les cas, seulement 18% des avis stipulent que la casse survient dans l’après-midi, et 7% le soir. Ce n’est pas assez pour dégager une tendance sur cette question.

Finalement, s’il semble y avoir une convergence des avis sur le rôle de la sécheresse et la chaleur : Si beaucoup de participants ne se prononcent pas, les casses semblent cependant être reportées plutôt dans l’après-midi et quasiment jamais de nuit.

La dernière question de cette section concerne le statut des arbres sur lesquels surviennent les ruptures inexpliquées. Ont-ils plutôt un statut « isolé », comme on peut en trouver sur des parkings, des ronds-points, dans des rues ou certains parcs, ou sont-ils plutôt en environnement dense, avec beaucoup de voisins ? La répartition des réponses est représentée dans la figure 2.12.

Les avis sont partagés, avec trois tendances qui émergent : dans l'ordre croissant ; environnement dense, pas d'influence de l'environnement et statut isolé. Même si l'avis que l'arbre a un statut isolé concerne près de 40% des réponses, il faut garder à l'esprit qu'il y a un biais important sur la question .

En effet, la grande majorité des espaces arborés dans les villes est de fait composé d'arbres isolés. Ainsi les 40% ne nous livrent pas une information sur une plus grande sensibilité des arbres isolés; d'autant plus qu'un quart des participants pensent qu'il n'y pas d'influence du statut de l'arbre! De plus, dans la catégorie « Autres », les mentions étaient quasi systématiques : cela arrive aussi aux arbres en environnement forestier. Cette donnée, très certainement sous-estimée par le biais mentionné ci-dessus, renforce le fait que l'on ne peut pas se prononcer quant à l'influence du statut de l'arbre urbain sur le phénomène.

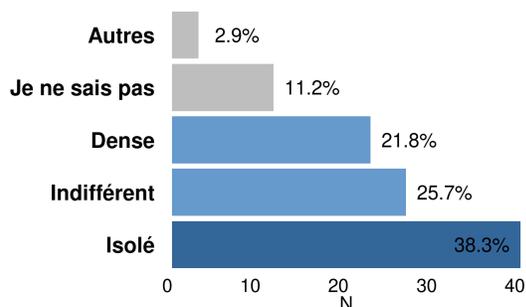


FIGURE 2.12 – Enquête collaborative. Statut de l'arbre impliqué dans un évènement de casse de branche inexpliquée.

Existe-t-il un profil type de branche pouvant casser de manière inexpliquée ? Si oui, peut-on en dresser un portrait robot ?

La suite du questionnaire se compose d'une série de questions sur les profils de branches cassant de manière inexpliquée. On retrouve notamment des questions sur des paramètres permettant de décrire les branches tels que la position de la branche dans l'arbre, sa structure, sa forme et ses dimensions. Les résultats sont proposés dans la figure 2.13.

Pour tous les profils, on observe une (couleur verte) ou deux (couleur bleue) tendances qui se dégagent :

- Position dans le houppier et hiérarchie des branches concernées : Plus d'un tiers (36%) des participants considèrent que les casses concernent des branches basses, et un autre tiers les branches du milieu de houppier. Les branches hautes sont assez sous représentées (7 %). Cette distribution signifie que les branches les plus touchées ne sont pas nécessairement les branches les plus vieilles, comme il est usuellement pensé. Cette distribution est toute à fait cohérente avec la distribution des réponses sur la hiérarchie des branches touchées, où les axes d'ordre 2 (pas les branches directement insérées sur le tronc) représentent 44% des réponses. Ces retours d'expérience ont constitué une surprise en suggérant que les casses inexpliquées ne seraient pas systématiquement sur des charpentières basses de gros diamètre, mais toucheraient une gamme un peu plus importante d'axes.

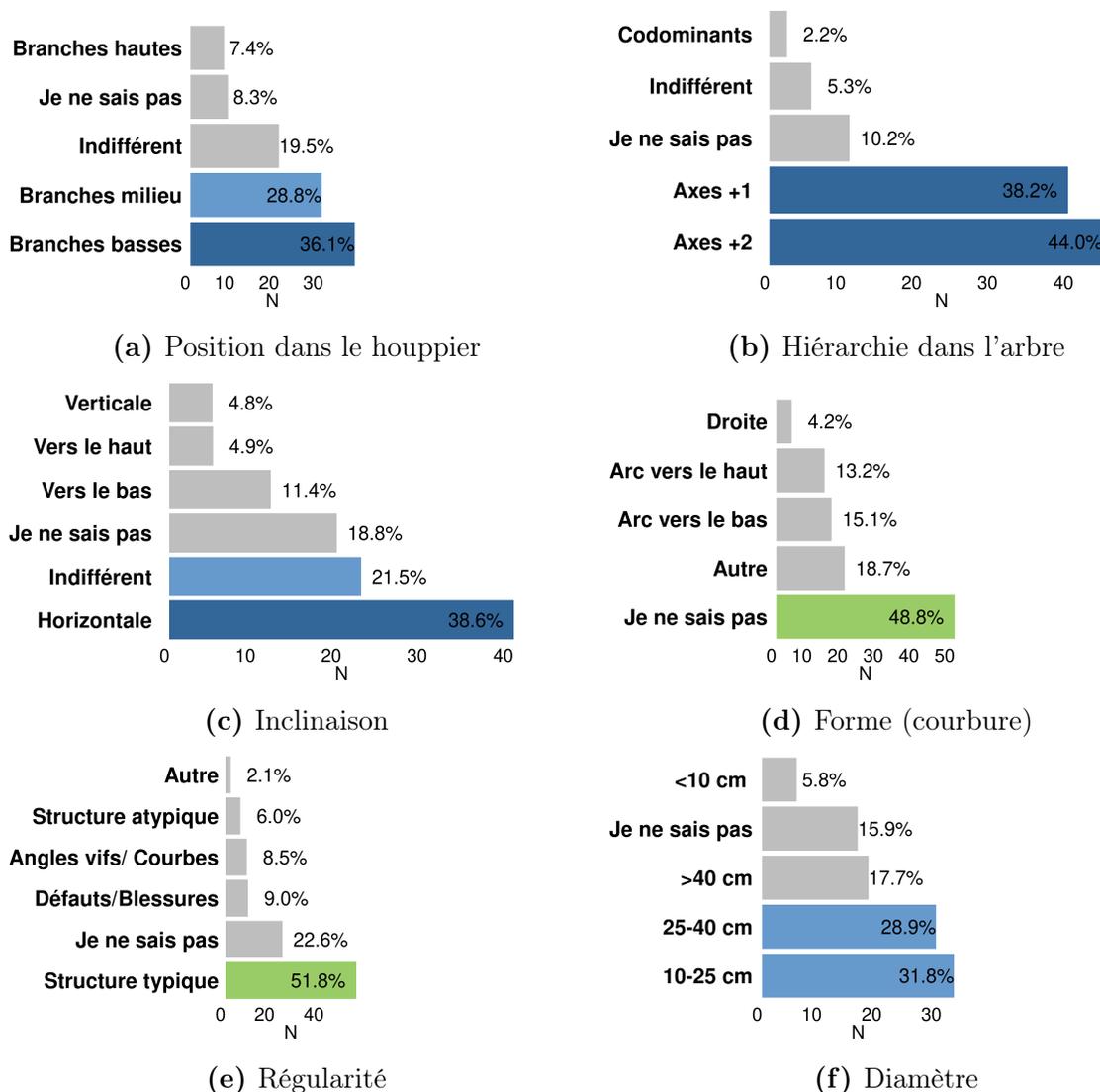


FIGURE 2.13 – *Enquête collaborative. Série de caractères permettant de décrire les branches cassant de manière inexplicable dans l'arbre. En vert, une seule tendance se dégage majoritairement. En bleu, deux tendances se dégagent.*

- Inclinaison et forme des branches concernées : ces questions sont délicates car elles demandent des souvenirs précis, plus fins que simplement situer une hiérarchie ou la position d'une branche dans le houppier. Pour 40% des participants, les branches incriminées sont des axes horizontaux, pas nécessairement rectilignes (la forme « droite » ne retient que 4% des réponses). D'ailleurs, les réponses sur la forme sont sans appel : la moitié des participants ne savent pas si la forme peut jouer un rôle. En réalité, c'est sûrement la question qui était mal formulée de notre part : en effet, en amont de cette partie, nous avons posé (question 15 annexe A) la question du rôle potentiel

de la forme de la branche, et nous avons obtenu plus de 40% de réponses positives, et seulement 20% de « je ne sais pas ». Sur la question de la forme, nous retiendrons que nous n'avons pas su transcrire le savoir des professionnels. Pour l'orientation, nous retiendrons que la part de branches horizontales est un peu sous représentée par rapport aux discussions préliminaires que nous avons eues avec un petit groupe d'experts, mais qu'elle représente quand même une part majoritaire des avis (40%).

- Régularité de la branche : dans cette section, une tendance forte se dégage. Pour plus de la moitié des réponses, les branches touchées semblent être des branches présentant une structure typique de leur essence ; c'est-à-dire sans particularité notable. Les catégories concernant les défauts/blessures/curiosités géométriques sont largement minoritaires : moins de 15% à elles deux ! Cela est rassurant en un sens, en donnant de la crédibilité au sens du mot « inexpliqué ». Cela est aussi cohérent avec l'un des traits caractéristiques de la casse estivale : les branches concernées semblent en bonne santé, et en amont de la casse, il ne semble pas possible de les discriminer des autres.
- Dimensions des branches : cette question était dans la première version du questionnaire une question ouverte (question 24 annexe A.1). En effet, il a souvent été entendu que les casses estivales touchent de « grosses branches », mais il est difficile de chiffrer cela. Nous avons donc voulu laisser le champ libre au participant pour ne pas influencer sa vision. À l'issue des premières réponses, des catégories se sont assez vite dégagées. Une nouvelle version de la question a alors vu le jour dans le questionnaire n°2 (question 20 annexe A.2). Tout d'abord, les petites branches (diamètre <10 cm) semblent peu concernées (moins de 6%). Cependant, il faut être prudent sur cette faible représentation. En effet, une petite branche qui tombe ne nécessite très souvent pas l'intervention d'un professionnel, même pas d'un gestionnaire et ne sont donc jamais répertoriées. Pour les autres catégories, les branches entre 10 et 40 cm de diamètre représentent plus de 60% des réponses. Les très grosses branches (>40 cm) à peu près 20%. Il est assez difficile de conclure sur ces résultats. En effet, nous ne savons pas s'ils sont révélateurs d'une dimension caractéristique de la casse inexpliquée, ou tout simplement le reflet juste de la distribution des dimensions de branches dans la nature. Par exemple, les très grosses branches (>40cm) représentent peut être une part plus petite que les branches de taille inférieure (25-40 cm) dans la nature. Finalement, sur cet aspect, en concordance avec les questions sur la hiérarchie ou la position, l'interprétation sera qu'il n'y a pas un diamètre préférentiel, et que la casse pourrait toucher tout type de dimension de branches.

Cette série de questions sur le profil de branche pouvant casser de manière inexpliquée est très riche en informations. Contrairement à ce que l'on pouvait se figurer initialement, les branches ne seraient pas systématiquement des axes dominants, mais aussi d'ordre 2. Ce ne serait pas nécessairement non plus des branches basses, mais aussi situées en milieu de houppier. Le diamètre des axes concernés reste une donnée sans conclusion claire. Cependant, comme il ressort des conversations préalables, les branches ont des structures typiques pour l'essence et il n'est donc pas possible de les distinguer *a priori* de l'évènement d'une autre

branche.

Où la casse a-t-elle lieu ?

La figure 2.14 indique la position de la casse sur la branche touchée telles que rapportée par les participants à l'enquête. Du point de vue du mécanicien, les casses estivales sont particulièrement intéressantes du fait que la rupture ne serait pas à l'insertion, mais dans « le premier tiers » (approximativement). Ce marqueur qui était sorti de nos discussions est bien un consensus au sein de la communauté : plus de 50% des participants considèrent que les casses inexplicables surviennent dans cette zone. Pour l'autre moitié des participants, les deux parts majoritaires sont soit l'insertion (20%), soit plus loin dans la branche (20% aussi).

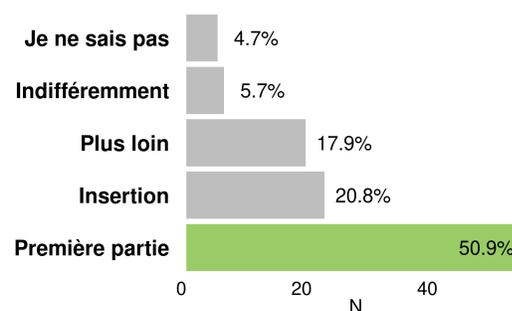
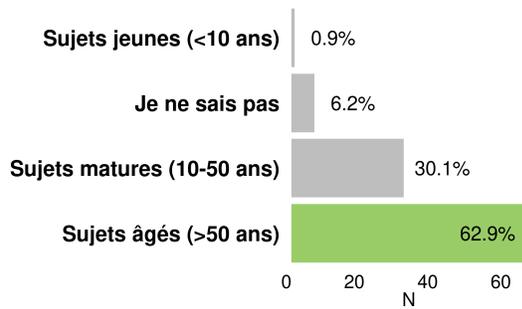


FIGURE 2.14 – *Enquête collaborative. Localisation de la rupture sur les branches concernées. La notion de « proche » ou « lointain » fait ici référence à l'éloignement par rapport au point d'insertion de la branche*

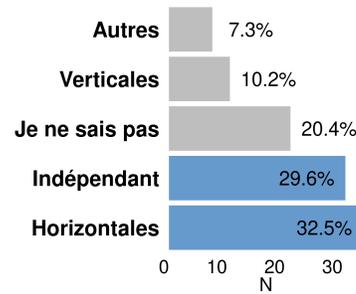
Profil type de l'arbre sur lequel les branches peuvent casser de manière inexplicée.

Une fois le profil de branche récolté, il est intéressant de se poser la question de l'arbre : y a-t-il une variabilité inter-spécifique ? Des discussions préalables avec des grimpeurs élagueurs semblaient indiquer que telle essence est « fragile », telle autre « robuste », etc. En plus de cette question sur la variabilité inter-spécifique, nous nous sommes interrogé sur le stade de développement des arbres touchés : est-ce des arbres matures ? âgés ? jeunes ? Les distributions des réponses pour ces deux questions sont représentées dans la figure 2.15. Tout d'abord, concernant l'âge des arbres concernés, la tendance semble très claire : pour plus de 60% des participants, la grande majorité des arbres touchés sont des sujets âgés (>50 ans). La catégorie « Sujets jeunes » est très certainement sous-représentée, comme nous l'ont précisé certains participants ; tout d'abord car les arbres jeunes ne sont que rarement diagnostiqués, et ensuite car les chutes de petites branches ne sont pas très remarquées.

Le questionnement sur l'essence aurait pu être une question ouverte, suggérant de faire au répondant une liste exhaustive des cas auxquels il avait été confronté. Il y a là un biais très important qui est géographique (les essences urbaines dépendent des géographies des villes) et historique (les politiques de gestions urbaines varient selon l'histoire de la ville). Nous nous serions probablement retrouvé avec une diversité d'essences qui ne nous aurait pas beaucoup



(a) Age de l'arbre



(b) Architecture de l'arbre

FIGURE 2.15 – *Enquête collaborative. Identification d'un profil type d'arbre pouvant être touché par des ruptures inexplicées : son âge (a), et l'orientation de ses branches (b) (plutôt horizontales, plutôt verticales, etc).*

aidé. Nous avons donc choisi de catégoriser les essences suivant le type d'architecture : les architectures avec des branches « plutôt horizontales » ou « plutôt verticales ». Deux tendances émergent des réponses (figure 2.15.b) ; chacune pour à peu près un tiers des avis. Pour le premier tiers, les essences touchées ont des majorités de branches horizontales, tandis que pour le deuxième, la casse est indépendante de l'essence.

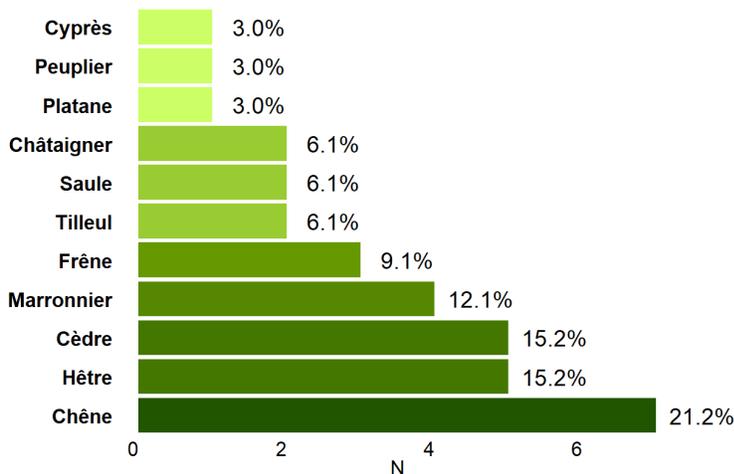


FIGURE 2.16 – *Enquête collaborative. Différentes essences touchées par les casses inexplicées.*

Sans que nous l'ayons explicitement demandé dans le questionnaire, beaucoup de commentaires nous ont quand même mentionné les essences sur lesquelles ont été observées les ruptures inexplicées. Nous avons donc exploité cette information qui ne reporte finalement que 33 cas, dont la répartition est montrée dans la figure 2.16. Sur les 9 essences relevées dans l'analyse de presse (figure 2.6), 8 sont communes. Le cèdre est plus représenté dans les cas rapportés par les professionnels, avec 4 mentions contre 1 dans la presse. Le chêne est visiblement une essence qui compte pour plus de 20% des casses relevées. Peut-être que le fait qu'il y ait très peu de mention de chêne dans la presse s'explique par la relative faible présence de chêne dans les villes, mais peut-être plus dans des parcs chez des privés. Le panel observé est encore large, suggérant que les casses inex-

pliquées ne touchent pas un seul type d'architecture. Dans les deux relevés, un autre point commun est la faible présence de résineux, avec pour seul représentant le cèdre. La question des groupes d'essences (feuillu/résineux) aurait été une question pertinente à poser dans notre questionnaire.

Toujours dans l'objectif de caractériser un profil d'arbre pouvant subir des ruptures inexplicables, nous nous sommes intéressés au rôle potentiel de l'élagage. C'est un point qui avait émergé et soulevé des oppositions lors de la discussion du 23 novembre. C'est donc tout naturellement que nous avons choisi de poser la question de l'influence de la taille à un plus grand auditoire. Même sur ce plus grand échantillon, les retours, représentés dans la figure 2.17, sont très partagés.

Il n'est pas possible de dégager une réponse claire à cette question de l'influence de l'élagage. Cependant, il est important de retenir que c'est une question qui fait débat et pour laquelle les avis sont généralement polarisés. Dans les cas où le participant considère que l'élagage a une conséquence sur la probabilité d'apparition des casses, des précisions avaient été demandées (question 21 (resp 24) annexe A.1 (resp A.2)). Comme dans toute question ouverte, les réponses sont difficilement catégorisables. Néanmoins, la majorité des cas sont des situations où les élagages ont été conduits trop sévèrement ou de façon incorrecte (mauvaise saison, mauvaise coupe) engendrant des faiblesses mécaniques. Différents types de situations ont ainsi été décrits :

- Favorisation du développement des écorces incluses (mais la casse n'intervient pas à l'insertion !)
- Déséquilibre global de la structure
- Houppier éclairé (augmentant alors l'exposition des branches au vent ou au rayonnement solaire)
- Création de rejets mal équilibrés
- Création d'un mauvais recouvrement, qui va engendrer des départs de pourriture en interne (mais les casses inexplicables ne montrent pas de traces de pourriture)

Dans une partie des réponses, nous pouvons d'ailleurs percevoir que les participants ont dérivés du sujet, en décrivant des raisons provoquées par l'élagage et pouvant expliquer la casse.

Finalement, le profil d'arbre sur lequel des occurrences de casses de branches apparaissent préférentiellement est encore flou. Un des marqueurs semble l'âge, mais pour la question du type d'architecture, de l'essence ou de sa gestion (taillé ou non), aucune tendance ne semble se dégager. Néanmoins, au delà de ces attributs, les arbres touchés semblent être en très

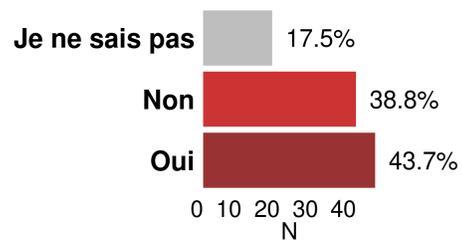


FIGURE 2.17 – *Enquête collaborative. Influence de l'élagage sur la propension à la casse.*

grande majorité des feuillus. Cela aurait été très intéressant de confirmer cette hypothèse en posant explicitement la question.

Une branche qui va casser, ça s'identifie ?

La dernière question portait sur la capacité du participant à identifier a priori de la rupture, des branches sujettes à ce genre de phénomène. C'est une question que nous aurions pu mettre en début de questionnaire mais nous avons fait le choix de le mettre en fin : le participant a bien eu le temps de se positionner sur le phénomène, et répond à cette question en ayant plus d'éléments à l'esprit. Les résultats sont sans appel : plus de 85% des répondants sont démunis quant à la possibilité de détection et d'anticipation.

Influence des catégories sociaux-professionnelles sur la distribution des réponses

Avant de conclure sur ces analyses, nous avons regardé l'influence des catégories socio-professionnelles sur les résultats. En particulier la catégorie « Autres », qui représente 20% de la population de réponse (figure 2.8a), et qui potentiellement contient des rapports aux casses inexpliquées très divers. La démarche est illustrée sur les questions associées au profil des branches concernées par les ruptures estivales (figure 2.13). La distribution des différentes réponses par profession est proposée dans la figure 2.18. En légende, les termes R1-6 correspondent aux propositions par ordre croissant de taux de réponses sur la population globale.

Le premier constat est que les deux premières tendances (R1 et R2) sont systématiquement dominantes, quelle que soit la question et quel que soit le groupe. Cela montre que les groupes convergent globalement vers les mêmes réponses. En deuxième lieu, il est constaté que chaque groupe semble suivre une dynamique propre, et qu'il n'y a pas d'alignement d'un groupe socio-professionnel sur un autre. En cela, le groupe « Autres » ne semble pas particulièrement se distinguer. L'échantillon de questions proposé dans la figure 2.18 étant représentatif de l'ensemble des questions, les conclusions peuvent être généralisées à l'échelle de l'enquête complète.

Cette section est intéressante car elle montre que ce n'est pas la catégorie sociaux-professionnelle qui définit le niveau de connaissances empiriques, et que les personnes qui ont répondu semblent toutes avoir une connaissance de la problématique.

2.3.3 Création d'un groupe de recensement des casses inexpliquées

Dans la continuité de cette enquête et de cette démarche d'interaction science-société, nous avons mis en place un groupe collaboratif afin de recenser des casses estivales sur la plateforme Pl@ntNet¹⁷. L'application peut être installée facilement sur un téléphone portable. Il y avait

17. <https://plantnet.org/>

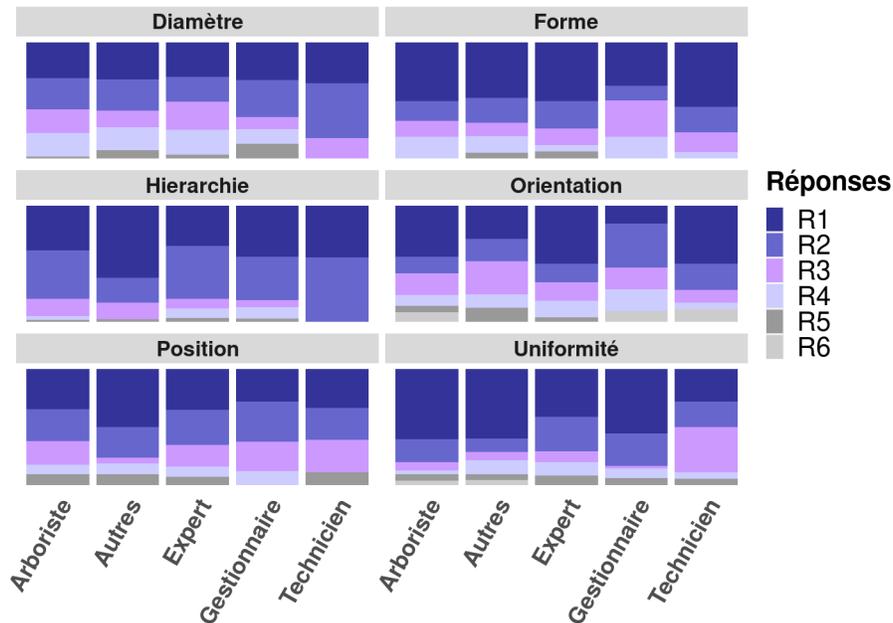


FIGURE 2.18 – *Enquête collaborative. Distribution des réponses par groupes socio-professionnel aux questions sur les caractéristiques de branches. Pour illustration, sur la question de l'uniformité (figure 2.13c), les réponses possibles étaient : R1 : "branche horizontale", R2 "Indifférent", R3 "Je ne sais pas", R4 : "inclinée vers le bas", R5 : "Inclinée vers le haut", R6 : "Verticale"*

alors deux objectifs principaux :

- Affiner et étayer le discours des professionnels par des cas concrets récents et des photos. Sur l'application, il y a la possibilité de décrire succinctement les conditions de la casse (lieu, type de branche, essence, etc), et de charger jusqu'à 4 photos de la rupture. L'inconvénient du protocole était le manque d'ergonomie du site, pas nécessairement conçu pour ce type de relevé. Les concepteurs nous ont effectivement indiqué que cette version des « groupes collaboratifs » est une version beta qui devrait vraiment s'améliorer en terme de confort d'utilisation dans les mois/années à venir.
- Offrir la possibilité de récupérer rapidement des échantillons de branches, afin de constituer une bibliothèque conséquente d'échantillons pour analyser la structure du bois, volet que nous n'avons pas du tout abordé dans le cadre de cette thèse.

Le groupe a été créé à l'été 2021, et compte aujourd'hui 20 utilisateurs ; ce qui est très peu. C'était cependant une volonté de notre part de ne pas l'ouvrir à tous et de le tester avec un petit échantillon de professionnels. Aucun cas de casse n'a été posté depuis. Ceci s'explique en partie par le manque d'accessibilité du groupe, difficilement accessible en version portable, donc l'utilisateur doit attendre d'être sur un ordinateur pour recenser une casse (pas pratique pour une utilisation terrain). Au delà de cet aspect pratique, cela témoigne de la difficulté de créer une dynamique de collecte comme celle-ci, autrement plus contraignante que de

répondre à un questionnaire d'enquête. Cet « échec » montre à quel point un gros travail en amont est nécessaire pour emmener une communauté professionnelle, voire, à terme, le grand public, dans une démarche participative. Ce travail colossal ne pouvait pas être réalisé dans le cadre de cette thèse mais la démarche ouvre des perspectives intéressantes.

Également, seulement un échantillon de branche a pu être récupéré. Il y a une vraie difficulté à la création d'une collection d'échantillon : lorsque les experts arrivent sur place, la branche est très souvent déjà débitée. Il faudrait donc pouvoir développer un levier d'action en amont pour une politique de conservation de certaines parties de ces branches qui pourraient être ensuite transportées au PIAF pour analyse. Cela pourrait s'avérer intéressant pour récolter des échantillons d'un phénomène heureusement rare.

2.4 Conclusion

Cette enquête a permis d'affiner la perception du phénomène des casses inexplicables par les professionnels concernés ; à savoir les « experts » (au sens large : arboristes, élagueurs, grimpeurs, etc.) et les gestionnaires d'arbres urbains. Elle a confirmé certains marqueurs qui nous avaient été rapportés lors de discussions préliminaires et a permis d'en faire émerger de nouveaux. Selon l'analyse de presse et la communauté des professionnels, il semblerait que les casses inexplicables surviennent plutôt en été. Aussi la chaleur et la sécheresse semblent être des marqueurs importants de ce phénomène. De plus, il semblerait que l'après midi soit plus propice à la casse, les événements n'intervenant par ailleurs jamais la nuit. Le statut de l'arbre (isolé ou non) ne semblerait pas jouer de rôle notable. Les branches touchées pourraient être des branches basses ou de milieu de houppier, des axes +1 ou +2, plutôt horizontales avec une structure typique de l'essence sans singularité notable (pas de défauts visibles ou d'identifiants visuels la différenciant des autres branches). La gamme de diamètres touchés seraient assez large, montrant que cette casse n'implique pas seulement les charpentières ; ce qui semble cohérent avec la hiérarchie et la position dans le houppier. Il y a cependant des réserves sur cette question de la dimension.

Pour les arbres touchés, il y a un consensus sur l'importance de l'âge : les ruptures apparaîtraient préférentiellement sur des arbres « âgés » (> 50 ans). Pour l'essence, il est impossible de se prononcer. Il ne semble pas y avoir d'essence particulièrement prédestinée, mais il pourrait y avoir un effet du groupe d'arbre (résineux/feuillu). Il aurait été intéressant de poser directement cette question dans le questionnaire.

Au-delà des conclusions sur les marqueurs des ruptures inexplicables, cette enquête a été importante dans un cadre de sensibilisation de la communauté des professionnels de l'arbre à la recherche scientifique. Elle a contribué à développer et renforcer un dialogue qui est primordial pour affiner les enjeux de la recherche scientifique sur le sujet. Nous avons trouvé une communauté bienveillante, très volontaire, prête à aider et donner son avis sur une question pour laquelle elle exprime beaucoup d'attentes.

Chapitre 3

Régulation de la température dans les branches

Sommaire

3.1 Introduction	96
3.1.1 Hypothèses	96
3.1.2 Contexte	97
3.2 Matériel et méthodes	100
3.2.1 Développement de dispositifs de monitoring de température des branches	100
3.2.2 Matériel végétal	101
3.2.3 Situations étudiées	102
3.3 Préambule théorique	107
3.4 Résultats et discussions	109
3.4.1 Situation de référence	109
3.4.2 Configurations complémentaires	117
3.5 Conclusion	123

3.1 Introduction

3.1.1 Hypothèses

La collecte du savoir empirique des professionnels du monde de l'expertise et de la gestion de l'arbre urbain a indiqué un effet de la température sur les occurrences de casses ; suggérant un lien entre les conditions de chaleurs extrêmes et l'état mécanique des branches. Dans un contexte de canicules locales, nous faisons l'hypothèse que la température du bois vert serait susceptible d'atteindre des valeurs suffisamment importantes pour modifier l'état mécanique de la branche ; et conduire (directement ou indirectement), à sa rupture. Plusieurs hypothèses ont été envisagées :

- Hypothèse n°1 : **une augmentation de température modifie le seuil plastique des cellules du bois vert.** Les parois cellulaires du bois sont principalement composées de trois polymères (section 1.1.3) : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Une des propriétés importantes des matériaux polymères est la température de transition vitreuse T_g . En dessous de cette température, le matériau se trouve dans une phase dite « amorphe », caractérisée par une faible ductilité. Au-delà, le matériau trouve de plus grandes capacités de déformations. À l'état humide, la température de transition vitreuse des héli-celluloses a été montrée autour de 40°, celle de la lignine entre 50° et 100°, et celle de la cellulose bien au-dessus de 100° [Furuta et al. (1997)]. La température de transition vitreuse du bois a fait l'objet de nombreux travaux, et se trouve entre 60 et 200°, en fonction du taux d'humidité et de l'essence [Lenth and Kamke (2001)]. Localement, si la température atteint des valeurs avoisinant les 60°, on est susceptible d'observer des changements de comportement mécanique du bois. Dans notre contexte de branche soumise au rayonnement solaire, nous supposons alors que (i) localement des températures de bois vert de cet ordre de grandeur peuvent être atteintes au sein de la branche et (ii) ces changements engendrent alors une plastification précoce des cellules de bois. À l'échelle de la section, cela se traduit par un changement de plasticité quasi-instantané (devant l'échelle de vie des cellules), engendrant une brusque redistribution des contraintes de croissance. En particulier, une augmentation du segment plastifié est synonyme d'une diminution fictive du moment interne porté par les contraintes de croissance, qui vont devoir compenser cette diminution sur les cellules non plastifiées. Il y a un palier limite pour lequel la compensation n'est plus possible et qui mène alors à la rupture de la branche.
- Hypothèse n°2 : **une augmentation de température peut induire un séchage en humidité saturée.** Le PSF d'une tige est dépendant de la température [Yokota T (1962)]. En particulier, une augmentation forte de température peut entraîner une baisse du PSF. Cette chute implique une évacuation de l'eau des parois, et donc un séchage local. Cela provoque un phénomène de retrait, plus important dans la direction tangentielle que radiale (anisotropie du retrait, section 1.2.1). Cette anisotropie favorise alors l'apparition de fissures en périphérie [Gril and Thibaut (1994)]. Ce phénomène

est la conséquence d'une chauffe homogène de la section. Dans le cas d'une surchauffe locale, la fissuration apparaîtrait depuis le point chauffé.

- Hypothèse n°3 : **une augmentation de température entraîne une recouvrance hygrothermique pouvant favoriser la propagation de fissures internes.** En plus d'une augmentation locale forte de température, cette hypothèse présuppose la présence de fissures internes dans la tige. La chaleur vient alors activer la recouvrance différée de ces fissures, venant augmenter le risque de fissuration à cœur ou de roulures [Gril et al. (1993); Gril and Thibaut (1994)].

Les hypothèses 2 et 3 sont des hypothèses relatives aux contraintes transverses, tandis que la première hypothèse porte sur la contrainte longitudinale. L'ensemble de ces hypothèses est conditionnée par une augmentation forte de température du bois vert. La question préliminaire et fondamentale est alors :

À quelle température peut monter le bois d'une branche en période de canicule ?

Plus généralement, nous nous demanderons quels sont les grands principes qui pilotent la dynamique thermique des tiges, et nous essayerons de dresser une liste des conditions pouvant amener à des phénomènes de surchauffes locales.

NB : Dans la suite de ces travaux, le terme « axe » se référera indépendamment au tronc ou aux branches.

3.1.2 Contexte

La dynamique de la température dans les arbres est une question complexe, dont l'intérêt et l'étude ont commencé à la fin du 18ème siècle [Hunter (1775)]. Cette question fortement multidisciplinaire recoupe de nombreux volets, et présente un vrai défi expérimental et de modélisation. Si les études de température dans les troncs ont d'abord été empiriques [Koljo (1950)], les modèles de prédiction se sont rapidement développés dès les années 1960 [Derby and Gates (1966), Herrington (1969)]. Mesures et expériences recouvrent aujourd'hui un spectre varié d'applications, comme la réponse d'un tronc au feu [Chatziefstratiou et al. (2013)], ou encore l'influence des cycles gel-dégel sur la réponse thermique [Reid et al. (2020)]. Si la compréhension de certains phénomènes transitoires s'affine, la dynamique de distribution de la température dans les branches et troncs ne reste que peu mesurée. Cette distribution est le fruit de l'interaction entre un environnement thermique hautement variable (piloté par l'orientation et l'exposition de l'axe), la géométrie de l'axe et ses propriétés thermiques [Derby and Gates (1966)]. Des premières expériences sur la distribution thermique, quelques résultats généraux ont été obtenus. Herrington (1969) en propose une synthèse :

1. Les variations de température dans un axe suivent les cycles jours/nuits imposés en surface. L'amplitude des cycles diminue avec la profondeur radiale.

2. Pendant les jours ensoleillés, la répartition circumférentielle de la température est hétérogène, avec une température plus forte sur les secteurs ensoleillés. Lorsque la température extérieure est uniforme (absence de rayonnement), un gradient convectif provoqué par le vent peut aussi conduire à des variations circumférentielles. Cette action convective du vent est discutée dans la littérature, certains la montrant essentielle à la compréhension de la répartition de la température en surface [Koljo (1950), Reid et al. (2020)], d'autre pensant que c'est un facteur de second ordre [Gerlach (1929), Herrington (1969)]. Il semblerait que l'effet convectif ou non du vent soit très conditionné par l'exposition de la structure (arbre isolé ou non, zone ventée ou non).
3. Les petits axes ont un temps de réponse plus réduit (diffusion plus rapide).
4. Un gradient longitudinal de la température a été mesuré à trois reprises [Gerlach (1929); Rouschal (1939); Herrington (1969)], et pourrait être expliqué par la présence d'un flux de sève depuis la base. Ce gradient diminue avec la longueur. Par exemple, Herrington (1969) a montré que sur un pin rouge (*Pinus resinosa*) de 48 ans, de 28,8 cm de diamètre, le refroidissement lié à l'absorption d'eau froide du sol n'était plus visible dès 1,4m de hauteur. Le flux de sève viendrait donc refroidir le tronc, et son effet diminuerait avec la longueur. Enfin, ce gradient serait dépendant de la structure anatomique de l'espèce, et particulièrement de sa porosité. Notamment, les bois à zone initiale poreuse seraient sujets à des gradients plus importants [Herrington (1969)].

Depuis les années 1960, aucune étude majeure sur la mesure des températures dans les troncs (ou branches) n'a été relevée. Une limite commune à la plupart des expérimentations passées concerne la durée des mesures, qui n'excède pas quelques jours dans la plupart des cas. À ce jour, l'expérimentation la plus importante et complète reste celle de Reynolds (1939), qui a mesuré la température en trois points (surface, cambium, cœur) d'un peuplier noir d'Amérique *Populus deltoides marshall* (diamètre de 25,4 cm à 9,1 m de hauteur), pendant plusieurs semaines par saison, et pendant 4 ans. C'est d'ailleurs la seule référence des variations de température dans un tronc lors de périodes chaudes : durant l'été 1934, les températures en surface ont atteint 42,5 degrés pendant plusieurs jours d'affilée. La température au niveau du cambium présentait alors plus de 10 degrés de moins que celle de surface, n'excédant pas les 32 degrés. Cette seule donnée ne nous permet cependant pas de statuer sur les potentiels seuils de température que peut atteindre une tige en période de canicule. De manière plus générale, la connaissance sur les cycles de températures d'une tige au quotidien manque de données expérimentales sur le long terme.

Si la littérature s'avère être lacunaire sur ce point, elle abonde de travaux sur l'étude du comportement de la sève, point essentiel pour comprendre comment sont gouvernées les variations de température. Ainsi, de nombreuses techniques d'estimation du débit de sève ont été développées au siècle dernier, dont les principales sont :

- Méthode des impulsions de chaleur : développée par Hüber B (1937), puis largement utilisée et améliorée [Swanson (1962); Cohen et al. (1981)], cette méthode consiste à appliquer une impulsion thermique, puis à mesurer son temps de diffusion via deux capteurs de température situés de part et d'autre de la zone d'application de la chaleur.

Un couplage des formulations de la température en ces points permet alors, par la mesure du temps de diffusion (sous réserve d'un certain nombre d'hypothèses formalisées par Marshall (1958)), d'obtenir le débit de sève correspondant.

- Méthode de la dissipation thermique : développée par Granier (1985), cette technique est largement inspirée de la précédente. Elle consiste à mesurer une dissipation de chaleur à l'aide de deux électrodes. L'apport de chaleur par effet Joule de la première électrode est alors relié à la dissipation de chaleur mesurée par la deuxième. Contrairement à la première, cette technique s'est avérée efficace pour faire des mesures en toute situation, même lorsque le flux de sève est faible.
- Méthode de la déformation du champ de température : qui consiste à mesurer les variations du champ de température en réponse à la chauffe d'une sonde insérée radialement dans le tronc [Nadezhdina et al. (1998)]. C'est une méthode qui ressemble à celle de la dissipation thermique, mais à la différence que les capteurs de température sont aussi positionnés radialement, permettant une approche plus fine du problème.
- Méthode des équilibres thermiques. Cette méthode, initiée par les travaux de Vieweg and Ziegler (1960), consiste à chauffer de manière uniforme un cylindre de bois. Une mesure des profils de chaleur de part et d'autre du cylindre, permet alors, via l'expression 2D du champ de température (intégrant conduction et convection, et dont l'expression est développée dans Pickard and Puccia (1972)), d'obtenir le flux de sève correspondant. Cette méthode se décline sous plusieurs utilisations [Steinberg et al. (1989)], mais celle issue des travaux de Čermák et al. (1973), spécialement adaptée au tronc [Čermák et al. (1976)], est à mentionner. Cette mesure consiste à appliquer une différence de température constante entre les deux bords du cylindre. Elle présente l'avantage d'être précise, et de ne pas avoir besoin d'étalonnage.

Toutes ces méthodes consistent à mesurer un profil de température et à en déduire, par comparaison avec une formulation du champ de température, le flux de sève correspondant. Si le principe est simple, la théorie nécessaire pour établir les expressions des champs de température peut être assez sophistiquée. S'affranchir de certaines hypothèses de travail et mieux prendre en compte le comportement thermique de l'arbre dans ce type de mesure fait aussi l'objet d'importants travaux [Wullschlegel et al. (2011)].

L'ensemble de ces techniques a permis de mieux comprendre les dynamiques de variation de la sève, en particulier son comportement en période de sécheresse. Tout d'abord, le flux de sève varie fortement d'une espèce à l'autre : Gartner et al. (2009) a montré que pour un même environnement, le flux de sève chez le bouleau *Betula pendula* était trois fois supérieur à celui de l'épicéa *Picea abies*. Plus généralement, il a été montré que le flux de sève chez les feuillus était plus élevé que celui des résineux [Olchev et al. (2002); Catovsky et al. (2002)]. Ce comportement est majoritairement conditionné par les capacités d'évapotranspiration de l'arbre [Pataki et al. (2000)] (piloté par la conduction stomatique, et la structure anatomique de l'arbre : les gros vaisseaux des feuillus permettant un débit beaucoup plus important!), ainsi que la structure de ses racines [Gartner et al. (2009); Burk (2006)]. Ces deux paramètres sont en effet liés au potentiel hydrique d'un axe, auquel est fortement corrélé le flux de sève

[Stöhr and Lösch (2004)].

Ainsi en période de sécheresse, le ralentissement de l'évapotranspiration dû à un stress hydrique du sol contribuent à fortement réduire ce flux de sève : les mesures de Gartner et al. (2009) en ont montré une diminution par deux lors de l'été 2003, et ce, indépendamment de l'espèce. Dans le même ordre de grandeur, les travaux de Hölscher et al. (2005) sur cinq espèces de feuillus ont mis en évidence que la sécheresse induisait une perte de 30% et 44% du flux de sève. Les études à ce sujet sont encore nombreuses, mais nous retiendrons que les périodes de sécheresse s'accompagnent d'un fort ralentissement du flux de sève dans les arbres. La corrélation entre cette diminution et une potentielle montée en température des axes n'a jamais été reportée expérimentalement.

Ce bref aperçu bibliographique met en relief le manque de données expérimentales sur le long terme. Également, si les données sur la dynamique du flux de sève sont nombreuses, et ont montré un fort ralentissement de ce flux en période de sécheresse, il n'y a à ce jour pas (ou peu ; la seule proposition sur le sujet étant celle de Reynolds (1939)) eu de mise en évidence claire de l'influence de ce ralentissement sur les profils de température. La dynamique de température dans les axes en période chaude reste donc encore très peu connue.

Dans ce chapitre, nous avons développé des dispositifs de monitoring de température qui ont été disposés sur des branches/troncs de deux essences, permettant un suivi régulier de la température pendant plus d'un an. Une approche descriptive physique des phénomènes a été mise en place, avec pour objectif d'identifier les facteurs qui peuvent potentiellement amener à des surchauffes locales.

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Développement de dispositifs de monitoring de température des branches

Les dispositifs conçus avaient dans leur cahier des charge d'avoir une autonomie en énergie de plusieurs mois et d'être capables de transférer les données à distance pour un contrôle en continu des niveaux de température. Ils sont composés de 3 unités :

1. Une unité de mesure de la température. Elle est constituée de sondes numériques DS18B20 (Fig 3.1.a). Elles présentent l'avantage de ne pas nécessiter d'étalonnage externe, d'avoir un faible échauffement et une précision tout à fait convenable pour notre étude : $\pm 0,5^\circ$ sur la plage $-10^\circ/85^\circ$. Les sondes ont été moulés dans un cylindre de résine (Fig 3.1.b,c) afin de les isoler électriquement et d'éviter les court-circuits.
2. Une unité d'acquisition et de transmission des données. L'acquisition et la communication des données sont effectuées grâce à des cartes de contrôle (Fig 3.1.e) conçues par Gael Godi (Institut Pascal, Clermont-Ferrand), qui nous a accompagné tout au long de ces expérimentations. La transmission des données est une transmission WIFI,

ce qui a restreint le domaine d'étude à un rayon proche d'un point d'accès.

3. Une unité d'alimentation. Les cartes sont alimentées par 4 piles AA 1.5V (Fig 3.1.e), qui présentent l'avantage d'être légères, pas trop volumineuses et suffisantes pour nos mesures : à raison d'une mesure de la température toutes les 30 minutes, les piles sont changées dans un intervalle de 3 à 9 mois (donnée fortement dépendante de l'environnement de la carte : humidité et température).

Le système complet {sondes + cartes + alimentation} a été directement fixé aux troncs et branches à l'aide un boîtier conçu sur mesure (Fig 3.1.g,h). Le boîtier a été fabriqué en impression 3D (Fig 3.1.d) au laboratoire, et peint avec un revêtement spécial pour l'extérieur. Une fois placées dans le boîtier, les cartes ont été protégées avec un vernis isolant à base de silicone. Un bouton poussoir, accessible depuis l'extérieur, a également été ajouté au système. Il permet de déclencher des mesures et configurer les cartes sans avoir à ouvrir le système complet. La figure 3.1 illustre l'ensemble des étapes de fabrication et de pose des capteurs.

3.2.2 Matériel végétal

Dans cette étude, nous avons choisi de mesurer un résineux et un feuillu. Le choix s'est alors porté sur un noyer *Juglans regia* et un cèdre *Cedrus atlantica* situés sur le site de INRAE de Crouel, à proximité du laboratoire PIAF. Ils satisfaisaient donc bien les contraintes de distances évoquées ci-dessus. Le DHP (Diamètre à Hauteur de Poitrine : diamètre mesurée à 1m30 du sol) du noyer est de 33 cm, tandis que celui du cèdre est de 76 cm. Il est difficile de dater l'âge du cèdre, qui était présent sur le site avant l'arrivée des laboratoires : il a donc au moins 50 ans. Le noyer est plus jeune (approximativement 20 ans). Chacun des arbres a donc atteint le stade de maturité. Enfin, les deux sujets sont en croissance libre et ne sont pas dans un environnement ombragé : ils ont donc un secteur exposé au rayonnement direct pendant une partie de la journée. Une photo de chaque sujet est proposée dans la figure 3.2. Ces deux arbres sont éloignés d'une vingtaine de mètres l'un de l'autre.



(a) *Juglans regia*

(b) *Cedrus atlantica*

FIGURE 3.2 – Mesure de températures : arbres instrumentés à proximité des bâtiments du PIAF.

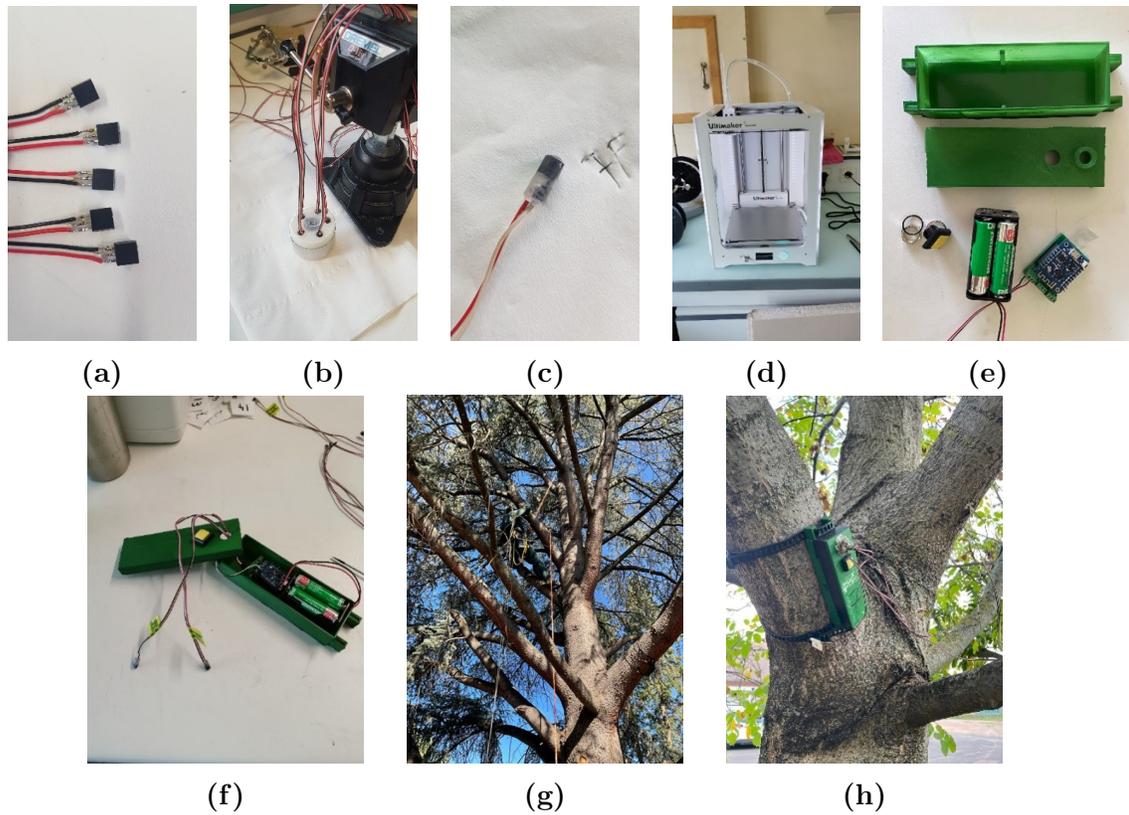


FIGURE 3.1 – *Dispositif de monitoring de température. Différentes étapes de fabrication et de pose des capteurs. a) Sondes soudées. b) Moulage des sondes dans la résine. c) Sonde moulée. d) Impression d’un boîtier de protection. e) Vue éclatée complète d’un dispositif de mesure : boîtier de protection, bouton poussoir, alimentation, carte d’acquisition et de communication. d) Dispositif intégré avec les sondes de températures. h) Pose du dispositif sur arbre. g) Dispositif fixé sur une branche.*

3.2.3 Situations étudiées

Différentes configurations ont été étudiées. Tout d’abord, à l’image des expérimentations de la littérature, une mesure des distributions radiales de température dans chaque section. Les capteurs de température ont alors été installés en 4 points différents (figure 3.3a) :

1. Un capteur « de surface » T_s , fixé sur l’écorce (donc à l’extérieur).
2. Un capteur situé juste sous écorce, au niveau du cambium T_{ca}
3. Un capteur « intermédiaire » T_i , dont la profondeur (écorce exclue) correspondait à environ 30% de la valeur du rayon.
4. Un capteur au coeur T_{co} , dont la profondeur (écorce exclue) était à une fraction d’environ 70% du rayon.

En parallèle, nous avons exploré la distribution longitudinale de température (figure 3.3b).

Pour cela, différentes sondes ont été placées à une même profondeur relative (même fraction du rayon local), et ce à différentes abscisses curvilignes de l'axe en essayant de rester, quand cela était possible, sur une même génératrice. À chaque mesure à l'intérieur correspond également une mesure extérieure de surface.

Enfin, une étude de l'influence de l'exposition a été mise en place (figure 3.3c). Pour cela, des zones que rien ne différençait sauf l'exposition ont été instrumentées.

Un schéma des trois types de situations étudiées est proposé dans la figure 3.3. Également, un descriptif exhaustif du positionnement des sondes est proposé dans le tableau 3.1. Dans chacune des situations, un trou réalisé à la perceuse, de diamètre très similaire à la sonde a été percé perpendiculairement à la direction longitudinale de l'axe pour y insérer la sonde. Cette disposition n'est pas la plus optimale, car elle perturbe légèrement le flux [Herrington (1969)], mais elle nous a permis de contrôler avec précision la profondeur des sondes.

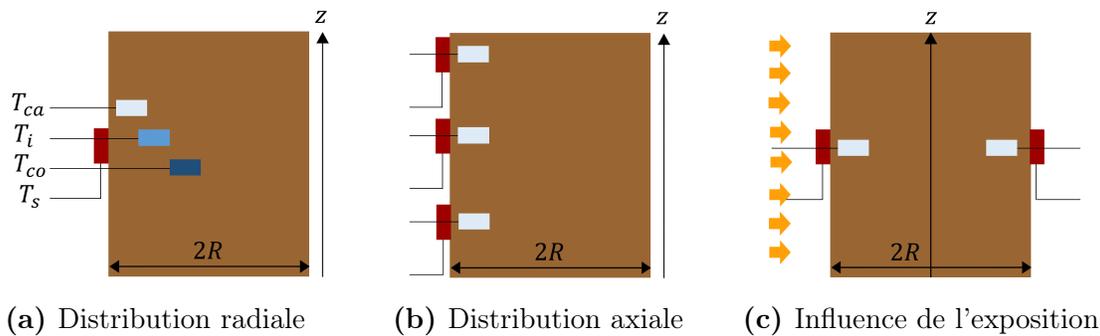


FIGURE 3.3 – Positionnement des points de mesure de température dans les branches (et troncs). Schéma des types de distributions mesurées. Le capteur en rouge est fixé à l'extérieur de la branche, sur la surface du secteur étudié. Les capteurs en bleu sont à l'intérieur de la branche. Chaque couleur correspond à une profondeur de mesure : du clair au foncé, cambium, intermédiaire et cœur. (a) : étude du gradient radial, (b) : étude du gradient longitudinal, (c) : influence de l'exposition au rayonnement solaire.

La campagne de mesure s'est déroulée du mois d'octobre 2021 à octobre 2022, à raison d'une mesure toute les 30 minutes. Cette fréquence d'acquisition est suffisante au regard des vitesses de variations de température et permet d'assurer une bonne autonomie des dispositifs. Trois secteurs ont été instrumentés : (i) le tronc du noyer, (ii) une branche du noyer et (iii) une branche du cèdre. Le tronc du noyer a été choisi, car il a un diamètre similaire à la branche du cèdre, ce qui permet de nous affranchir des effets d'échelle lors d'éventuelles comparaisons. Afin d'avoir une unicité du nom des capteurs, nous proposons ici la notation suivante : chaque capteur est nommé par trois lettres suivies d'un ou deux numéros. La première lettre correspond à l'essence étudiée : noyer (N) ou cèdre (C). La deuxième correspond à la nature de l'axe instrumenté : Tronc (T) ou Branche (B). La troisième caractérise l'exposition du secteur concerné : Exposé (E) ou Non exposé (N). Enfin, le numéro caractérise la profondeur p de la mesure : 0 pour la surface, 1 pour le cambium, 2 pour la mesure intermédiaire et 3

pour la mesure au cœur. Dans le cas où des distributions longitudinales sont étudiées, il y a un deuxième chiffre qui correspond à l'abscisse curviligne s de la section mesurée. Dans la figure 3.4, un exemple de dispositif est représenté.

Au cours des expérimentations, les aléas techniques de la mesure *in situ* nous ont privé de certains points de mesures. La seule situation pour laquelle l'ensemble des dispositifs a fourni une mesure pendant la durée totale de l'expérimentation est celle du tronc du noyer. Nous la considérerons dans l'analyse comme la situation de référence. Les deux autres situations seront traitées comme des situations annexes, permettant d'affiner et de compléter les résultats observés sur la situation de référence. Un bref descriptif de chaque situation est proposé ci-dessous.

Situation de référence : tronc noyer

Le tronc du noyer présente un diamètre de 30 cm (pour une épaisseur d'écorce $e = 1,5$ cm) au niveau de la section étudiée. Deux secteurs ont été instrumentés, le premier, plein sud, étant exposé au rayonnement, l'autre, plein nord, non. Pour chacun des secteurs, la distribution radiale de température a été enregistrée.

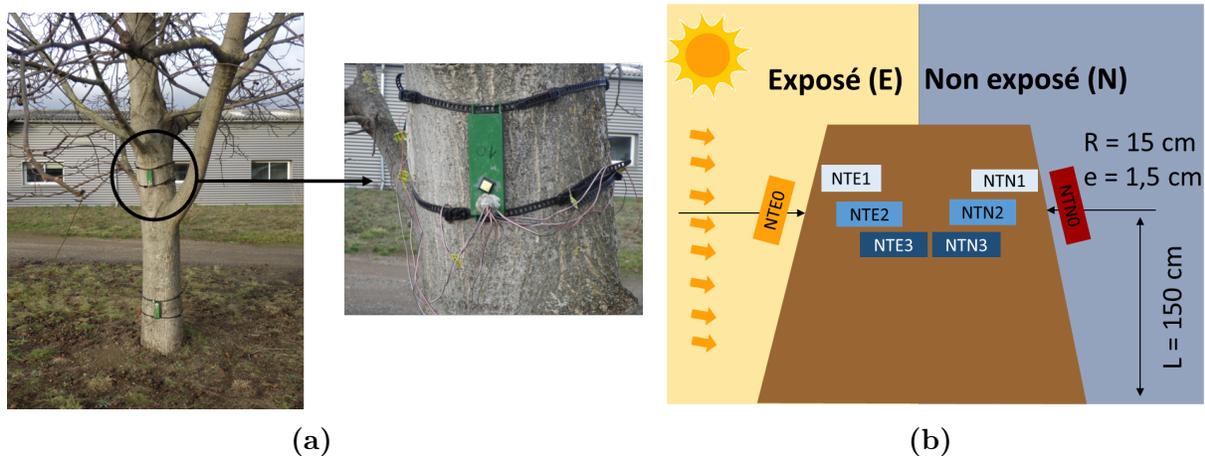


FIGURE 3.4 – Mesure de température. Le dispositif de mesure au niveau du tronc du noyer *Juglans regia*. a) Photos du dispositif réel. b) Schéma des positions des points de mesures.

Situation complémentaire n°1 : branche de noyer

La branche de noyer étudiée présente un diamètre de 16 cm au niveau de la première zone de mesure (qui est la zone correspondant à la fin du bourrelet d'insertion de la branche), soit à peu près la moitié des dimensions du tronc. Le dispositif de mesure peut se scinder en différentes parties. Une première partie similaire à celle du tronc : une mesure des distributions radiales sous différentes expositions. Cependant, à la différence du tronc, il n'y a pas

de capteurs en surface sur le secteur exposé (aléas de la mesure *in situ*). La deuxième partie du dispositif consiste en l'étude de la distribution longitudinale sous la branche (zone non exposée), à une profondeur intermédiaire. Cela correspond à 6 points de mesures pour trois zones étudiées (à chaque fois, il y a un capteur en surface associé au capteur en profondeur). Au total, le dispositif de mesure sur les branches compte donc 13 sondes. Une représentation de la branche est proposée dans la figure 3.5a.

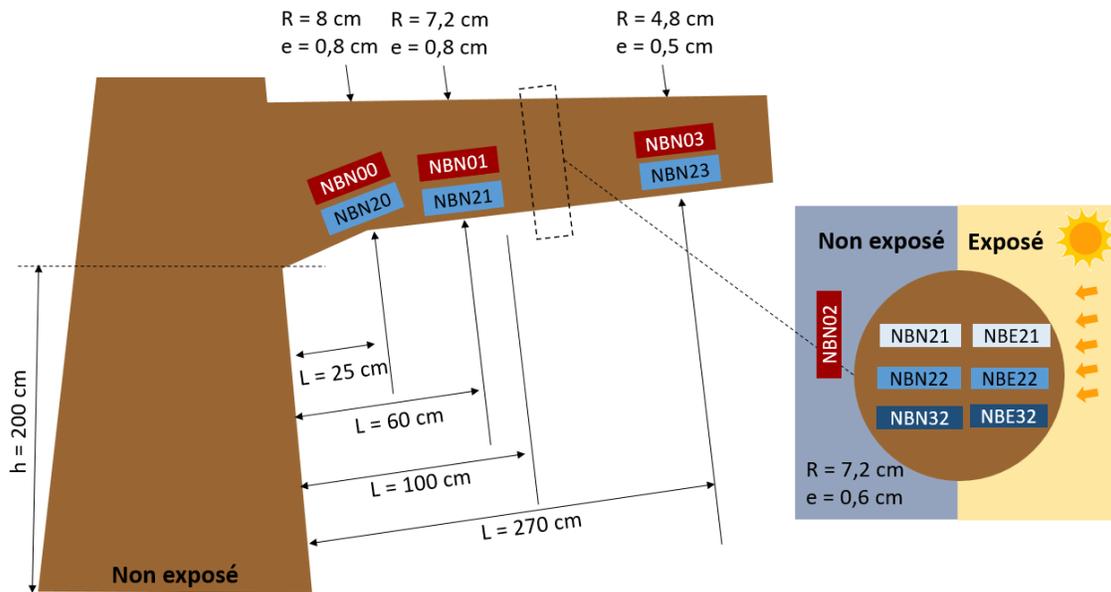
Situation complémentaire n°2 : branche de cèdre

La branche de cèdre présente un diamètre de 25,4 cm au niveau de la première zone de mesure, ce qui est du même ordre de grandeur que le diamètre du tronc du noyer. Sur cette branche, deux distributions radiales ont été enregistrées ; l'une sur un secteur exposé et l'autre non. Cependant, contrairement aux dispositifs pour le noyer, les deux mesures sont à des abscisses curvilignes différentes. Potentiellement, deux distributions axiales sont mesurées, aux profondeurs 1 et 2. Sur l'abscisse curviligne correspondant à $z = 2$, il n'y a pas de capteur de surface. Un récapitulatif de l'ensemble des capteurs ainsi que leur position radiale est proposé dans le tableau 3.1.

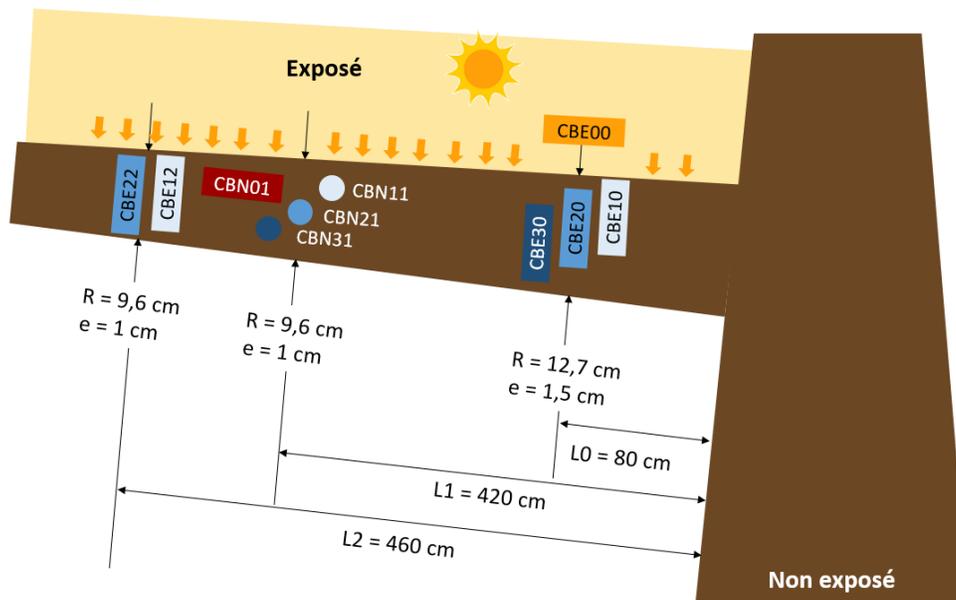
TABLEAU 3.1 – Récapitulatif de l'ensemble des capteurs utilisés pour la campagne de mesure de température

		Gradient radial + exposition					
Tronc noyer		NTE1	NTN1	NTE2	NTN2	NTE3	NTN3
	L_p (cm)	2,5	2,5	6,5	6,5	11,5	11,5
	f_p (%)	7	7	35	35	70	70
Branche noyer		NBN21	NBE21	NBN22	NBE22	NBN32	NBE32
	L_p (cm)	2	2	3,5	3,5	5,5	5,5
	f_p (%)	7	7	45	45	75	75
Branche cèdre		CBE10	CBE20	CBE30	CBN11	CBN21	CBN31
	L_p (cm)	2,5	5	9	1,8	5	6,5
	f_p (%)	9	30	67	9	35	64
		Gradient longitudinal					
Branche noyer		NBN20	NBN21	NBN23			
	L_p (cm)	5,8	5,8	3,5			
	f_p (%)	70	80	70			
Branche cèdre		CBE10	CBE20	CBE12	CBE22		
	L_p (cm)	2,5	5	1,5	4		
	f_p (%)	9	30	6	35		

L_p (cm) : profondeur de chaque sonde ; f_p : fraction du rayon local (écorce exclue) correspondante.



(a) Branche de noyer



(b) Branche de cèdre

FIGURE 3.5 – Mesure de température. Schéma de position des points de mesure. (a) Sur la branche de noyer, distribution longitudinale le long de l'axe. Puis distribution radiale sous plusieurs expositions. (b) Sur la branche de cèdre, distribution radiale sous différentes expositions au rayonnement solaire, et distribution radiale (en deux points seulement).

3.3 Préambule théorique

Avant toute description et analyse des résultats, il est important de comprendre et de discuter des différents phénomènes pouvant affecter la température d'un axe. Sa dynamique est le fruit de l'interaction entre des flux surfaciques (entrants et sortants), associée à une diffusion interne, et un éventuel flux convectif (transport longitudinal de sève). Ainsi la variation de température $\partial T/\partial t$ s'exprime par un bilan volumique d'énergie interne (eq. 3.1a), couplé à la conservation des flux d'échange en surface (eq. 3.1b), dont la formulation simplifiée peut s'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{D} - \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T \\ \left(\vec{k} \vec{\nabla} T \right) \vec{n} = R_n + \phi \end{array} \right. \quad (3.1a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\vec{k} \vec{\nabla} T \right) \vec{n} = R_n + \phi \end{array} \right. \quad (3.1b)$$

avec ρ la masse volumique (kg.m^{-3}), C_p la capacité thermique du bois vert à pression constante ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), \vec{k} un coefficient de diffusion thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), \vec{D} le flux de chaleur entre la surface de l'organe et les tissus internes ou entre tissus (W.m^{-2}), \vec{V} un flux externe ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), et \vec{n} la normale sortante à la surface de la branche. Ce bilan fait intervenir :

1. L'interaction avec les éléments extérieurs : R_n représente les échanges d'énergie radiative de la branche avec son environnement. Dans notre cas, ils peuvent prendre la forme de rayonnement direct (soleil), diffus (air ambiant) ou infrarouge (émis par l'organe). Les deux premiers sont généralement des termes « sources », amenant de la chaleur à l'axe, tandis que le dernier est un terme « puits », source de refroidissement. ϕ représente l'échange d'énergie convective (en général un terme puits), lié au mouvement de masse d'air à proximité de la surface. Bien que non formalisée, c'est l'influence de cet effet qui est débattue dans la littérature (cf. section 3.1.2). Il sera négligé dans cette étude (les arbres étant dans des zones peu ventées).
2. Le transport de l'énergie dans l'axe : celui-ci est le fruit de l'interaction entre un terme diffusif $-\vec{\nabla} \cdot \vec{D}$ dont la nature dépend des propriétés physiques de l'axe, et d'un terme convectif $-\vec{V} \cdot \vec{\nabla} T$ qui représente l'effet refroidissant (ou réchauffant) des mouvements de sève.

Dans notre cas, la diffusion thermique suit une loi de Fourier : $\vec{D} = \vec{k} \vec{\nabla} T$. Par soucis de simplification, les axes sont assimilés à des rectangle 2D (repère (RL)). Les équations s'écrivent alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_l \frac{\partial T}{\partial l} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} \right] \end{array} \right. \quad (3.2a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = R_n \end{array} \right. \quad (3.2b)$$

avec v_r et v_l les vitesses de la sève dans les directions radiale et longitudinale. Une des manières simples de comprendre la pondération de chaque terme dans les équations consiste

à utiliser des variables adimensionnelles . L'équation 3.2a devient alors :

$$\frac{1}{\tau} \frac{\partial T^*}{\partial t^*} = - \left[\frac{v_r}{R} + \frac{v_l}{L} \right] \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{1}{R^2} + \frac{1}{L^2} \right] \frac{\partial^2 T^*}{\partial t^{*2}}$$

avec R le rayon de l'axe considéré, et L sa longueur. En posant respectivement τ_{conv}^r , τ_{conv}^l , τ_{diff}^r , τ_{diff}^l les temps caractéristiques associés aux phénomènes de convection radiale, longitudinale et diffusion radiale, longitudinale, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T}{\tau} \frac{\partial T^*}{\partial t^*} = - \left[\frac{1}{\tau_{conv}^r} + \frac{1}{\tau_{conv}^l} \right] T \frac{\partial T^*}{\partial t^*} + \left[\frac{1}{\tau_{diff}^r} + \frac{1}{\tau_{diff}^l} \right] T \frac{\partial^2 T^*}{\partial t^{*2}} \\ \tau_{conv}^r = \frac{R}{v_r}, \quad \tau_{conv}^l = \frac{L}{v_l}, \quad \tau_{diff}^r = \frac{\rho C_p R^2}{k}, \quad \tau_{diff}^l = \frac{\rho C_p L^2}{k} \end{array} \right.$$

Pour estimer les temps caractéristiques, le comportement de la sève (densité et conductivité thermique) a été assimilé à celui de l'eau. Pour les propriétés thermiques du bois vert, Cavus et al. (2020) ont mesuré les conductivités de bois sec de plus de trente espèces ; avec parmi elles *Juglans regia* : $k = 0,134 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, et *Cedrus libani* : $k = 0,127 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. La valeur moyenne $k_0 = 0,13 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ a été retenue. Cette valeur est indicative pour du bois sec. Pour obtenir son équivalent k_v pour du bois vert, nous avons utilisé la formulation proposée par Scholz et al. (2002) :

$$k_v = k_{eau} \frac{\rho}{\rho_{eau}} + k_0 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{eau}} \right)$$

avec ρ la densité moyenne du bois vert, k_{eau} la conductivité thermique de l'eau.

En prenant $\rho \approx 700 \text{ kg.m}^{-3}$, on obtient un ordre de grandeur de la conductivité thermique : $k_v = 0,43 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (proche de celle de l'eau : $k_{eau} = 0,556 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$). Pour une profondeur $R = 5 \text{ cm}$ et une longueur de diffusion $L = 1 \text{ m}$, on obtient un ordre de grandeur des temps caractéristiques de diffusion :

$$\tau_{diff}^r \approx 7 \text{ heures}, \quad \tau_{diff}^l \approx 2700 \text{ heures}$$

Ces considérations permettent de négliger le terme de diffusion longitudinale. Pour l'estimation des facteurs de convection, il est difficile de trouver dans la littérature des ordres de grandeurs de la vitesse de la sève dans le sens radial. Cependant, le réseau hydraulique est principalement structuré pour transporter la sève des racines vers les feuilles et donc dans la direction longitudinale des axes. On peut donc aisément ici supposer que les flux radiaux sont négligeables devant le flux axial.

À la lumière de ces considérations, nous considérerons donc que la température est le résultat d'une interaction entre de la diffusion radiale de type Fourier (qui dépend majoritairement de la taille de l'axe), de la convection axiale interne (dépendante du flux de sève) ainsi que des flux radiatifs de surface. Ce comportement thermique est résumé dans le système d'équations

3.3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - v_l \frac{\partial T}{\partial l} \\ k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_R = R_n \end{array} \right. \quad (3.3a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - v_l \frac{\partial T}{\partial l} \\ k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_R = R_n \end{array} \right. \quad (3.3b)$$

Dans la partie suivante, nous allons donc étudier comment s'articulent ces différents termes, et s'il existe des configurations où la température peut monter suffisamment haut pour induire les changements de comportement mécanique.

3.4 Résultats et discussions

3.4.1 Situation de référence

Observations préliminaires

Un exemple de variation typique de température est proposé dans la figure 3.6. Comme reporté dans la littérature, on y distingue des cycles journaliers : la distribution temporelle de la température suit la course du soleil (effet radiatif), tandis que la distribution spatiale est pilotée par la diffusion thermique, marquée par un décalage temporel et une diminution des maximums. Dans notre étude, nous nous intéressons aux températures maximales atteintes

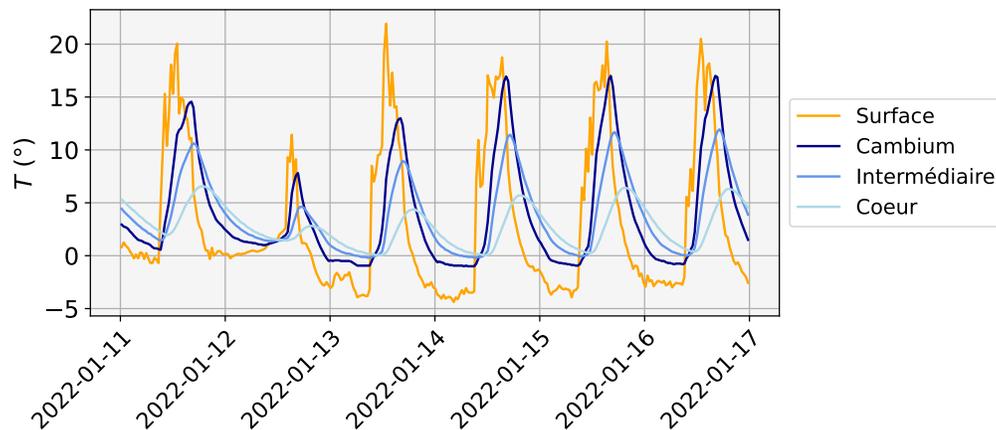


FIGURE 3.6 – Tronc de *Juglans regia* : exemple de variations de température sur le secteur exposé à la radiation solaire (1 semaine d'enregistrement).

chaque jour, sans tenir compte de la dynamique de diffusion. C'est une approche qui diffère des études précédentes [Reynolds (1939); Herrington (1969)], dont l'intérêt est souvent porté sur les déphasages/changement d'amplitude relative des signaux. L'avantage de se concentrer seulement sur les maximums locaux est de pouvoir avoir une vision globale à l'échelle de

l'année. L'inconvénient est d'être plus sensible aux hétérogénéités, et de ne pas représenter le comportement moyen dans sa totalité. Mais comme la problématique qui nous intéresse est celle des températures maximales, cette approche est pertinente. La figure 3.7 est une représentation des maximums locaux journaliers à l'intérieur du tronc enregistrés pendant 1 an en fonction des maximums locaux en surface, pour chaque exposition.

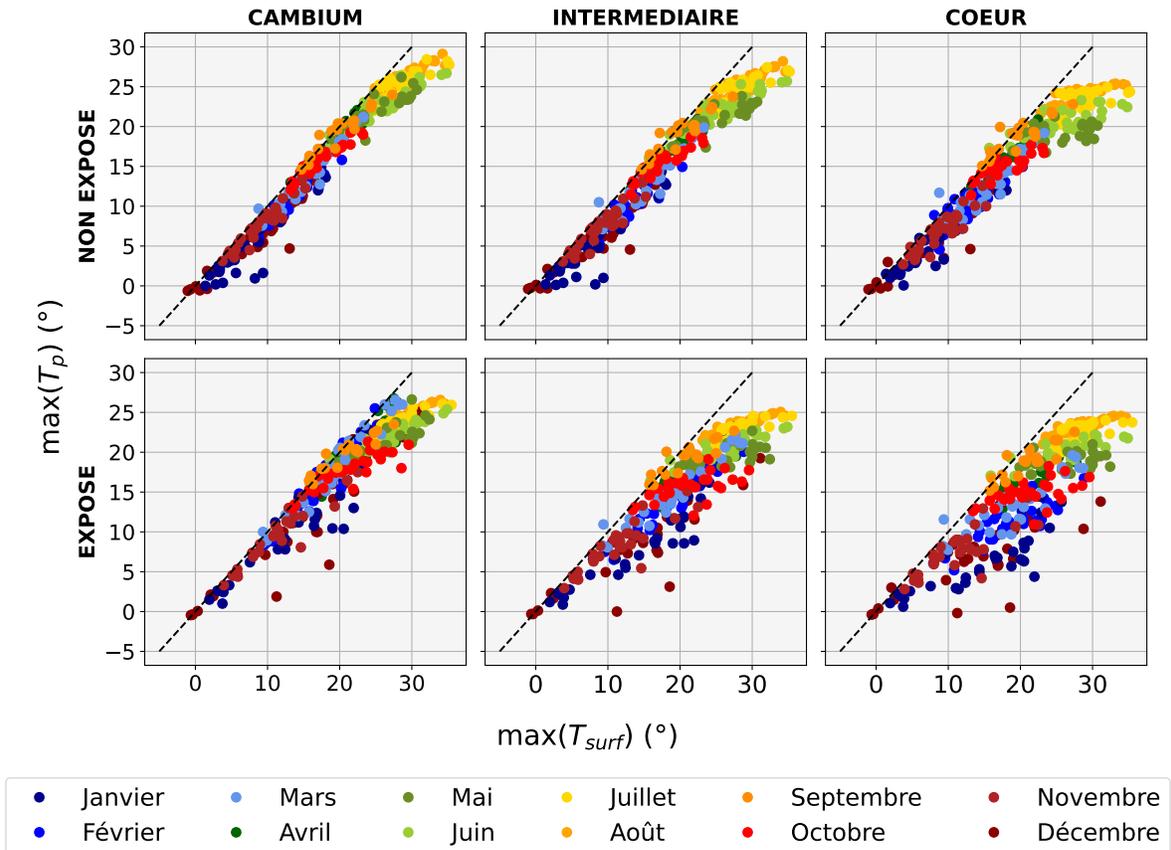


FIGURE 3.7 – Tronc de *Juglans regia* : maximums locaux journaliers à différentes profondeurs en fonction des maximums en surface et de l'exposition au rayonnement solaire direct (enregistrement sur un an). La ligne en pointillés représente la bissectrice du repère. En dessous, les températures dans l'arbre sont inférieures aux températures de surfaces ; au dessus, elles sont supérieures.

Ce type de représentation permet de commencer à appréhender le rôle de chaque effet sur la dynamique de température :

- La diffusion radiale : qui n'est pas assez rapide ($\tau_{diff} \approx 48$ heures) pour homogénéiser les températures de surface. Elle explique que les maximums observés dans le tronc sont systématiquement inférieurs à ceux en surface (l'ensemble des données est sous la bissectrice du repère, en pointillé sur la figure 3.7).

- Le flux convectif axial : dont l'action peut être mise en évidence par l'augmentation de la différence entre les maximums en surface et ceux dans le tronc lors des mois d'activités physiologique et donc de forte évapo-transpiration (avril-septembre dans la situation étudiée). Les études sur les flux de sève ont mis en évidence que ceux-ci étaient beaucoup plus importants durant cette période : l'étude de Lyu et al. (2020) sur *Robinia pseudoacacia*, *Platyclusus orientalis* et *Quercus liaotungensis* a montré que le flux de sève sur les périodes de repos valait entre 14% et 35% du flux de sève en activité. Sur des arbres à feuillage permanent (*Myrica faya*, *Laurus azorica*), ce rapport est situé entre 30 et 40% [Jiménez et al. (1996); Jiménez et al. (1999)]. Finalement, ce ratio a été mesuré en dessous de 20 % chez l'acajou *Cedrela odorata* [Kunert et al. (2010)]. Le refroidissement observé pourrait donc être expliqué par un flux convectif plus important, et irait dans le sens des observations faites dans la littérature. Par ailleurs, un plateau ($\approx 25^\circ$) s'observe avec la profondeur, conséquence du couplage de ce refroidissement axial et de la diffusion radiale.
- Le rayonnement : celui-ci induit une dissymétrie entre les faces exposée et non exposée. Celle-ci est particulièrement visible en hiver, avec une température de surface plus importante sur la face exposée (voir par exemple le mois de mars pour la zone cambiale). Fait intéressant, les différences de températures à l'intérieur du secteur exposé semblent augmenter et sont plus dispersées en hiver. Cela pourrait s'expliquer par un couplage des effets radiatifs et diffusifs (le temps caractéristique du rayonnement serait alors plus faible que celui de la diffusion, qui n'aurait pas le temps d'homogénéiser les températures.), et/ou par un effet refroidissant venant du côté non exposé.

Les températures de surfaces ne montent pas au-dessus de 35° et celles au niveau du cambium ne dépassent pas les 30° . Enfin, celles au cœur du tronc n'excèdent pas les 25° . La situation est donc loin d'aboutir à des températures critiques en termes de conséquences sur le comportement mécanique du bois.

Une approche qui permet de mettre en évidence l'ensemble des phénomènes, et en particulier l'importance du flux convectif, est de raisonner en « différence d'exposition » ΔT_p^{EXP} :

$$\forall p \in [0, 3], \quad \Delta T_p^{EXP} = T_p^E - T_p^N \quad (3.4)$$

Avec T_p^E la température à la profondeur p du secteur exposé, T_p^N la température à la profondeur p du secteur non exposé. Ces indicateurs sont représentés dans la figure 3.8. Cette représentation permet de compléter les propos sur le rôle et la dynamique des différents effets :

- L'effet du rayonnement direct, qui explique les fortes différences de température entre la surface exposée et celle non exposée, n'est pas homogène toute l'année. Très important sur la période octobre-mars (avec une différence pouvant avoisiner les 20°), il devient quasiment inexistant sur la période d'activité (différence de quelques degrés). Cette variation temporelle s'explique par la présence du feuillage, qui vient filtrer ce

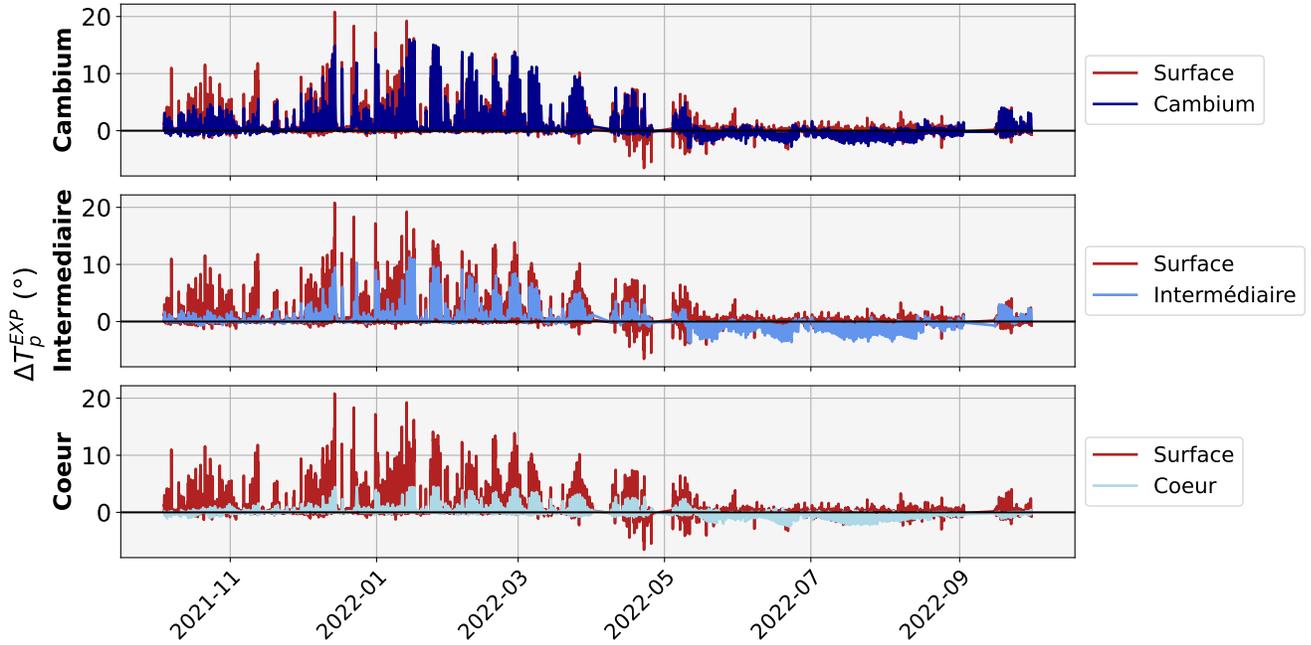
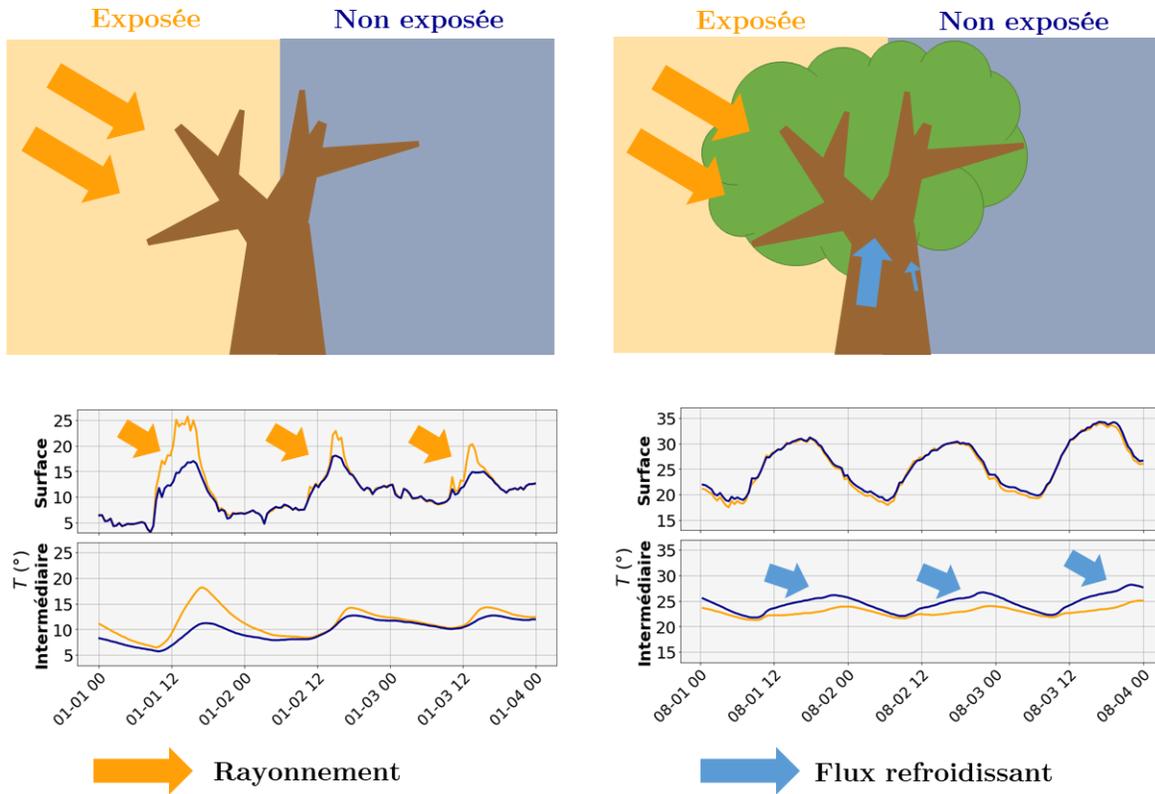


FIGURE 3.8 – Tronc de *Juglans regia*. Analyse par « différence d'exposition » : représentation des différences de température entre les faces exposée et non exposée au rayonnement solaire direct, pour différentes profondeurs.

rayonnement. Durant cette période, les effets en surface sont alors réduits à du rayonnement diffus (éventuellement de la convection dans la couche limite en période ventée, non étudiée ici).

- La période d'activité végétative se marque par une inversion nette de la différence des températures à l'intérieur du tronc. En période de repos, les principaux moteurs de la dynamique thermique sont le rayonnement direct associé à de la diffusion interne radiale. Les températures dans la branche suivent la dissymétrie induite par la course du soleil, et s'atténuent dans la profondeur par diffusion. En revanche, en été, les températures du secteur non exposé deviennent plus chaudes. Cette inversion traduit la présence d'un autre effet, primordial dans cette période-là : la convection axiale. Au-delà de montrer la présence de ce flux refroidissant, les résultats pourraient soutenir l'hypothèse d'une compartimentation du système hydraulique : en été, la face exposée de l'arbre aurait une activité de transpiration plus importante, induisant un flux plus fort, refroidissant d'avantage le secteur exposé. Si le lien entre l'évapotranspiration et le flux de sève est connu [Wang et al. (2022)], celui d'une compartimentation du système hydraulique ne fait aucune mention dans la littérature. En ce sens, les résultats ouvrent de perspectives intéressantes.

Un schéma de l'interaction des différents effets et de leurs conséquences sur la dynamique de la température est proposé dans la figure 3.9.



(a) Arbre au repos

(b) Arbre en activité

FIGURE 3.9 – Tronc de *Juglans regia*. En orange, les profils de température sur le secteur exposé. En bleu, sur le secteur non exposé. Pendant la période de repos végétatif (automne, hiver), le rayonnement direct induit une dissymétrie dans les profils de température entre ces deux secteurs. Cette dissymétrie se retrouve par diffusion dans le coeur du tronc. En été, la présence du feuillage bloque le rayonnement direct : les surfaces sont alors soumises à du rayonnement diffus, et la dissymétrie disparaît. En revanche, les profils s'inversent dans le coeur du tronc, suggérant un refroidissement plus important du secteur exposé. Cela suggère une compartimentation du secteur hydraulique.

Enfin, afin de quantifier les effets mis en évidence ci-dessus une approche « par zones radiales » est proposée (de la plus externe au coeur). Elle consiste, pour chacun des quatre points de mesure, à analyser la différence de température entre deux points consécutifs :

$$\Delta T = \max(T_{p+1}) - \max(T_p) \quad (3.5)$$

Pour chaque mois, la distribution de la différence de ces maximums journaliers est représentée (Figure 3.10). Les observations précédentes nous ont permis de mettre en évidence la période de repos végétatif (fond gris) et celle d'activité végétative (fond vert). Chaque zone radiale

représente une épaisseur entre 2.5 cm (première zone radiale) et 4 cm (deux zones suivantes).

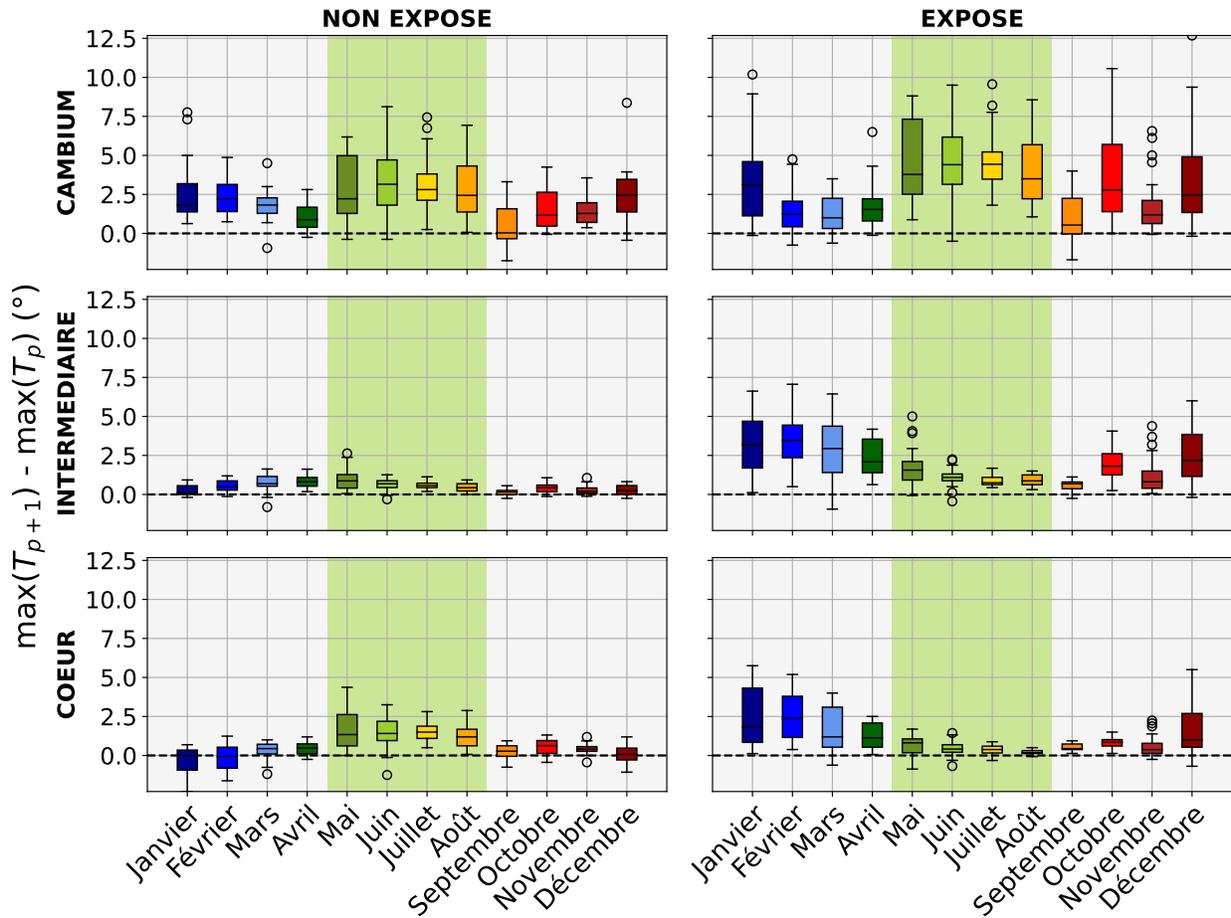


FIGURE 3.10 – Tronc de *Juglans regia*. Approche par « zones radiales ». Représentation des différences de températures entre deux profondeurs successives, pour différentes expositions au rayonnement solaire direct. La période d'activité végétative identifiée précédemment est mise en évidence par la couleur verte.

Analyse

- Secteur exposé au rayonnement solaire : sur les mois de décembre à mars (repos végétatif), le couplage rayonnement direct/ diffusion interne donne de fortes atténuations de la température, en particulier dans les deux couches internes : la perte représente entre 0,6 et 0,8 degré par cm. Le temps caractéristique estimé (48 heures) est suffisamment important pour que la diffusion ne puisse homogénéiser la température dans la direction radiale. L'effet est moins important sur la face non-exposée où la température

de surface varie moins grâce à l'absence de rayonnement. Dans le cas d'un axe plus petit, l'effet serait probablement moins visible (le temps caractéristique variant avec le carré de la longueur caractéristique de la section).

En revanche, durant la période d'activité végétative (au centre, en vert), les différences deviennent très faibles (entre 0 et 1,5°) une fois la première zone radiale franchie (sous écorce). Dans cette première zone radiale, les différences deviennent importantes (entre 4 et 5° en moyenne, avec des pertes pouvant aller jusqu'à 9°). Ces chutes, avoisinant les 2°/cm en moyenne, mettent en évidence l'action de la convection axiale. A ce moment de l'année, la dynamique de température est donc le fruit d'une compétition entre de la diffusion interne, qui a tendance à réchauffer le tronc, et de la convection axiale, qui le refroidit grâce à l'apport d'eau fraîche puisée dans le sol. La convection semble être le phénomène dominant dans une zone située entre le duramen et le cambium et tend à faire baisser la température de la zone intermédiaire (voir figure 3.7). Avec ce flux dominant en périphérie, le cœur de la branche n'est le siège que de diffusion entre deux zones refroidies par le flux de sève brute et n'est donc pas sujet à de fortes différences de température. La zone cambiale est localisée à la limite entre une zone refroidie par la sève (l'aubier) et une zone réchauffée par la surface (l'écorce), elle présente donc un gradient de température important. Un schéma de l'action conjuguée de ces différents phénomènes, ainsi que les profils de température correspondants, est proposé dans la figure 3.11.

Dans la littérature, les mesures de la distribution radiale du flux de sève vont dans ce sens : sur un tronc de *Caragana korshinskii* de 8 cm de diamètre, Ford et al. (2004) a montré que pendant les jours d'ensoleillement (en période d'activité) le débit de sève était diminué par 4 sur les deux premiers centimètres. Toujours dans la même situation, Delzon et al. (2004) a montré que le flux dans un pin maritime *Pinus pinaster* Aiton. de 34 cm de diamètre diminuait de plus de 60% sur les cinq premiers centimètres !

- Secteur non exposé au rayonnement solaire : durant la période de repos végétatif, l'absence de rayonnement direct permet de découpler les effets radiatifs des effets de diffusion. Les différences de température de surface observées pourraient alors être imputées à la diffusion de la température en surface (du secteur non exposé) seule. Mais en réalité, on s'aperçoit qu'il y a également une diffusion de température depuis le secteur exposé, avec des différences de température négatives sur les mois de janvier et février (le cœur du secteur non exposé est plus chaud que la zone intermédiaire). Cette compétition entre une diffusion « puits » des températures de surface et une diffusion « source » des température du secteur exposé rend difficile la distinction des phénomènes.

Durant la période d'activité végétative, on retrouve cette compétition entre la convection axiale, très présente sur la première couche (différence d'environ 1.5°/cm) et la diffusion interne, présentée dans la figure 3.11.

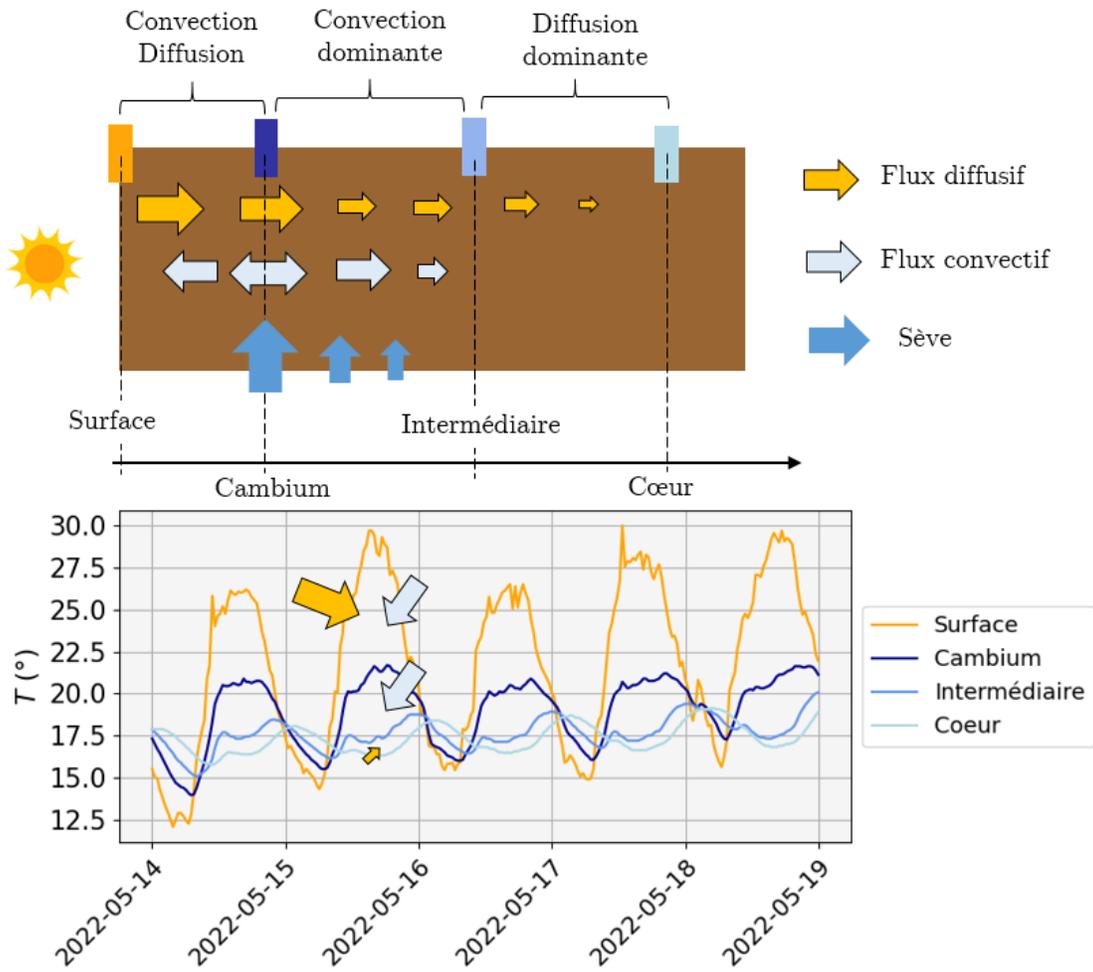


FIGURE 3.11 – Tronc de *Juglans regia*. Schéma de l'interaction des différents flux régissant la dynamique thermique durant la période d'activité. L'exemple est pris sur le secteur exposé au rayonnement solaire. Entre l'écorce et la zone cambiale, un fort gradient est présent, expliqué par l'action conjuguée de la convection axiale (montée de la sève brute, froide, puisée dans le sol par les racines) et la diffusion radiale du rayonnement en surface. La zone intermédiaire est dominée par un phénomène de convection refroidissant, qui s'atténue au fur et à mesure, pour laisser la place à la diffusion. Cette dernière s'effectuant entre deux zones refroidies par le flux de sève ascendant est faible : les différences de températures sont petites.

L'analyse a bien mis en évidence l'ensemble des phénomènes pouvant jouer un rôle dans la dynamique de la température. Ces phénomènes sont fortement couplés, et leur rôle est dépendant de l'exposition, la taille de l'axe et le moment de l'année. Dans notre cas, malgré une année 2022 particulièrement chaude, les températures en surfaces n'ont pas excédé les 35°, et **celles dans le tronc sont restées en dessous de 30°**. Également, les données n'ont pas permis de mettre en évidence des périodes d'arrêt de circulation du flux de sève

qui aurait stoppé le refroidissement axial.

Paradoxalement, nos données diffèrent des observations faites par Reynolds (1939). Ce dernier a observé que la température la plus stable était sous le cambium, alors que nous avons vu que l'écrêtage maximum était au cœur (figure 3.7). Pour lui, la dynamique thermique dans la zone cambiale est le résultat d'une compétition entre un réchauffement par l'extérieur et un refroidissement par le cœur. Les autres données de la littérature, bien que peu nombreuses, vont cependant dans notre sens. L'analyse des autres points de mesures sur les autres branches (appelés « Configurations complémentaires ») est effectuée pour compléter notre propos. Notamment, elle permet de statuer sur des effets d'échelle (primordiaux pour la diffusion) ou encore sur des variations inter-spécifiques de comportement.

3.4.2 Configurations complémentaires

Branche de noyer

La branche de noyer étudiée permet également une comparaison des situations exposée et non exposée au rayonnement solaire. Les résultats sont présentés dans la figure 3.12. Malheureusement, des soucis techniques ne nous ont pas permis de mesurer la température de surface du secteur non exposé (capteur non fonctionnel). Également, le mois de septembre est en grande partie manquant et n'est pas pris en compte dans l'analyse. Sur le côté non-exposé, des différences négatives sont observées sur les zones intermédiaire et cœur. Ces zones sont ici dominées par la diffusion depuis le côté exposé, qui est alors suffisamment rapide ($\tau_{diff} \approx 10$ heures) pour que les températures soient quasi homogènes. L'effet d'échelle est donc bien marqué. L'effet de la convection axiale est lisible dans les premiers centimètres, confirmant la distribution spatiale de ce flux, dominant dans la périphérie de l'axe.

Un des intérêts de cette nouvelle configuration est la mesure des températures à différentes abscisses curvilignes. Il est rappelé que chaque point de mesure est inséré à une même fraction du rayon local. Ce choix permet de mesurer les mêmes zones de fonctionnement, mais il introduit également un biais d'échelle important. Initialement, il était prévu de mesurer la distribution longitudinale de température sur des secteurs exposés et non exposés. Mais la température de surface étant manquante pour le secteur exposé, nous avons décidé de ne pas analyser ce dernier et de nous concentrer sur celui non exposé. Une approche par différence de température est à nouveau proposée. Pour chaque température mesurée, l'écart entre la température de surface et la température dans la branche est calculé. Une représentation de la moyenne des différences chaque mois et pour chaque abscisse est donnée dans la figure 3.13.

- Toute l'année, les différences de température semblent diminuer en fonction de l'augmentation de la distance à la base de la branche. Or, dans la zone à 2,50 m, la branche présente un rayon de 5 cm (contre 7 cm et 8 cm sur les deux autres sections), ce qui diminue le temps caractéristique de diffusion radiale de plus de 40%! Ceci montre l'importance de l'effet diffusif, et traduit les effets d'échelles décrits précédemment.

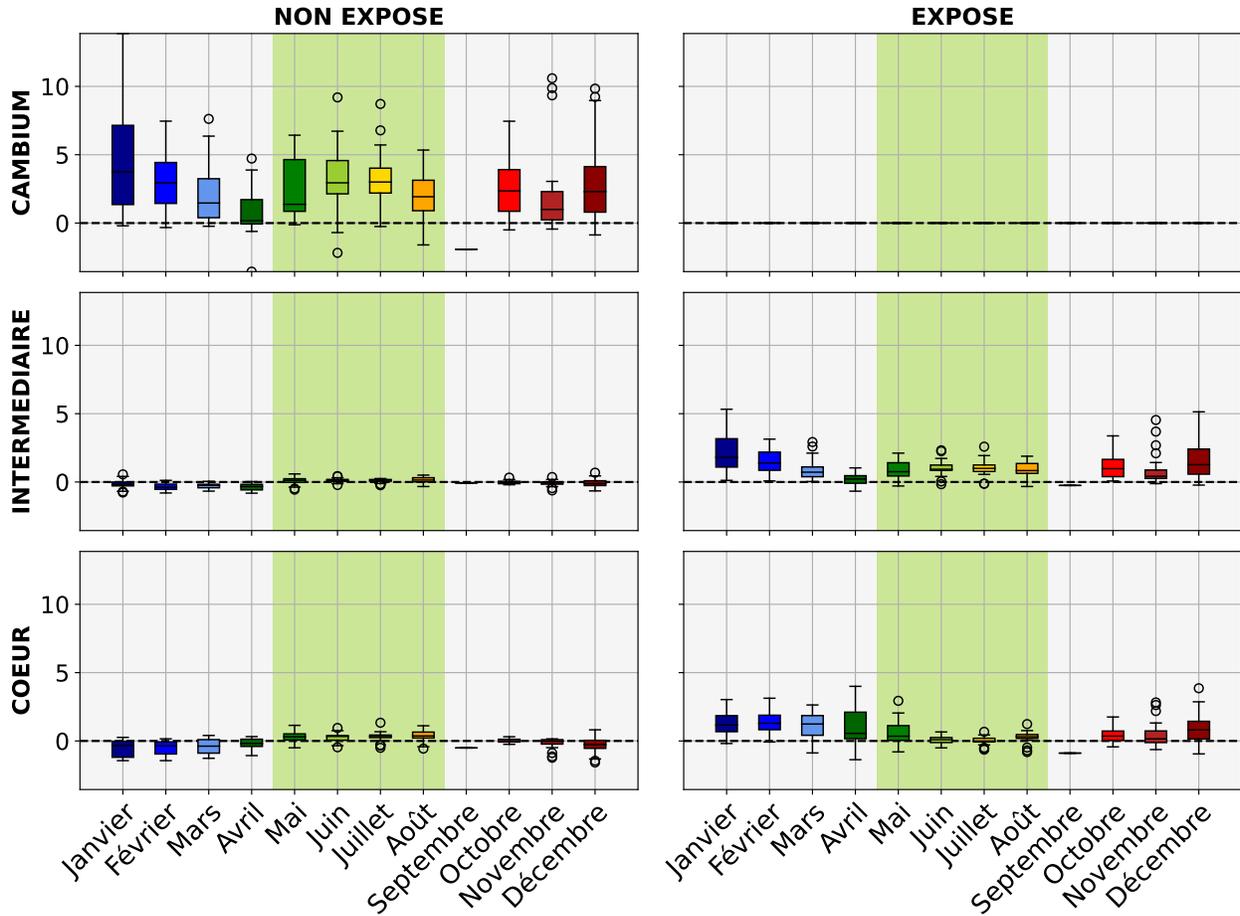


FIGURE 3.12 – Branche de *Juglans regia*. Approche « par zones radiales ». Représentation des différences de températures entre deux profondeurs successives, pour différentes expositions au rayonnement solaire direct. La période d'activité identifiée précédemment est mise en évidence (couleur verte).

- Il y a une claire distinction entre la période d'activité végétative (en vert sur la figure) et la période de repos végétatif, en particulier sur le comportement des deux derniers points de mesures (1m et 2m50). Ainsi tout au long de la période d'activité, il y a une différence de plus de 2° entre ces deux points, alors que pour la période de repos végétatif, cette différence ne dépasse pas les 0.5°. Durant la période d'activité, cette distribution peut s'expliquer par une diminution du refroidissant par la sève. Elle se comporterait alors comme un flux calogène, se réchauffant au fur et à mesure de son passage dans le bois. Cela signifie que le seul réchauffement de la sève peut expliquer plusieurs degrés de différence en moyenne le long d'un même axe. Cela rejoint certaines des observations faites dans la littérature [Gerlach (1929); Rouschal (1939); Herrington (1969)], et ouvre de perspectives de recherche intéressantes.

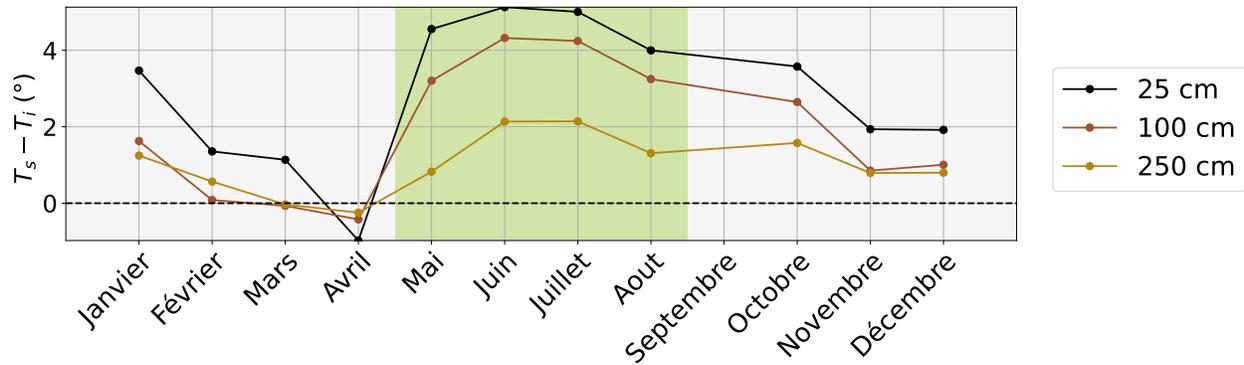


FIGURE 3.13 – Branche de *Juglans regia*. Gradient de température entre la surface et le coeur de la branche, pour différentes abscisses curvilignes (distance depuis l'insertion de la branche). Mise en évidence de l'effet longitudinal de la réponse thermique. En vert est représentée la période d'activité végétative. (enregistrement sur 1 an)

Dans ce type d'analyse, il est important de garder en mémoire que les différences mesurées sont des moyennes, et ne sont pas représentatives de la température absolue dans la branche. En effet, dans cette configuration, il y a également des effets de réchauffements locaux. Ainsi, même si la différence avec l'extérieur est de deux degrés entre deux extrémités de la branche, la température absolue peut présenter des différences bien plus importantes. Sur la figure 3.14 est représentée une semaine de mesure dans la période d'activité (août) et de repos végétatif (janvier). Sur la période d'activité, nous voyons que les pics de température présentent parfois plus de cinq degrés de différences, alors que les équivalents en moyennes ne sont différents que d'approximativement deux degrés. Pour la période de repos, l'approche par gradient nous donne une bonne idée de la dynamique d'évolution de la température..

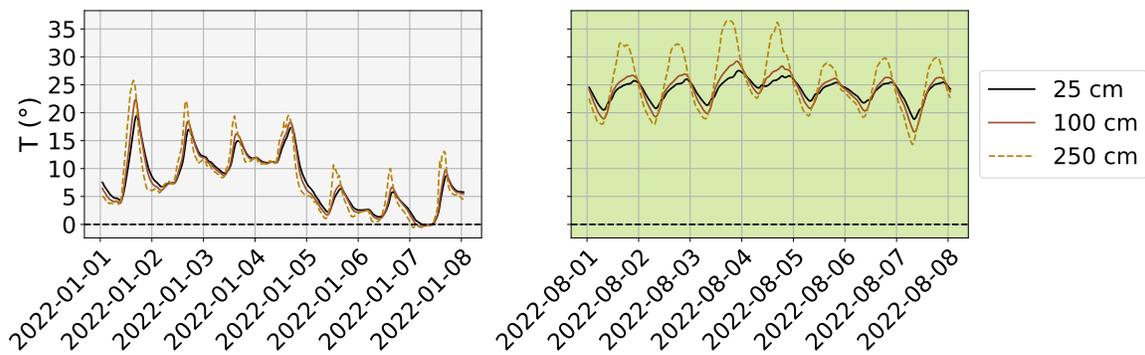


FIGURE 3.14 – Branche de *Juglans regia*. Exemple de variation longitudinale de température en fonction de l'abscisse curviligne (distance donnée depuis l'insertion de la branche). A gauche, pendant la période de repos végétatif. A droite pendant la période d'activité végétative. (enregistrement sur 8 jours)

Branche de cèdre

Dans le cas de la branche du cèdre, nous avons deux situations complètes, exposées et non exposées ; mais qui ne se situent pas aux mêmes abscisses curvilignes. Les comparer simultanément n'est donc pas pertinent. De plus, des soucis techniques (arrêt de l'enregistrement) nous ont empêchés d'avoir des mesures sur les mois de septembre et d'octobre 2022. Une représentation des maximums journaliers aux trois profondeurs en fonction de ceux en surface est proposée dans la figure 3.15. Les mêmes effets que ceux décrits pour le noyer sont retrouvés. Ces nouveaux points de mesure apportent cependant quelques informations complémentaires :

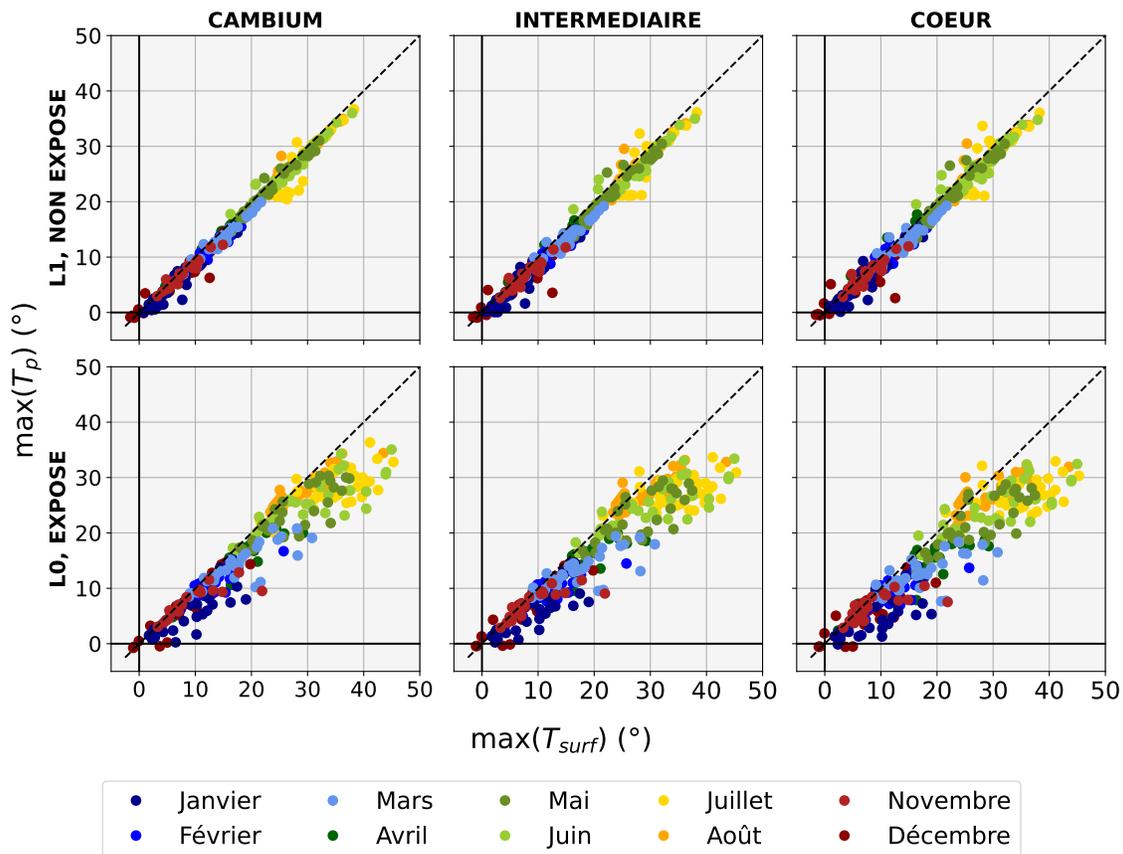


FIGURE 3.15 – Branche de *Cedrus atlantica* : maximums locaux journaliers à différentes profondeurs en fonction des maximums en surface. Zone non exposée au rayonnement solaire direct (en haut) et exposée (en bas) et (enregistrements sur 1 an). La ligne en pointillés représente la bissectrice du repère. En dessous, les températures dans l'arbre sont inférieures aux températures de surfaces ; au dessus, elles sont supérieures. $L0$ représente la longueur depuis l'insertion de la première zone de mesure ; $L1$ celle de la deuxième zone, toutes les deux représentées dans la figure 3.5b.

- Par rapport au noyer, une première observation évidente concerne la température de surface. Alors que pour le noyer, la température en surface de branche a rarement

dépassé les 35 degrés (maximum de 35,5°), celle du cèdre a très largement dépassé les 40 degrés, et ce, régulièrement, allant jusqu'à atteindre 45,3 degrés. Ceci s'explique très certainement par un flux radiatif direct sur la surface de la branche de cèdre, le feuillage produit par les aiguilles, plus éparées, ne permettant pas de filtrer l'ensemble du rayonnement direct. Cette différence de près de 10° n'est pas négligeable, et constitue un marqueur important de la dynamique thermique des arbres, qui pourrait expliquer les événements de ruptures estivales de cèdres souvent rapportés par les gestionnaires de parc.

- La diffusion thermique interne semble plus forte que chez le noyer, malgré une taille de branche importante. Ceci est confirmé par l'approche par couches radiales (figure 3.16). Dans le cas de la situation exposée, une fois la première couche radiale passée, il

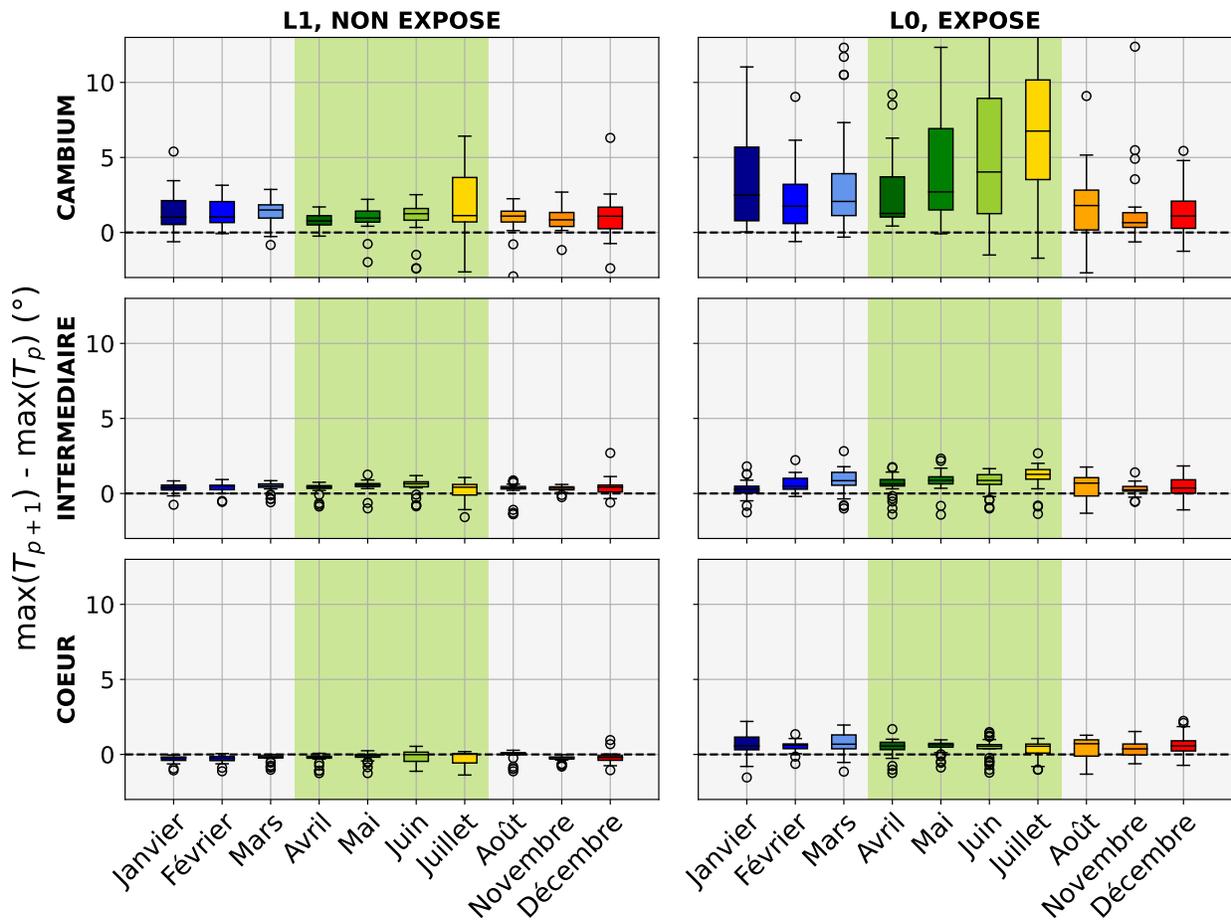


FIGURE 3.16 – Branche de *Cedrus atlantica*. Approche « par zones radiales ». Représentation des différences de températures entre deux profondeurs successives, pour différentes expositions au rayonnement solaire direct. La période d'activité végétative identifiée précédemment est mise en évidence par la couleur verte.

y a de très faibles différences de température. Sur les mois de janvier à mars, là où le noyer présentait une chute de 2 à 3° par couche radiale, le cèdre montre une diminution seulement entre 0.5 et 0.7°, et ce, pour des couches d'épaisseur à peu près similaires (tableau 3.1). Cette différence pourrait être due à une différence de conductivité thermique, même si les mesures sur des échantillons secs de cèdre *Cedrus libani* et de noyer *Juglans regia* ont montré une différence d'environ 5% seulement [Cavus et al. (2020)].

- Dans la situation non exposée, le rôle de la sève brute, marqueur, clé de la période d'activité végétative, est moins visible. Cela pourrait être expliqué par son réchauffement. Comme vu chez la branche de noyer, la sève pourrait se réchauffer le long de l'axe, perdant peu à peu de sa capacité à refroidir. La branche de cèdre étant un axe long (deuxième zone de mesure L1 espacée de la première L0 de plus de 3 mètres (figure 3.5b)) bénéficiant d'une forte exposition au rayonnement (couvert du feuillage peu filtrant), elle présente un profil idéal pour un réchauffement important de la sève. Une des conséquences directes est l'absence de plateau de régulation des hautes températures, comme on peut le voir de manière claire chez le noyer (figure 3.7) ou la situation exposée au rayonnement solaire du cèdre (figure 3.15). Une situation très intéressante aurait été une situation exposée en bout de branche. De ce que l'on a vu ci-dessus, c'est dans ces zones que la température est potentiellement la plus élevée. Une zone proche de la situation non exposée a été instrumentée, mais le capteur de surface n'a pas été fonctionnel toute l'année. Cependant, nous avons récupéré les données de température sous l'écorce. Les maximums journaliers sont représentés dans la figure 3.17. On y constate que la température peut régulièrement dépasser les 35 degrés, atteignant même un pic à 41,3 degrés en août !

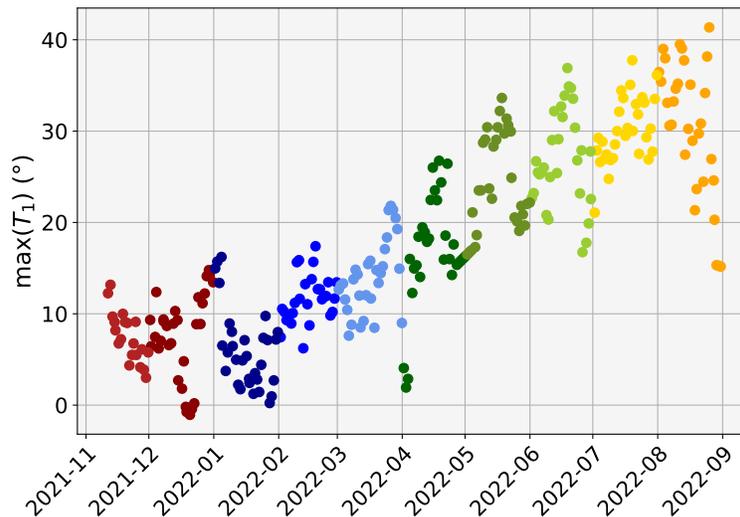


FIGURE 3.17 – Branche de *Cedrus atlantica*. Températures maximum atteintes chaque jour pour le capteur CBE22 (11 mois d'enregistrements avec quelques points manquants).

En comparaison avec le noyer, **la branche de cèdre présente des températures élevées (maximums proches des 40°)**. Cette différence est principalement due à une exposition plus forte au rayonnement solaire liée à la faible densité du feuillage, plus éparse. Même si on se situe loin des minimums requis, l'absence de régulation sur la situation non exposée suggère que cette température peut être sujette à augmentation. Encore une fois, aucun arrêt de circulation de sève n'a été mis en évidence.

3.5 Conclusion

L'ensemble du dispositif de mesures *in situ* de températures avait pour objectif de décrire et comprendre la dynamique de la température dans les troncs/branches. Également, le but de cette expérimentation était de statuer sur les températures maximales que pouvait atteindre le bois d'une branche en cas de chaleur extrême et éventuellement d'arrêt de circulation du flux de sève.

La distribution de température est le fruit d'une interaction entre un flux radiatif direct, piloté par la course du soleil, une diffusion interne qui dépend des dimensions de l'axe considéré, et un flux convectif axial par le transport d'eau fraîche captée par le système racinaire (dans la période d'activité végétative). Ce flux vient refroidir l'axe, et est en compétition avec la diffusion interne. Il dépend de la position radiale, avec un fort gradient de la périphérie vers le centre. Il semble que ce flux se réchauffe au fur et à mesure de son passage dans l'arbre, perdant de sa capacité à refroidir. Dans la branche de noyer, ce réchauffement peut expliquer une différence de plusieurs degrés (5° dans l'exemple 3.14).

Les données enregistrées sur une année ne nous ont pas permis d'identifier des périodes d'arrêt du flux de sève qui aurait pu conduire à des augmentations locales fortes de température dans le bois. Cependant, elles nous ont permis de voir que dans certaines situations, il n'est pas exclu que les températures locales excèdent des températures avoisinant les 50°-60°. Cette situation doit rassembler un certain nombre de critères. Tout d'abord, il faut que la structure présente une exposition au rayonnement direct durant la période estivale, surtout en fin de journée (accumulation de la chaleur). Également, la température du bois sera certainement la plus forte dans le secteur distal de la branche en raison du plus faible pouvoir de refroidissement par la sève brute qui s'est réchauffée tout au long de son trajet dans l'arbre. Enfin, des effets d'échelles et d'essences sont aussi importants. La branche idéale pour une chauffe maximale sera donc une petite branche (grande diffusion) proche de la cime (réchauffement de la sève), présentant une exposition importante au rayonnement. Ce n'est généralement pas le cas des branches qui cassent de manière inexplicable, qui sont plus des structures de bas et milieu de houppier (chapitre 2). Cependant, il est à noter que les gestionnaires de parcs et autres experts de l'arbre ne se soucient pas des casses de petites branches et ne rapportent que les événements rares de casse de grosses branches qui auraient pu causer des dégâts importants lors de leur chute. L'idée que seules les grosses branches cassent est donc probablement très biaisée.

Dans le cas du cèdre, qui présentait de bons critères pour une chauffe importante sur bois de

ses branches, il a été vu que la distribution de température ne présentait qu'une faible atténuation de la température de surface sur la partie distale de la branche. Lors de l'année 2022, la température a alors atteint plusieurs fois 40° dans la zone cambiale. Enfin, pour conclure, il faut souligner que si le bois de nos branches instrumentées n'ont pas atteint des niveaux de températures extrêmes, elles n'ont pas cassé non plus ! Au vues de ces observations, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse selon laquelle une chauffe locale de température pourrait amener à des changements de comportements mécaniques du bois vert. Sur les trois hypothèses émises en début de ce chapitre, nous nous intéresserons seulement à celle qui porte sur la contrainte longitudinale. En effet, le modèle biomécanique développé et décrit ultérieurement porte sur cette composante de la contrainte. Les deux autres hypothèses, qui portent sur les composantes transverses, seront posées comme perspectives d'étude.

Chapitre 4

Modélisation du champ de contraintes dans les sections de branches

Sommaire

4.1	Introduction	126
4.2	Cadre analytique et hypothèses	126
4.3	Modélisation de la section	127
4.3.1	Maillage temporel	127
4.3.2	Maillage spatial	129
4.4	Modèle numérique	131
4.5	Validation du modèle : solution semi-analytique	134
4.5.1	Calculs préliminaires	134
4.5.2	Développement analytique	135
4.5.3	Comparaison et validation du modèle numérique	138
4.6	Améliorations du modèle et perspectives	141
4.7	Conclusion	143

4.1 Introduction

La casse inexplicquée d'une branche se traduit dans un premier temps en termes mécaniques : en l'absence de vent, elle survient quand une branche ne peut plus supporter les contraintes liées à son propre poids. Or, comme cela a été décrit dans le chapitre 1, une branche développe lors de sa croissance des contraintes variées liées à la formation de son bois (contraintes de supports, contraintes de maturation). Contrairement à une poutre classique, ce bois est soumis un champ de contrainte auquel se rajoutera celui de la charge pondérale. Ainsi en préambule, il est important de comprendre comment les contraintes se mettent en place dans une branche, au fur et à mesure que cette dernière se développe. Cela permet par ailleurs une meilleure appréhension du dimensionnement des branches dans leur diversité. Dans ce cadre, un modèle de calcul des contraintes de croissance a été développé. Ce modèle est à l'échelle de la section, et ce chapitre résume la démarche de modélisation : établissement des hypothèses, création du maillage de la section, discrétisation des équations de comportement, et enfin validation à l'aide d'une solution analytique. Implémenté en Python [Van Rossum and Drake Jr (1995)], ce modèle est basé sur le travail de Fournier et al. (1994), et en propose quelques améliorations, notamment l'intégration des variations annuelles d'excentricités et de déformations de maturation (que l'on montrera par la suite primordiales dans le contrôle postural), ainsi que la prise en compte de l'action de l'écorce.

4.2 Cadre analytique et hypothèses

Tout d'abord, les grandes hypothèses de ce modèle sont énumérées :

- Le comportement du bois est supposé **élastique linéaire**. Comme expliqué dans le chapitre 1, seul le comportement dans le sens longitudinal (parallèle aux fibres) est considéré. De plus, les déformations étant très faibles devant les grandeurs caractéristiques étudiées, l'hypothèse des **petites déformations** est utilisée. Ceci permet de linéariser les équations d'état. En particulier, une loi de Hooke préchargée (par une contrainte de maturation $\sigma_0(x, t)$) est utilisée comme loi de comportement :

$$\sigma(x, t) = E(x, t)\epsilon(x, t) + \sigma_0(x, t) \quad (4.1)$$

avec σ la contrainte (MPa), ϵ la déformation, et E le module d'Young longitudinal du matériau.

- Les calculs peuvent être alors effectués sous les hypothèses de la **théorie des poutres**, dans le cadre général de la résistance des matériaux. Du point de vue géométrique, les branches présentent généralement des profils qui se prêtent bien à ce type de cadre analytique : une forme élancée, pas ou peu de variations brusques de diamètre. Les effets de forme dus aux rameaux et autres phénomènes biologiques locaux (cavité, nœuds, etc) ne sont pas abordés.

- **Le matériau n'est mécaniquement chargé qu'à partir du moment où il est créé.** À l'instant t , les contraintes subies par un élément de matière repéré par la position x sont la somme des contraintes de maturation intrinsèques $\sigma_0(x, t)$ et des contraintes extérieures appliquées sur cet élément depuis sa formation au temps t_x .

$$\sigma(x, t) = \sigma_0(x, t) + \int_{t_x}^t \frac{\partial \sigma(x, \tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (4.2)$$

- **Il y a unicité de la correspondance volume/temps.** À chaque volume correspond un temps unique. Les sections étant supposées circulaires, il y a alors unicité de la relation $R = f(t)$ où R représente le rayon de la section.
- **Le processus de maturation est instantané.** C'est un processus physico-chimique qui prend en réalité quelques semaines. Comparé à la durée de vie d'une cellule (au sens mécanique du terme, plusieurs dizaines d'années), ce phénomène est considéré ici comme instantané. Compte tenu de ce qui a été mentionné ci-dessus, l'équation 4.2 devient alors :

$$\sigma(x, R) = \sigma_0(x) + \int_{R_x}^R \frac{\partial \sigma(x, r)}{\partial r} dr \quad (4.3)$$

avec R_x le rayon de la section à l'instant t_x .

- **Les sollicitations en flexion horizontale et en torsion sont négligées.** Seul le moment de flexion vertical lié à la gravité est pris en compte.

4.3 Modélisation de la section

4.3.1 Maillage temporel

Chaque section a un repère orthonormé local $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, avec \vec{z} la direction principale de l'axe considéré et \vec{y} l'horizontale (\vec{x} est alors vertical ascendant lorsque la branche est horizontale). Les sections étant approchées par des disques circulaires, chaque nouvelle couche de bois déposée est modélisée par un accroissement du rayon du disque. Les incréments de rayon ne correspondent pas nécessairement à un cerne au sens biologique du terme (différentiel de surface causé par l'augmentation annuelle du rayon), mais bien juste à une augmentation discrète du rayon : nous parlerons ici de « cernes numériques ». Chaque section peut présenter une excentricité qui traduit un différentiel de croissance secondaire de part et d'autre de la moelle. Le modèle ne prenant en compte que le moment de flexion lié au poids, *i.e.* le moment autour de l'axe \vec{y} , l'excentricité est prise en compte seulement le long de l'axe \vec{x} . Cette excentricité est définie comme suit :

$$O_0(t)O(t) = \int_0^{R(t)} e(r) dr = \bar{e}R(t) \quad (4.4)$$

Avec $O_0(t)$ la position de la moelle à l'instant t , $O(t)$ celle du centre géométrique, $R(t)$ le rayon de la section, $e(r)$ l'excentricité lorsque le rayon de l'axe valait r , et \bar{e} l'excentricité moyenne (intégrant l'ensemble des excentricités des accroissements secondaires, ou « cernes numériques », précédents). Dans ce formalisme, une excentricité de 0 correspond à une croissance symétrique centrée, -1 à une croissance dite « épitrophique » avec tout le bois créé du côté supérieur, 1 à une croissance « hypotrophique » avec tout le bois créé du côté inférieur. Pour les calculs, la position x' dans le repère lié à la moelle $(\vec{x}', \vec{y}', \vec{z}')$ est nécessaire. Pour un rayon R , elle est directement déduite de l'équation 4.4 :

$$x' = x + \bar{e}R \quad (4.5)$$

La finesse du maillage est une fonction du nombre de cernes numériques N_c . L'indice k sera utilisé pour décrire l'incrément temporel (correspondant à un incrément de rayon, grâce à l'unicité de la loi $R = f(t)$). Il y a donc N_c cernes numériques, numérotés $\mathcal{C}_0, \dots, \mathcal{C}_k, \dots, \mathcal{C}_{N_c-1}$. À chacun de ces cercles \mathcal{C}_k est associé un rayon r_k et une excentricité e_k . Toutes ces données géométriques sont illustrées dans la figure 4.1.

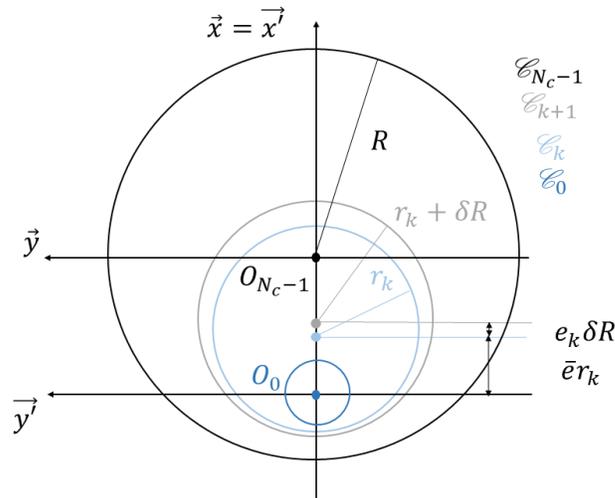


FIGURE 4.1 – Décomposition de l'évolution géométrique d'une section.

Différentes lois peuvent être choisies pour modéliser la cinétique de l'augmentation du rayon. Une loi simpliste consiste à choisir un incrément de rayon constant : $dr = R/N_c$. Une seconde possibilité est de conditionner la loi d'évolution de l'incrément de rayon de sorte que chaque incrément de surface dS soit constant. Enfin, il est aussi possible de tout simplement formaliser des lois d'évolution de rayon quelconques. Dans la mesure où les cernes numériques ne correspondent pas à des cernes biologiques et par soucis de simplicité, nous avons choisi de travailler avec l'hypothèse d'un incrément de rayon constant. Quelques représentations de

différentes configurations sont proposées dans la figure 4.2.

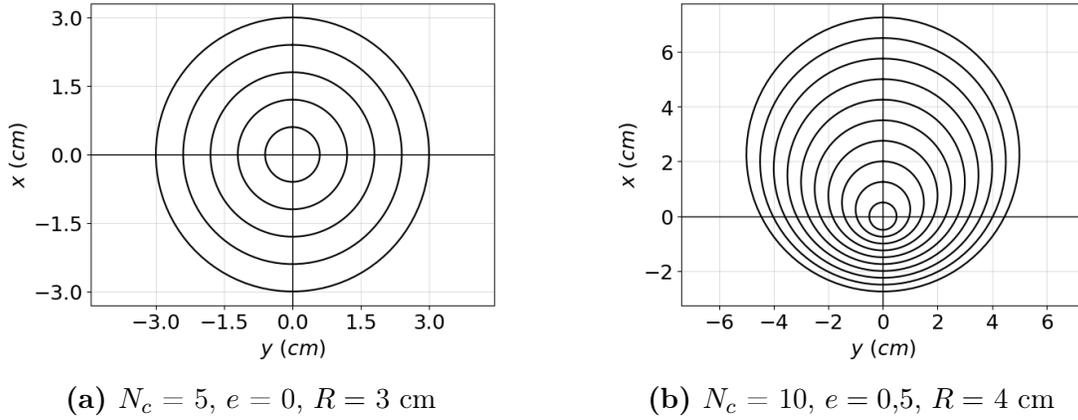


FIGURE 4.2 – Représentation de la géométrie de section selon différentes configurations. Les sections sont représentées dans le repère de la moelle. Pour (a) et (b), l'excentricité est constante tout au long de la croissance radiale avec $e = 0$ en (a) et $e = 0,5$ en (b).

4.3.2 Maillage spatial

Dans un deuxième temps, la procédure de maillage au sein de chaque cerne a été développée. Le nombre d'éléments du k -ième cerne $N_e(k)$ varie selon la loi suivante :

$$N_e(k) = \lfloor \frac{2\pi R(k)}{dR} + \frac{1}{2} \rfloor$$

avec $R(k)$ le rayon de la section, dR l'incrément de rayon, $\lfloor X \rfloor$ la partie entière de X .

Cette équation a été établie en imposant que sur une section centrée, l'approximation des éléments par un quadrilatère devait avoir un rapport longueur sur largeur proche de 1. Une fois le nombre $N_e(k)$ connu, l'angle γ_k couvert par chaque élément au sein du même cerne est calculé :

$$\gamma_k = \frac{2\pi}{N_e(k)}$$

La discrétisation dans un cerne est indiquée par l'indice l . Excepté pour le premier cerne numérique, où les éléments choisis sont des triangles, les éléments dans les cernes suivants sont de formes non-triviales : pour le cerne k , le l -ième élément est un quadrilatère Q_l^k , formé par l'intersection des deux droites passant par le centre géométrique O_k et des deux arcs des cercles \mathcal{C}_k et \mathcal{C}_{k-1} sur une plage angulaire γ_k . Pour tout $l \in [0, N_e(k)]$, chaque élément quadrilatère est alors défini par ses 4 sommets $(A_l^k, B_l^k, C_l^k, D_l^k)$. Une illustration d'un élément est proposée dans la figure 4.3. Pour mailler la section, il est nécessaire de déterminer les coordonnées de chaque sommet. L'ensemble des données géométriques nécessaires à la

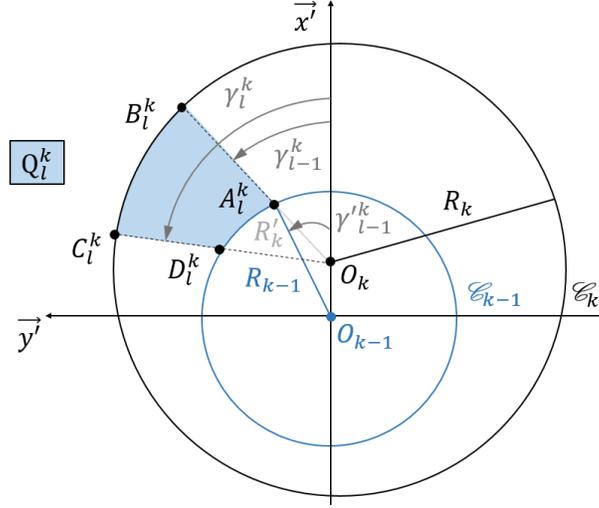


FIGURE 4.3 – Représentation de deux cernes consécutifs et des éléments nécessaires au calcul des coordonnées de chaque quadrilatère.

résolution de ce problème sont également représentées dans la figure 4.3. Dans un premier temps, on exprime les coordonnées des points A_l^k et B_l^k dans le repère global (géométrique) de la section (le même raisonnement est effectué pour les coordonnées des points C_l^k et D_l^k , avec un changement d'angle.).

$$A_l^k = \begin{pmatrix} R'_k \cos(\gamma_{l-1}^k) \\ R'_k \sin(\gamma_{l-1}^k) \end{pmatrix}, \quad B_l^k = \begin{pmatrix} R_k \cos(\gamma_{l-1}^k) \\ R_k \sin(\gamma_{l-1}^k) \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Les coordonnées du point B_l^k sont directement obtenues avec les données géométriques (rayon extérieur R_k et angle γ_{l-1}^k). Cependant, le cas du point A_l^k est plus délicat. Il faut en effet obtenir soit le rayon R'_k , soit l'angle $\gamma_{l-1}'^k$, tout deux représentés dans la figure 4.3. Il est choisi de calculer R'_k . Par projection du segment $[O_{k-1}A_l^k]$ dans le repère global (centré sur la moelle), on obtient :

$$\begin{cases} R_{k-1} \cos(\gamma_{l-1}'^k) = R'_k \cos(\gamma_{l-1}^k) + e_k \delta R & (4.7a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_{k-1} \sin(\gamma_{l-1}'^k) = R'_k \sin(\gamma_{l-1}^k) & (4.7b) \end{cases}$$

Par combinaison des équations 4.7a, 4.7b et de l'identité trigonométrique $\cos^2(X) + \sin^2(X) = 1$, il vient :

$$R_{k-1}^2 = R_k'^2 + e_k \delta R^2 + 2R'_k e_k \delta R \sin(\gamma_{l-1}^k)$$

On reconnaît ici une équation du second degré en R'_k dont on calcule le déterminant :

$$\Delta = 4 [R_{k-1}^2 - e_k^2 \delta R^2 \sin^2(\gamma_{l-1}^k)]$$

Une condition géométrique évidente étant $|e_k \delta R| < R_{k-1}$, le discriminant associé est positif. Il existe alors deux solutions potentielles :

$$R'_k = -e_k \delta R \cos(\gamma_{l-1}^k) \pm \sqrt{R_{k-1}^2 - e_k \delta R \sin^2(\gamma_{l-1}^k)}$$

Or, comme R'_k doit être positif, on en déduit l'unique expression possible du rayon :

$$R'_k = -e_k \delta R \cos(\gamma_{l-1}^k) + \sqrt{R_{k-1}^2 - e_k \delta R \sin^2(\gamma_{l-1}^k)} \quad (4.8)$$

En insérant l'expression de l'équation 4.8 dans les systèmes de coordonnées 4.6, on obtient les coordonnées des quatre sommets de chaque quadrilatère en fonction des données géométriques de la section. La figure 4.4 reprend les configurations de maillage de la figure 4.2 en y ajoutant la discrétisation spatiale. On y distingue les contours de chaque élément quadrilatère en noir et leur centre de gravité (calculés numériquement avec la fonction `centroid` de la bibliothèque NumPy [Harris et al. (2020)]) en bleu.

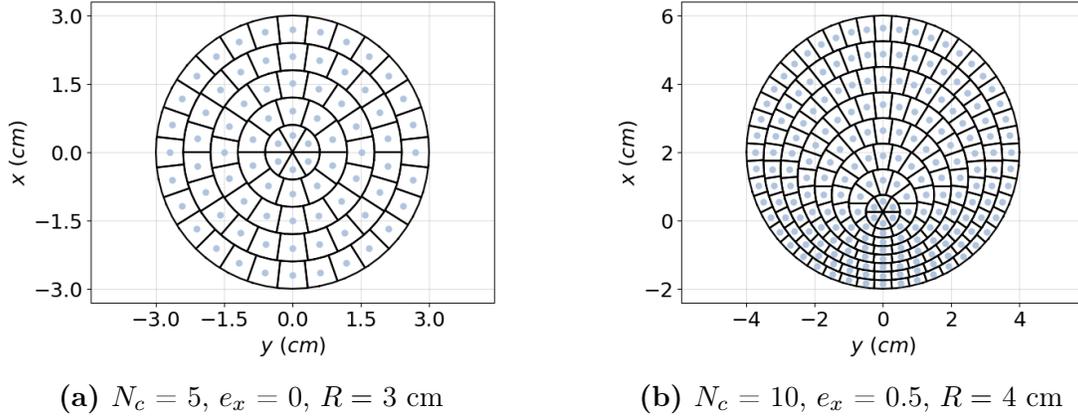


FIGURE 4.4 – Représentation du maillage de section selon différentes configurations. Les sections sont représentées dans le repère de la moelle.

Une fois les sections maillées, nous pouvons dans un deuxième temps mettre en place le modèle numérique. Cela consiste à affecter à chacun des quadrilatères Q_l^k un ensemble de paramètres mécaniques (rigidité, contrainte, déformation, etc.), susceptibles de varier à chaque incrément de rayon δr , en réponse à l'action conjuguée de l'augmentation du poids et de la maturation.

4.4 Modèle numérique

Le cadre de calcul est celui défini dans la section 4.2. La méthode choisie est une méthode incrémentale temporelle. Le calcul est explicite : à chaque incrément de temps Δt , la contrainte

longitudinale est calculée à partir de la contrainte au temps précédent, à laquelle s'ajoute l'incrément de contrainte calculé sur Δt . Deux types d'efforts sont identifiés comme source de cet incrément de contrainte :

- **Les efforts extérieurs**, qui sont résumés ici à l'action de la gravité.
- **Les efforts intérieurs**, qui correspondent à la maturation des cellules en périphérie. Cette maturation s'exprime en deux termes : un premier sur le nouvel incrément de section, qui correspond à la maturation du nouveau cerne, et un deuxième, sur l'ensemble de la section déjà existante, qui correspond à la déformation de l'ensemble des anciennes cellules en réponse à la maturation du nouveau cerne.

Le système d'équation correspondant s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equilibre dans l'axe : } \int_S \delta\sigma dS + \int_{\partial S} \sigma_0 dS = \delta N \\ \text{Equilibre en flexion : } \int_S \delta\sigma x' dS + \int_{\partial S} \sigma_0 x' dS = -\delta M \end{array} \right. \quad (4.9a)$$

$$(4.9b)$$

Avec S la section, ∂S l'incrément de surface, σ_0 la contrainte de maturation, $\delta\sigma$ l'incrément de contrainte engendré par l'ancien bois (en réaction à la maturation), δN l'incrément des forces extérieures s'appliquant dans l'axe de la tige, δM l'incrément du moment de flexion.

Dans un premier temps, les équations 4.9a et 4.9b sont écrites en termes de déformation (grâce à l'équation 4.1), puis sont discrétisées sur une base temporelle. Pour chaque instant k , la discrétisation du système 4.9 conduit alors aux équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{N_e(j)-1} E_l^j \delta\epsilon_l^j S_{j,l} - \sum_{l=0}^{N_e(k)-1} E_l^k \mu_l^k S_{k,l} = \delta N^k \\ \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{N_e(j)-1} E_l^j \delta\epsilon_l^j x_l'^j S_{j,l} - \sum_{l=0}^{N_e(k)-1} E_l^k \mu_l^k x_l'^k S_{k,l} = \delta M^k \end{array} \right. \quad (4.10a)$$

$$(4.10b)$$

Avec μ la déformation de maturation. Dans le contexte de la théorie des poutres (voir hypothèses de la section 4.2), il est supposé que les sections planes restent planes, de sorte que le champ de déformation soit décrit par la déformation a au centre de la moelle et la courbure b autour de l'axe x :

$$\delta\epsilon = \delta a + x' \delta b$$

Soit encore, sous forme discrétisée :

$$\forall j \in [0, k-1], \forall l \in [0, N_e(j)-1], \delta\epsilon_l^j = \delta a^k + \delta b^k x_l'^j \quad (4.11)$$

En injectant l'équation 4.11 dans le système 4.10, on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} K_0 & K_1 \\ K_1 & K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta a^k \\ \delta b^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta F_0 \\ \delta F_1 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

que l'on réécrit : $KE = F$ avec K la matrice de rigidité, E la vecteur de déformation et F le vecteur des efforts extérieurs. On explicite alors les coefficients de rigidité K_n et ceux des incréments d'efforts extérieurs δF_n :

$$K_n = \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{Ne(j)-1} E_l^j (x_l^j)^n S_{j,l}, \quad \delta F_n = h_n + \sum_{i=0}^{Ne(k)-1} E_i^k \mu_i^k (x_i^k)^n S_{k,i}$$

avec h_n une fonction définie telle que $h_0 = \delta N^k$ et $h_1 = \delta M^k$.

L'inversion du système 4.12 permet de trouver pour chaque instant k les données de déformation δa^k et δb^k et donc de remonter à l'expression de $\delta \epsilon_l^k$ (cf équation 4.11). La loi de comportement 4.1 permet d'en déduire l'incrément de contrainte correspondant :

$$\begin{cases} \forall j \in [0, k-2], \forall l \in [0, Ne(j)-1], \delta \sigma_l^j = E_l^j \delta \epsilon_l^j \\ \forall l \in [0, Ne(k-1)-1], \delta \sigma_l^k = E_l^k (\delta \epsilon_l^k - \mu_l^k) \end{cases}$$

Ce qui conduit à l'expression de la contrainte totale :

$$\forall j \in [0, k-1], \forall l \in [0, Ne(j)-1], \sigma_l^j = \sigma_l^{j-1} + \delta \sigma_l^j \quad (4.13)$$

La dissymétrie des contraintes de croissance est modélisée par une loi sinusoïdale [Archer (1976); Fournier (1989)] :

$$\sigma_0(\theta) = \alpha + \beta \cos \theta \quad (4.14)$$

θ représente la position circonférentielle de l'élément considéré : $\theta = \pi/2$ représente le point supérieur de la branche, $\theta = -\pi/2$ le point inférieur. Les coefficients α et β sont différents selon la nature de la branche et en particulier s'il s'agit de bois de tension (feuillu) ou de bois de compression (résineux). En appelant σ_{BT} (resp. σ_{BC} , σ_{BO}) la déformation dans le bois de tension (resp. bois de compression, bois opposé), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Résineux : } \alpha = \frac{\sigma_{BT} + \sigma_{BO}}{2}; \beta = \frac{\sigma_{BT} - \sigma_{BO}}{2} \end{array} \right. \quad (4.15a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Feuillu : } \alpha = \frac{\sigma_{BC} + \sigma_{BO}}{2}; \beta = \frac{\sigma_{BO} - \sigma_{BC}}{2} \end{array} \right. \quad (4.15b)$$

Pour le modèle feuillu, la formulation 4.14 permet d'avoir une contrainte σ_{BT} sur la face supérieure de la branche ($\theta = 0$) et une contrainte σ_{BN} sur la face inférieure ($\theta = \pi$); et inversement pour le modèle résineux. La discrétisation de l'équation 4.14 donne alors :

$$\sigma_{0l}^k = \alpha + \beta \frac{x_l^k}{\sqrt{x_l^{k2} + y_l^{k2}}}$$

Pour chaque rayon R (*i.e.* pour tout instant t), la contrainte totale σ peut donc être calculée en tout point de la section. Les paramètres qui pilotent ce modèle sont la matrice de rigidité, le gradient de contrainte de maturation et la maturation moyenne (soit encore les contraintes de maturations dans le bois de réaction et le bois opposé), l'excentricité ainsi que le chargement de la branche lié à son poids propre.

4.5 Validation du modèle : solution semi-analytique

Pour valider l'implémentation du modèle, une étude analytique a été effectuée. Elle consiste, sous un certain nombre d'hypothèses, à calculer explicitement chacune des intégrales surfaciques du système 4.9. Pour simplifier le calcul, le module d'Young de chaque élément sera supposé constant et homogène sur toute la section. On définit alors un système matriciel similaire au système 4.12, dont les coefficients sont exprimés comme suit :

$$\begin{cases} K_n^{th} = \int_S E(x')^n dS & (4.16a) \\ \delta F_n^{th} = - \int_{\delta S} \sigma_0(x')^n dS + h_n & (4.16b) \end{cases}$$

avec h_n une fonction telle que $h_0 = \delta N$ et $h_1 = -\delta M$.

4.5.1 Calculs préliminaires

Quelques éléments préliminaires au calcul des intégrales sont nécessaires. On rappelle notamment que chaque position x dans le repère géométrique s'exprime par rapport à la position x' dans le repère de la moelle selon l'équation :

$$x = r \cos \theta = x' - \bar{e}R \quad (4.17)$$

avec r le rayon à l'instant t , R le rayon à l'instant final, \bar{e} l'excentricité moyenne et θ la position circonférentielle de l'élément considéré.

De même, il convient de calculer la distribution tangentielle de l'incrément de rayon $\delta r(\theta)$, nécessaire au calcul de l'intégrale de la contrainte de maturation. La situation est représentée dans la Figure 4.5.

La projection de la relation $\overrightarrow{O'M} + \overrightarrow{MO} = \overrightarrow{O'O}$ donne :

$$\begin{cases} [r + \delta r(\theta)] \cos \theta' - (r + \delta r) \cos \theta = \bar{e} \delta r & (4.18a) \\ [r + \delta r(\theta)] \sin \theta' - (r + \delta r) \sin \theta = 0 & (4.18b) \end{cases}$$

Or, $\theta' = \theta + d\theta$ avec $d\theta \rightarrow 0$, d'où on déduit :

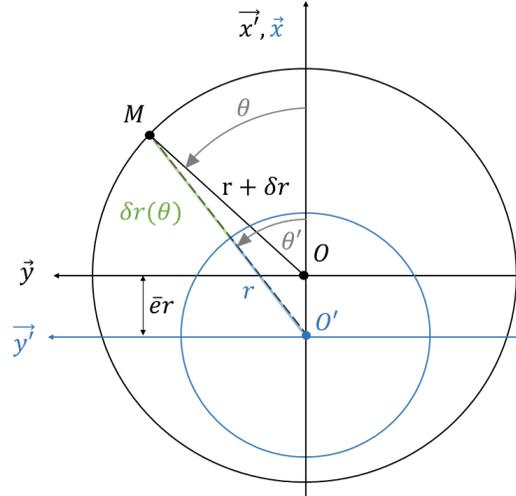


FIGURE 4.5 – Représentation de deux cercles consécutifs et des éléments nécessaires au calcul de l'incrément de rayon $\delta r(\theta)$.

$$\begin{cases} \cos \theta' = \cos \theta + d\theta = \cos \theta - \sin \theta d\theta & (4.19a) \\ \sin \theta' = \sin \theta + d\theta = \sin \theta + \cos \theta d\theta & (4.19b) \end{cases}$$

En injectant les expressions du système 4.19 dans les équations 4.18a et 4.18b, on obtient par la combinaison suivante 4.18a $\cos \theta$ + 4.18b $\sin \theta$ l'expression d'incrément finale :

$$\delta r(\theta) = \delta r [1 + \bar{e} \cos \theta] \quad (4.20)$$

4.5.2 Développement analytique

À l'aide des équations 4.17 et 4.20, il devient alors possible de calculer analytiquement chacune des intégrales du système 4.16 :

Calcul des rigidités

1. $K_0^{th} = \int_S E dS = \int_0^{2\pi} \int_0^R E r \delta r d\theta = E \pi R^2$
2. $K_1^{th} = \int_S E x' dS = E \int_S (r \cos \theta + \bar{e} R) dS = E \bar{e} \pi R^3$
3. $K_2^{th} = \int_S E (x')^2 dS = E \int_S ((r \cos \theta)^2 + 2\bar{e} r R \cos \theta + (\bar{e} R)^2) dS = E \pi R^4 \left(\bar{e}^2 + \frac{1}{4} \right)$

Calcul des efforts externes et internes

$$\begin{aligned}
 1. \quad \delta F_0^{th} &= \int_{\delta s} \sigma_0 ds + \delta N \\
 &= \int_{\delta S} \sigma_0(\theta) R \delta R(\theta) d\theta + \delta N \\
 &= \int_{\delta s} [\alpha + \beta \cos \theta] [1 + e \cos \theta] R \delta R d\theta + \delta N \\
 &= \pi (2\alpha + \beta e) R \delta R + \delta N \\
 2. \quad \delta F_1^{th} &= \int_{\delta S} x' \sigma_0 dS - \delta M \\
 &= \int_{\delta S} \sigma_0(\theta) (x + \bar{e}R) R \delta R(\theta) d\theta - \delta M \\
 &= \pi (3\alpha e + \beta e^2 + \beta) R^2 \delta R - \delta M
 \end{aligned}$$

Résolution du système

L'ensemble des calculs ci-dessus permettent la résolution analytique du système 4.9, qui conduit à l'expression des composantes de la déformation :

$$\left\{ \begin{aligned}
 \delta a &= \frac{4}{ER} \left[\left(3e\bar{e} - 2e^2 - \frac{1}{2} \right) \alpha \delta R - \left(\bar{e} - \frac{e}{4} \right) \beta \delta R - \frac{1}{\pi R^2} \left(\bar{e} \delta M + \left(\bar{e} + \frac{1}{4} \right) R \delta N \right) \right] & (4.21a) \\
 \delta b &= \frac{-4}{ER^2} \left[(3e - 2\bar{e}) \alpha \delta R + (e^2 - e\bar{e} + 1) \beta \delta R + \frac{1}{\pi R^2} (\delta M + \bar{e}R \delta N) \right] & (4.21b)
 \end{aligned} \right.$$

Pour résoudre explicitement l'ensemble du système, une expression des lois de variation des chargements N et M est nécessaire. Dans notre situation, par soucis de simplicité, nous avons supposé que ces efforts extérieurs suivent des lois allométriques $N(R)$, $M(R)$ en fonction puissance du rayon [Alméras et al. (2018)] :

$$\begin{cases} N(R) = \lambda_N R^{\nu_N} & (4.22a) \\ M(R) = \lambda_M R^{\nu_M} & (4.22b) \end{cases}$$

Dans ces expressions, les coefficients $\nu_{N,M}$ sont liés à la cinétique de croissance secondaire, et les coefficients $\lambda_{N,M}$ sont des constantes proportionnelles au chargement. On obtient alors les incréments de chargement suivants :

$$\begin{cases} \delta N = \lambda_N \nu_N R^{\nu_N - 1} \delta R & (4.23a) \\ \delta M = \lambda_M \nu_M R^{\nu_M - 1} \delta R & (4.23b) \end{cases}$$

En divisant chaque terme du système 4.21 par δR et en faisant tendre cette valeur vers 0, on obtient les dérivées suivantes sur chacune des composantes de la déformation :

$$\begin{cases} \frac{da}{dR} = \frac{1}{E} \left[\frac{A_1}{R} + A_2 R^{A_3-1} + A_4 R^{A_5-1} \right] & (4.24a) \\ \frac{db}{dR} = \frac{1}{E} \left[\frac{B_1}{R^2} + B_2 R^{B_3-1} + B_4 R^{B_5-1} \right] & (4.24b) \end{cases}$$

avec

$$\begin{aligned} A_1 &= 4 \left[\left(3e\bar{e} - 2e^2 - \frac{1}{2} \right) \alpha + \left(\bar{e}e^2 - e\bar{e}^2 + \bar{e} - \frac{e}{4} \right) \beta \right], & A_2 &= 4 \frac{\lambda_N \nu_N}{\pi} \left(\bar{e}^2 + \frac{1}{4} \right) \\ A_3 &= \nu_N - 2, & A_4 &= \frac{4}{\pi} \lambda_M \nu_M \bar{e}, & A_5 &= \nu_M - 3, & B_1 &= -4 \left[(3e - 2\bar{e}) \alpha + (e^2 - e\bar{e} + 1) \beta \right] \\ B_2 &= -4\bar{e} \frac{\lambda_N \nu_N}{\pi}, & B_3 &= \nu_N - 3, & B_4 &= -\frac{4}{\pi} \lambda_M \nu_M, & B_5 &= \nu_M - 4 \end{aligned}$$

Les coefficients A_1 et B_1 sont des fonctions de la réaction de maturation de la tige, tandis que les autres coefficients correspondent au chargement pondéral de la branche (l'excentricité joue sur le chargement, en décalant le centre de gravité). Pour un rayon final R et en tout point (x', y') , la contrainte dans la section peut être calculée en utilisant l'équation 4.3 :

$$\begin{aligned} \sigma(x', y', R) &= \sigma_0(x', y') + \int_{R_{x'y'}}^R \frac{\partial \sigma}{\partial R}(x, R') dR' \\ &= \sigma_0(x', y') + E \int_{R_{x'y'}}^R \left(\frac{da}{dR}(R') + x' \frac{db}{dR}(R') \right) dR' \end{aligned}$$

avec $R_{x'y'}$ le rayon de la section à l'instant d'apparition du point de coordonnées (x', y') . À l'aide du système 4.24, on déduit alors l'expression finale de la contrainte en tout point de la section :

$$\boxed{\begin{aligned} \sigma(x', y', R) &= \sigma_0(x', y') + A_1 \ln \left(\frac{R}{R_{x'y'}} \right) + \frac{A_2}{A_3} (R^{A_3} - R_{x'y'}^{A_3}) + \frac{A_4}{A_5} (R^{A_5} - R_{x'y'}^{A_5}) \\ &+ x' \left[B_1 \left(\frac{1}{R_{x'y'}} - \frac{1}{R} \right) + \frac{B_2}{B_3} (R^{B_3} - R_{x'y'}^{B_3}) + \frac{B_4}{B_5} (R^{B_5} - R_{x'y'}^{B_5}) \right] \end{aligned}} \quad (4.25)$$

Explicitons $R_{x'y'}$. À l'instant $t_{x'y'}$, pour tout point de coordonnées (x', y') , le théorème de Pythagore appliqué en ce point dans le repère géométrique permet d'écrire :

$$R_{x'y'}^2 = (x' - \bar{e}R_{x'y'})^2 + y'^2 \quad (4.26)$$

On peut alors calculer le déterminant réduit Δ' de cette équation du second degré :

$$\Delta' = x'^2 + (1 - \bar{e}_x^2) y'^2 \geq 0$$

Ce qui conduit au couple de solutions :

$$R_{x'y'} = \frac{-x'\bar{e} \pm \sqrt{x'^2 + (1 - \bar{e}^2)y'^2}}{1 - \bar{e}^2} \quad (4.27)$$

Or, $R_{x'y'}$ étant une distance, une condition nécessaire est $R_{x'y'} \geq 0$.

De plus, $\forall (x', y') \in \mathbb{R}^2, (1 - \bar{e}^2)(x'^2 + y'^2) \geq 0$. On peut donc finalement en déduire l'expression du rayon du point de coordonnées (x', y') au moment de sa formation :

$$R_{x'y'} = \frac{-x'\bar{e} + \sqrt{x'^2 + (1 - \bar{e}^2)y'^2}}{1 - \bar{e}^2} \quad (4.28)$$

4.5.3 Comparaison et validation du modèle numérique

Paramétrage d'une situation de référence

Une comparaison des formulations incrémentale (eq. 4.13) et théorique (eq. 4.25) est effectuée sur le cas d'une branche fictive. La configuration, considérée comme réaliste, est représentée dans la figure 4.6.

Cette branche est assimilée à un cylindre de longueur L (ici $L = 5$ m) et de rayon R (ici $R = 5$ cm). Ce cylindre est incliné d'un angle $\gamma = 20^\circ$ par rapport à l'horizontale. La masse volumique considérée est $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$. Pour pouvoir fixer les coefficients $\lambda_{N,M}, \nu_{N,M}$, nous supposons que la longueur varie allométriquement avec une loi puissance du rayon, avec un exposant $2/3$: $L = \lambda_L R^{2/3}$. La valeur de cet exposant correspond au critère de stabilité élastique, *i.e.* la valeur limite de tenue d'une tige verticale au flambement [Greenhill (1882)]. Par ailleurs, les travaux de Dahle and Grabosky (2009) ont montré que cette valeur théorique est effectivement observée chez les branches dans la nature.

En appelant m la masse de la branche et g l'accélération de la pesanteur, il vient l'expression des chargements en moment et en effort normal :

$$\begin{cases} N = -mg \sin \gamma \\ M = mg \frac{L}{2} \cos \gamma \end{cases}$$

Or, la branche étant supposée cylindrique, la masse m s'écrit : $m = \rho\pi R^2 L = \rho\pi R^2 \lambda_L R^{1/3}$,

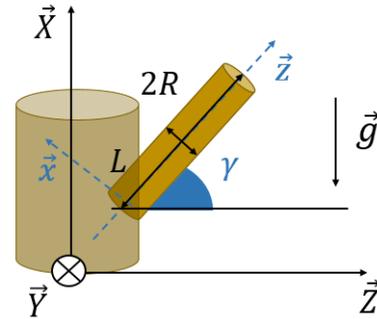


FIGURE 4.6 – Situation de référence pour la validation du modèle numérique.

d'où on déduit, par combinaison avec le système 4.22 :

$$\begin{cases} N = \lambda_N R^{\nu_N} = -\pi \rho g \lambda_L \sin \gamma R^{8/3} \\ M = \lambda_M R^{\nu_M} = \frac{1}{2} \pi \rho g \lambda_L^2 \cos \gamma R^{10/3} \end{cases}$$

Ce qui permet, par unicité de l'écriture polynomiale, d'identifier les coefficients allométriques $\lambda_{N,M}, \nu_{N,M}$:

$$\begin{cases} \lambda_N = -\pi \rho g \lambda_L \sin \gamma, & \nu_N = \frac{8}{3} \\ \lambda_M = \frac{1}{2} \pi \rho g \lambda_L^2 \cos \gamma, & \nu_M = \frac{10}{3} \end{cases}$$

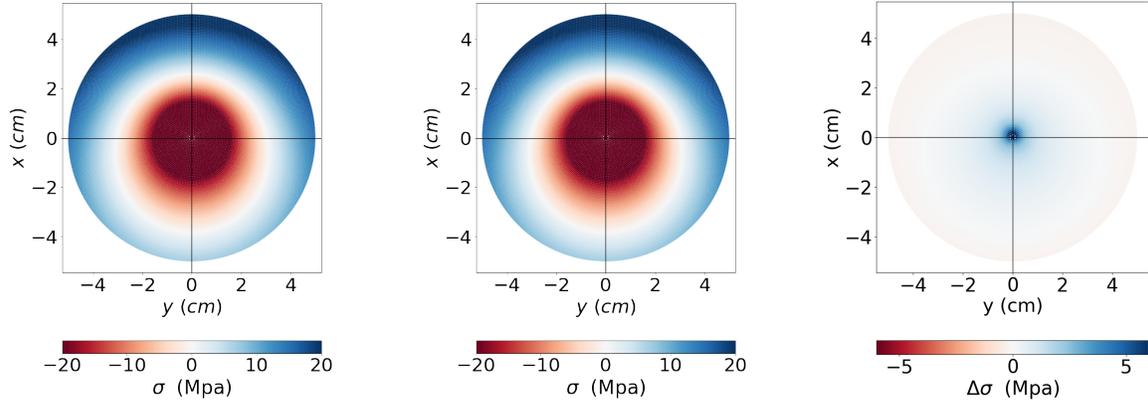
Enfin, il reste à fixer la valeur des moteurs du contrôle postural :

- L'excentricité : elle sera supposée constante et différentes situations seront explorées
- les paramètres de maturations α et β . Nous nous appuyerons sur les valeurs trouvées dans la littérature : Thibaut and Gril (2021) ont mené une étude sur des arbres de régions tempérée et tropicale, résineux et feuillus. Dans ce travail, les déformations de maturation dans le bois normal et dans les bois de réaction (compression et tension) ont été mesurées. Les valeurs moyennes obtenues seront prises pour entrées du modèle. En considérant un modèle feuillu, nous prendrons comme déformation dans le bois normal (resp. dans le bois de tension) $\mu_{BN} = 712 \mu\text{def}$ (resp. $\mu_{BT} = 2334 \mu\text{def}$). Le module d'Young longitudinal du bois vert, considéré pour le passage des déformations aux contraintes, sera fixé à $E = 10 \text{ GPa}$.

Une représentation des contraintes sur l'ensemble de la section est proposée dans la figure 4.7 : le modèle incrémental numérique en 4.7.a), la solution analytique en 4.7.b), et la différence de ces deux contraintes en 4.7.c). Dans cette situation, il n'y a pas d'excentricité ($e = 0$), et N_c est fixé à 80. Le mode de croissance adopté est le mode « feuillu ». Sur ce type de représentation, il est clair que les deux méthodes donnent des résultats très proches, mais il est difficile de quantifier l'erreur. Sur la représentation 4.7.c), la concentration des erreurs, plus visible, semble localisée dans la zone autour de la moelle.

Une approche plus visuelle consiste à extrapoler les valeurs sur une ligne et à comparer les deux données sur le même graphique. Nous avons choisi de nous baser sur l'axe $y = 0$, et d'explorer visuellement la différence que l'on peut trouver entre les deux méthodes, pour différentes excentricités, et un nombre de cernes numériques variable. Ce travail est illustré par la figure 4.8. Comme pour la figure 4.7, la première observation est la bonne convergence des deux méthodes. En revanche, l'excentricité et le nombre de cernes semblent avoir une influence sur la qualité de convergence des deux contraintes :

- Dans notre exemple, une excentricité épitrophique (une majorité de bois du côté supérieur) donne lieu à une singularité plus forte au niveau de la moelle, réduisant la qualité de la convergence dans cette zone là.
- Un maillage plus fin (nombre de cernes numériques plus important) donne lieu à une meilleure convergence sur l'ensemble de la section (Figure 4.8.b, $N_c = 80$ vs. Figure



(a) Formulation incrémentale (b) Formulation théorique (c) Différence des formulations

FIGURE 4.7 – Représentation du champ de contrainte dans la section de la branche en figure 4.6. La section représenté est à l’insertion de la branche.

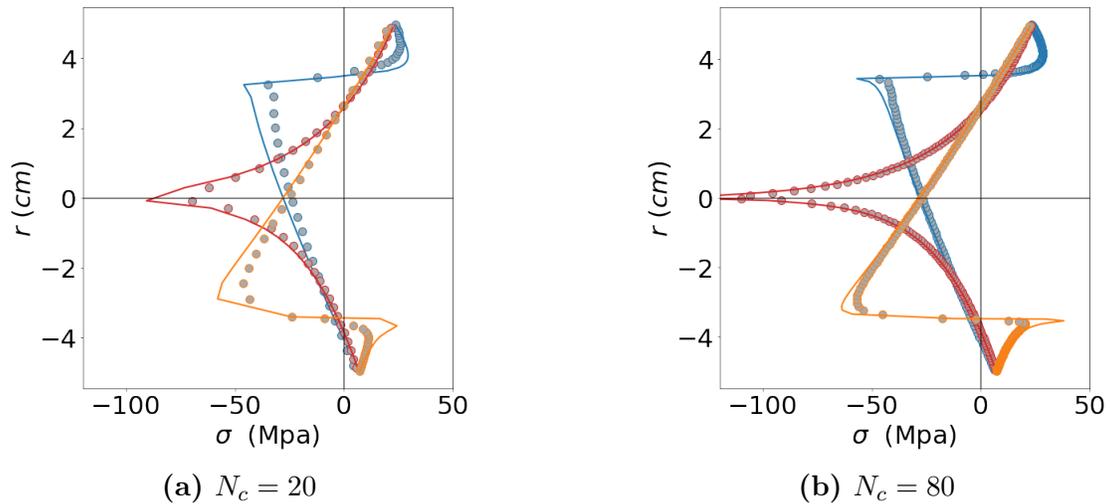


FIGURE 4.8 – Représentation des contraintes sur l’axe $y=0$ pour différentes excentricités et différentes valeurs de N_c . Les courbes en rouge (resp. orange et bleu) représentent des contraintes obtenues pour une excentricité $e = 0$ (resp. $e = 0,7$ et $e = -0,7$). Les courbes pleines représentent la solution analytique, tandis que les cercles gris correspondent à la formulation incrémentale.

4.8.a, $N_c = 20$). La singularité au niveau de la moelle reste la zone la moins bien approximée (ce qui confirme l’observation faite dans la figure 4.7).

Si dans tous les cas, l’artefact à la moelle est une source d’erreur, la pondération de cette erreur par la faible surface concernée rend l’erreur acceptable : une quantification de l’erreur globale à l’aide de la racine de l’écart quadratique moyen (REQM) est alors proposée. Dans

notre cas, la formulation de cette erreur est donnée :

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{l=0}^{N_e(k)-1} s_l^k \left[(\sigma_l^k)^{th} - (\sigma_l^k)^{inc} \right]^2}$$

avec σ^{th} (resp. σ^{inc}) la contrainte obtenue par la méthode analytique (resp. incrémentale). Sur la figure 4.9 est représentée la $REQM$ sur la section totale pour différentes valeurs de N_c .

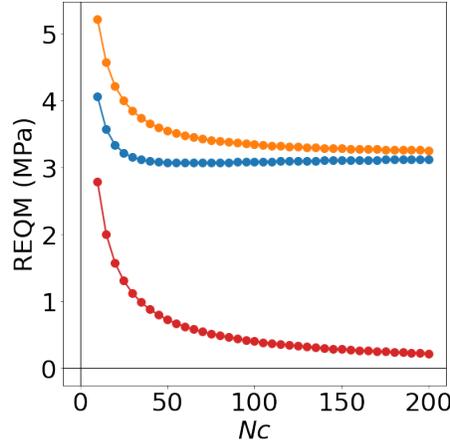


FIGURE 4.9 – Représentation de la $REQM$ entre les deux méthodes de calcul différentes valeurs de N_c . La courbe rouge (resp. orange et bleu) représente les $REQM$ obtenues pour une excentricité $e = 0$ (resp. $e = 0,7$ et $e = -0,7$).

Les résultats confirment les observations précédentes. Tout d’abord la finesse du maillage influence la valeur de la $REQM$ et semble tendre vers une valeur limite. Prendre $N_c \approx 100$ semble être un bon compromis entre temps de calcul et minimisation de l’erreur. De plus, si l’excentricité influence grandement l’erreur globale ($N_c = 100$, la $REQM$ est multipliée par plus de 20 entre la situation centrée et la situation excentrée), l’ordre de grandeur de l’erreur dans le pire des cas - $REQM \approx 3,5$ MPa - est acceptable devant les ordres de grandeurs considérés (voir Figure 4.8). Ceci permet de valider la formulation du modèle numérique.

4.6 Améliorations du modèle et perspectives

Une des limites du modèle est la singularité du profil de contrainte à la moelle. Cet artefact irréaliste peut être corrigé en prenant en considération d’autres paramètres que nous n’avons pas considéré ici. Par exemple, il serait intéressant de prendre en considération l’écorce. Clair et al. (2019) ont montré l’importance de son rôle mécanique pour le contrôle postural de jeunes plants. On peut donc ici faire l’hypothèse qu’elle pourrait aussi avoir un impact

lors des premiers stades de développement de la branche. Dans le travail qui suit, l'écorce est traitée comme un cerne qui suit son propre système de croissance, avec sa propre rigidité. Le système 4.9 est alors réécrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equilibre dans l'axe : } \int_S \partial\sigma dS + \int_{\partial S} \sigma_0 dS + \int_{S_b} \sigma_b dS = \delta N \\ \text{Equilibre en flexion : } \int_S \partial\sigma x dS + \int_{\partial S} \sigma_0 x dS + \int_{S_b} \sigma_b x dS = -\delta M \end{array} \right. \quad (4.32a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equilibre dans l'axe : } \int_S \partial\sigma dS + \int_{\partial S} \sigma_0 dS + \int_{S_b} \sigma_b dS = \delta N \\ \text{Equilibre en flexion : } \int_S \partial\sigma x dS + \int_{\partial S} \sigma_0 x dS + \int_{S_b} \sigma_b x dS = -\delta M \end{array} \right. \quad (4.32b)$$

avec S_b la surface du « cerne d'écorce » et σ_b la contrainte dans ce dernier.

Plutôt que de matérialiser un cerne physique, il a été choisi de développer analytiquement les termes dus à la présence de l'écorce, et de les introduire dans le calcul numérique. Soit $(dK_n)_b^k$ l'incrément de rigidité engendré par l'écorce au temps correspondant à l'indice k . A chaque incrément, il y a alors une suppression dans les coefficient K_n de l'incrément précédent $(dK_n)_b^{k-1}$, et un ajout de l'incrément actuel $(dK_n)_b^k$.

L'épaisseur de l'écorce e_b est supposée suivre sa propre loi allométrique [Lehnebach et al. (2020)] :

$$e_b = \lambda_b R^{\nu_b} \quad (4.33)$$

Au sein de cette épaisseur, la rigidité E_b est également supposée constante. Les incréments de rigidité résultants en sont alors déduits :

1. $\delta K_0^b = \int_{S_b} E dS = \int_0^{2\pi} \int_R^{R+e_b} E r \delta r d\theta = \pi E_b (2R e_b + e_b^2)$
2. $\delta K_1^b = \pi E_b (2R e_b + e_b^2) \bar{e} R$
3. $\delta K_2^b = \pi E_b \left[\frac{(R + e_b)^4 - R^4}{4} + \bar{e}^2 R^2 (2R e_b + e_b^2) \right]$

Cette méthode d'implémentation présente l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre. Elle permet d'introduire l'effet de l'écorce sans modifier l'architecture du code de calcul. Pour mettre en évidence l'importance de cet effet, une pondération logarithmique P_b de la rigidité de l'écorce E_b par rapport à la rigidité du reste de la section E a été mise en place :

$$P_b = -\log_{10} \left(\frac{E_b}{E} \right)$$

Cette pondération logarithmique a été observée et mesurée lors d'une campagne sur plusieurs espèces d'Amazonie, dont les résultats ne sont pas encore publiés (communication personnelle, Tancrede Almeras¹). Sur les mesures effectuées lors de cette campagne, P_b a été trouvé dans un interval de 0,25 à 2.

1. LMGC, CNRS, Université of Montpellier, Montpellier, France

Sur la Figure 4.10 sont représentés différents profils de contraintes associés à un P_b donné. La situation modélisée est la même que celle traitée dans la section précédente. Les travaux de Lehnebach et al. (2020) sur 6 espèces d'Amazonie ont mis en évidence que la loi 4.33 rendait bien compte de l'évolution de l'épaisseur de l'écorce. En particulier, le paramètre allométrique moyen ν_b était approximativement constant quelle que ce soient les espèces, et se situait autour de $2/3$. Le choix du paramètre λ_b s'est fait en supposant une épaisseur d'écorce de $e_b = 3$ mm pour un tronc de rayon $R = 5$ cm (choix également basé sur les observations de Lehnebach et al. (2020)).

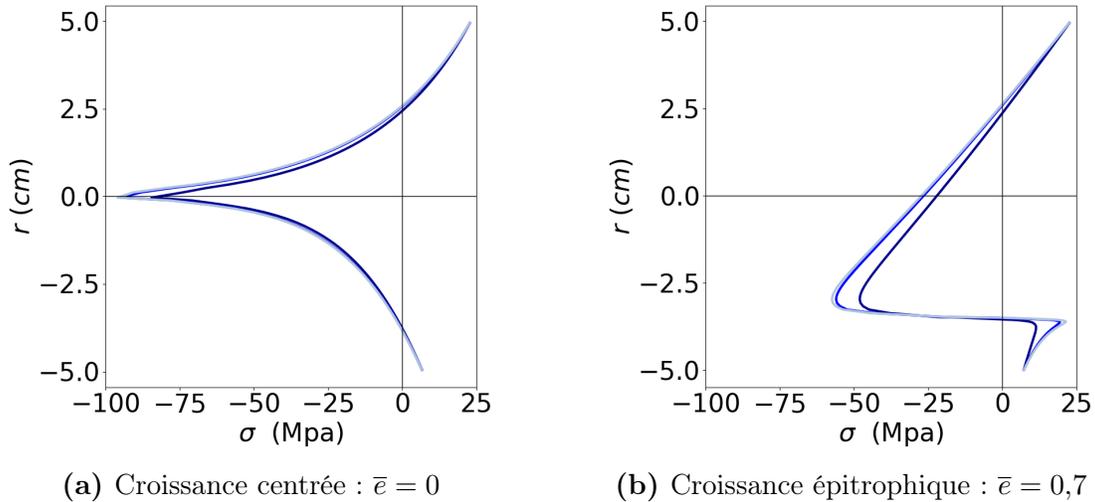


FIGURE 4.10 – Représentation des contraintes sur l'axe $y=0$ pour différentes valeurs de P_b . De la couleur la plus foncée à la plus claire : $P_b = 0,25$, $P_b = 1,1$, $P_b = 2$.

L'influence de ces différentes rigidités (ainsi qu'une valeur intermédiaire $P_b = 1,1$) a été explorée. Plus l'écorce est rigide (plus P_b est faible, courbe foncée sur la figure 4.10), et plus l'atténuation est importante. Ce travail nous a permis de montrer que la prise en considération du rôle de l'écorce, conduit à une réduction des valeurs aberrantes de contrainte à la moelle. Ce rôle est particulièrement important lorsque les profils sont excentrés; comme en témoigne la figure 4.10.b). Dans la suite de nos modélisations, nous prendrons $P_b = 2$.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle de calcul des contraintes de croissances en réponse à l'augmentation du poids d'une branche. Les calculs numériques du modèle ont été validés à l'aide d'une solution analytique. Inspiré de modèles existants dans la littérature, celui-ci apporte de nouvelles fonctionnalités, comme la prise en compte des variations d'excentricités et de déformations de maturation tout au long de la croissance. Également, le rôle de l'écorce a été modélisé, et permet de rendre ce modèle un peu plus réaliste. Dans la suite

de l'étude, ce modèle sera utilisé comme un outil pour répondre à différentes problématiques sur le dimensionnement des branches.

Chapitre 5

Action du poids propre et maintien de la posture : vers une meilleure compréhension du dimensionnement des branches

Sommaire

5.1	Introduction	146
5.2	Maquettes virtuelles d'arbres numériques	146
5.2.1	Présentation générale des maquettes	146
5.2.2	Méthode de calcul de l'histoire du chargement pondéral	147
5.2.3	Choix et caractérisation des branches	149
5.3	Application du modèle à l'étude des stratégies de redressement : cas feuillu vs résineux	153
5.3.1	Formulation du problème	153
5.3.2	Résultats	154
5.3.3	Discussion	158
5.3.4	Conclusion	160
5.4	Mesures de l'évolution spatio-temporelle de l'excentricité et des déformations de maturation	162
5.4.1	Introduction	162
5.4.2	Mesure d'excentricité	164
5.4.3	Évaluation des contraintes de maturation	167
5.5	Conclusion	174

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, un modèle de simulation de la mise en place des contraintes de croissance a été développé. Il permet de comprendre comment les contraintes se mettent en place dans une branche, en fonction de son histoire de chargement et de la réponse que la branche apporte à cette charge pour assurer son maintien. Ce modèle permet aussi d'apprécier dans quelle mesure une branche peut assurer une orientation, les moteurs qu'elle peut utiliser et comment une association judicieuse de ceux-ci conduit à des états mécaniques qui minimisent les contraintes dans la section. Pour comprendre la propension d'une branche à casser, il est important de connaître son état de contrainte initial. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la dépendance entre l'état mécanique résultant du poids propre et le moteur utilisé par la branche pour maintenir une orientation sans fléchir sous son propre poids. Les deux moteurs connus à ce jour et pris en compte par le modèle sont la génération de contraintes de maturation et l'excentricité de croissance secondaire.

Dans ce chapitre, nous appliquons le modèle à des branches virtuelles, mais réalistes, issues de maquettes numériques d'arbres produites par des botanistes. En comparant les résultats obtenus avec des mesures issues de la littérature, des hypothèses sur l'implication des paramètres dans le contrôle postural sont formulées. Dans un deuxième temps, cette étude est complétée par une proposition de protocole expérimental de détermination des variations d'excentricité et des déformations de maturation dans les branches. L'objectif à terme est de proposer une combinaison de ces deux volets afin de permettre de connaître le champ de contraintes en tout point d'une branche, tout au long de son développement.

5.2 Maquettes virtuelles d'arbres numériques

5.2.1 Présentation générale des maquettes

Des maquettes numériques d'arbres ont été générées par le logiciel AmapSim [Barczi et al. (2007)]. La réalisation des maquettes et l'adaptation du format de ces dernières ont été possibles grâce à la forte implication de chercheurs de l'UMR AMAP (botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations, Montpellier). Notamment, Yves Caraglio¹, a paramétré les maquettes. Jean-François Barczi¹ les a générées, et François de Coligny¹ a adapté leur format. Deux sujets ont été modélisés : un arbre feuillu, le merisier (*Prunus avium* L), et un résineux, le pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton). Le choix des essences a été contraint par les disponibilités de la base de données d'AmapSim. Selon le formalisme défini par Hallé et al. (1978), ces essences suivent le modèle architectural de Rauh, caractérisé par un tronc monopodique à croissance rythmique. Dans les deux cas, les branches sont orthotropes et morphologiquement identiques au tronc. Les caractéristiques structurelles et

1. CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France. AMAP, Univ Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France.

botaniques de chacun des sujets ont fait l'objet de mesures de terrain : Coudurier et al. (1993) et Heuret et al. (2006) pour *P. pinaster*, Caraglio (1996) et Barthélémy et al. (2009) pour *P. avium*. Les deux arbres ont été simulés en croissance libre, sur 50 ans. Même si cela ne correspond pas exactement au même stade physiologique, cet âge est suffisant pour affirmer que les deux sujets sont parvenus à un stade mature de leur développement. Le pin présente alors une hauteur de 18,2 m pour un DHP de 40 cm, tandis que le merisier mesure 14,1 m pour un DHP de 40 cm également. La première branche de *P. pinaster* s'insère à 14,3 m, celle de *P. avium* à 4,6 m. Les deux maquettes sont représentées à différents stades de croissance dans la figure 5.1.

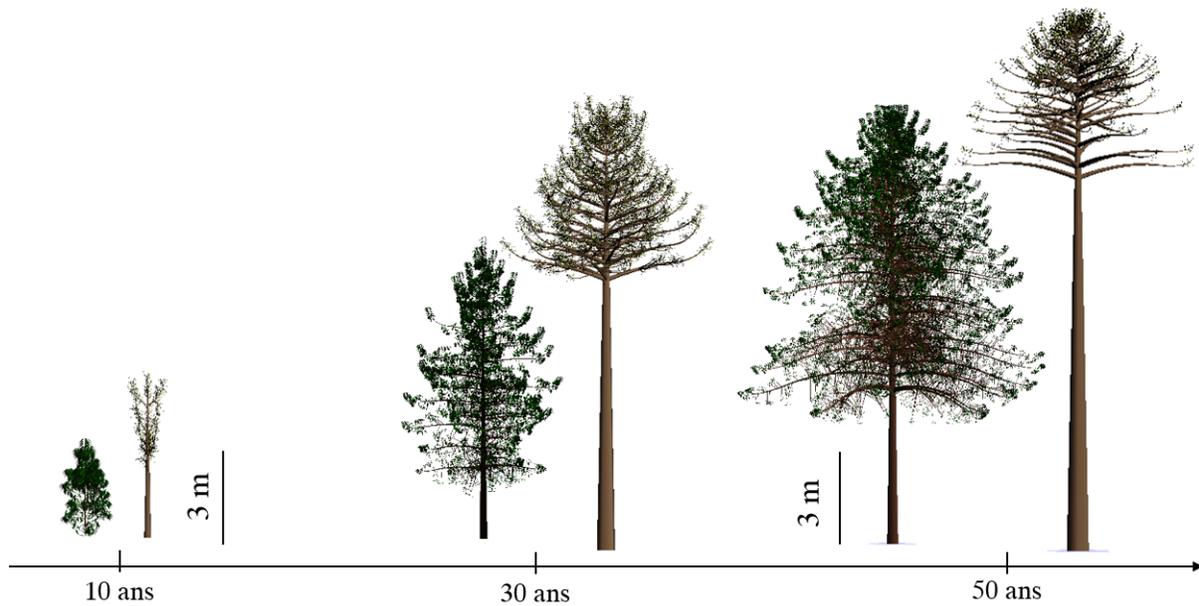


FIGURE 5.1 – Représentation des deux arbres simulés à différents âges. À gauche le merisier (feuillu), *Prunus avium* L. À droite, le pin maritime (résineux) *Pinus pinaster* Aiton.

5.2.2 Méthode de calcul de l'histoire du chargement pondéral

A chaque année correspond une nouvelle maquette. Une maquette est constituée d'un ensemble d'unités de croissance (appelées UC), qui sont des tronçons de cônes, organisés hiérarchiquement par leur ordre : 2 pour le tronc, 3 pour les branches directement insérées sur le tronc, 4 pour les axes insérés sur les branches d'ordre 3, etc. Si ces unités de croissance sont définies par leur ordre, elles ont aussi un ensemble de déterminants, qui constituent leur identité numérique : un matricule, celui de l'unité parente (unité d'insertion), un diamètre de départ et d'arrivée, les coordonnées des centres des sections initiale et finale ainsi qu'une longueur. Il est important de noter que la description fournie par le logiciel AmapSim n'inclut pas de descripteur de la structure interne de la branche, notamment l'excentricité de croissance secondaire.

Par soucis de simplification, le centre de chaque section sera alors attribué à la position de sa moelle.

Afin de calculer les efforts dus au poids, les coordonnées du centre de gravité de chaque section est calculé. Pour cela, une suite d'unités de croissance ainsi que l'ensemble des éléments nécessaires au calcul sont représentés dans la figure 5.2. En appelant $D(z) = D_n + z(D_{n+1} - D_n)/L_n$ le diamètre à l'abscisse curviligne z , il vient :

$$O_n G_n = \frac{1}{V_n} \int_0^{L_n} \frac{\pi D(z)^2}{4} z dz$$

avec V_n le volume de l'unité n :

$$V_n = \int_0^{L_n} \frac{\pi D(z)^2}{4} dz$$

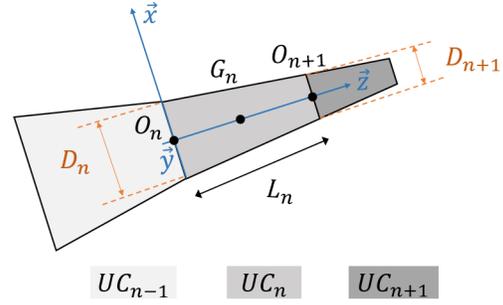


FIGURE 5.2 – Représentation d'une suite d'unités de croissance. UC_n représente la n -ième unité de croissance, G_n son centre de gravité, L_n sa longueur, O_n le centre de sa section amont, O_{n+1} de sa section aval. D_n, D_{n+1} représentent les diamètres de ces deux sections.

En écrivant $\psi = \frac{D_{n+1} - D_n}{D_n}$, on obtient, par changement de variable $\kappa = L_n/z$:

$$\begin{aligned} V_n &= \frac{\pi D_n^2 L_n}{4} \int_0^1 (1 + \psi \kappa)^2 d\kappa \\ &= \frac{\pi D_n^2 L_n}{4} \left(1 + \psi + \frac{\psi^2}{3} \right) \end{aligned}$$

$$O_n G_n = \frac{1}{V_n} \frac{\pi D_n^2 L_n^2}{4} \left(\frac{1}{2} + \frac{2\psi}{3} + \frac{\psi^2}{4} \right)$$

D'où on en déduit :

$$O_n G_n = \frac{L_n}{2} \left(\frac{1 + \frac{4}{3}\psi + \frac{1}{2}\psi^2}{1 + \psi + \frac{1}{3}\psi^2} \right) \quad (5.1)$$

Le calcul de l'effort normal \vec{N} et du moment de flexion vertical \vec{M} suit une procédure récursive inverse. Elle consiste à parcourir un axe depuis son unité de croissance la plus récente à la plus ancienne. Chaque année, l'unité n subit, au niveau de son centre de gravité, la moitié de son poids propre ainsi que le poids de tous ses descendants, directs et indirects. De même, elle subit le moment de flexion de sa moitié aval, ainsi que le moment de flexion de tous ses

descendants. La démarche est représentée dans la figure 5.3. Une fois calculés dans le repère absolu, les efforts sont projetés dans le repère local $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

Les chargements s'écrivent :

$$\vec{N}_n = \frac{1}{2}m_n\vec{g} + \sum_{k>n} m_k\vec{g} \quad (5.2)$$

$$\vec{M}_n = \overrightarrow{G_n G'_n} \wedge \left(\frac{1}{2}m_n\vec{g} \right) + \sum_{k>n} \overrightarrow{G_n G_k} \wedge (m_k\vec{g}) \quad (5.3)$$

avec \vec{g} l'accélération de la pesanteur, m_n la masse de l'unité n , G'_n le centre de gravité de la moitié avale de l'unité n .

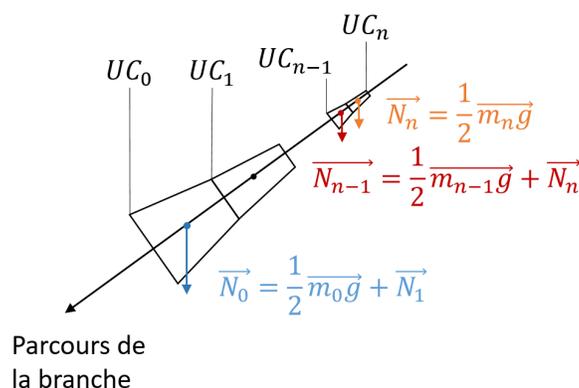


FIGURE 5.3 – Procédure de calcul des éléments de chargement. m_n désigne la masse de l' UC_n , \vec{N}_n l'effort induit par la masse de l'axe aval à l'unité n , \vec{g} le vecteur accélération de la gravité.

5.2.3 Choix et caractérisation des branches

Dans ce travail, nous nous intéressons aux branches directement insérées sur le tronc (ordre 3), qui ont eu le temps de développer un historique de chargement conséquent. Ainsi pour les deux essences, seulement les branches d'au moins 20 ans sont sélectionnées. Cela correspond à un échantillon de 33 branches pour *P. pinaster* et 45 pour *P. avium*. La caractérisation géométrique des deux échantillons est résumée dans le tableau 5.1.

En termes d'orthotropie, les branches présentent très peu de variabilité : au degré près, les angles d'insertion à l'état final sont identiques. Le merisier présente une plus grande variabilité que le pin maritime, avec un écart type de 17,7% (resp. 8,5%) sur les longueurs (resp. rayon) contre 7,5% (resp. 5,7%) pour le pin.

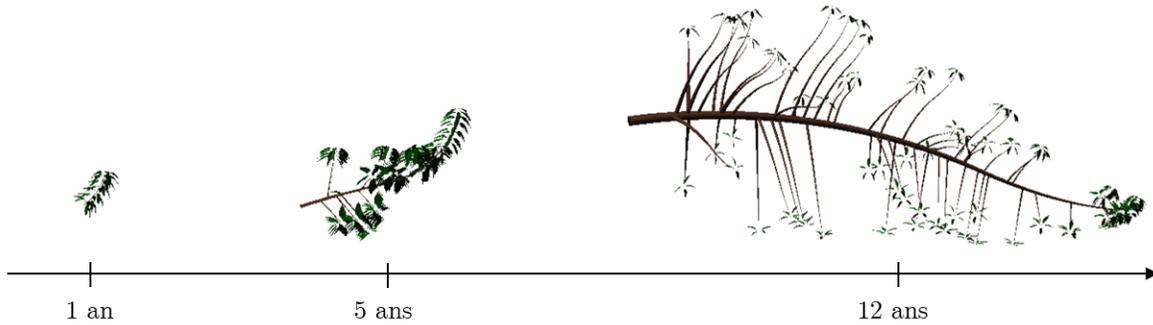
Dans un deuxième temps, les efforts et moments de chargement ont été calculés pour chacune des branches. Les lois d'allométries correspondantes $M, N = f(R)$ (eq. 4.23) ont été établies par régression en loi puissance. Les régressions ont été obtenues grâce à la bibliothèque SciPy

TABLEAU 5.1 – Distribution géométrique des branches étudiées.

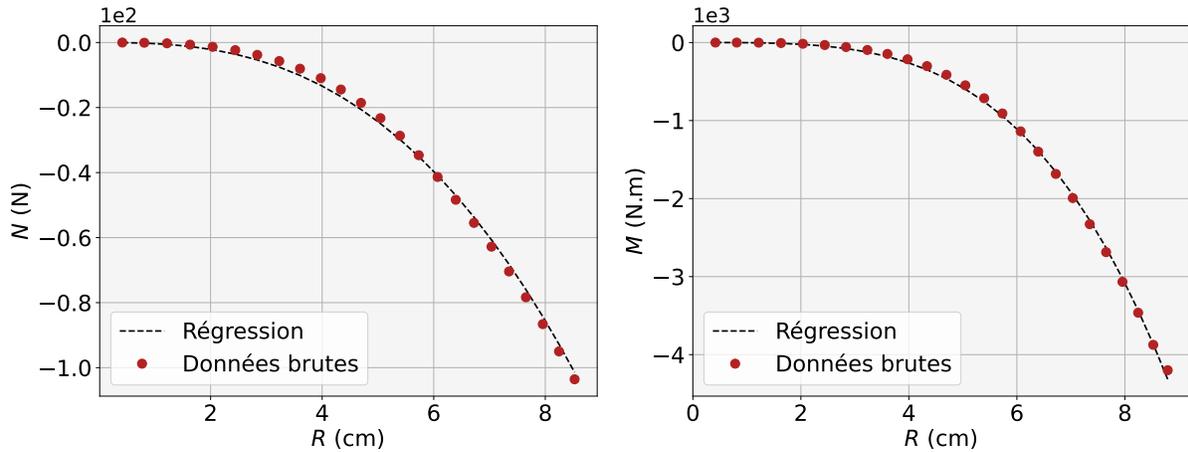
Espèces	L (m)	r (m)	γ (°)
<i>Pinus pinaster</i>	$5,3 \pm 0,4$	$5,2 \pm 0,3$	$20 \pm 0,01$
<i>Prunus avium</i>	$7,9 \pm 1,4$	$8,1 \pm 0,7$	$10 \pm 0,05$

L est la longueur (m), r le rayon à l'insertion (cm) et γ l'angle d'insertion sur le tronc (°).

[Virtanen et al. (2020)] de Python. La figure 5.4 représente l'évolution morphologique d'une branche ainsi qu'un exemple de variation $N, M = f(R)$.



(a) Exemple d'évolution du profil d'une branche.



(b) Exemple de variations allométriques du chargement $N = f(R)$.

(c) Exemple de variations allométriques du moment de flexion $M = f(R)$.

FIGURE 5.4 – Exemple d'évolution d'une branche et représentation des variations allométriques de chargement pondéral (à l'insertion de la branche sur le tronc).

Les figures 5.4b et 5.4c témoignent que les régressions en loi puissance sont bien adaptées aux variations du chargement. Pour chaque branche, les coefficients allométriques $\lambda_{N,M}$ et $\nu_{N,M}$ ont été calculés, et leur distribution est résumée dans le tableau 5.2.

TABLEAU 5.2 – *Distribution des coefficients allométriques de chargement*

Espèces	λ_M (N.m ^{1-ν_M})	ν_M	λ_N (N.m ^{-ν_N})	ν_N
<i>Pinus pinaster</i>	$(-2,3 \pm 1,7) \cdot 1e6$	$3 \pm 0,3$	$(-1,2 \pm 0,7) \cdot 1e5$	$2,3 \pm 0,2$
<i>Prunus avium</i>	$(-2,2 \pm 1,1) \cdot 1e7$	$3,6 \pm 0,1$	$(-7,2 \pm 5,7) \cdot 1e6$	$2,7 \pm 0,2$

$\lambda_{M,N}$ sont proportionnels au chargement, $\nu_{M,N}$ sont des indicateurs de la cinétique de croissance secondaire. Ces coefficients interviennent dans les allométries $N(R)$, $M(R)$ (équation 4.23).

Les données montrent que la distribution des coefficients puissance ν est relativement homogène, avec un écart type inférieur à 10% pour chacune des deux espèces. Cette variabilité est du même ordre de grandeur que les déterminants géométriques évoqués ci-dessus. En revanche les coefficients λ présentent une très grande variabilité (coefficient de variation supérieur à 50%).

Pour les coefficients du moment de flexion, cette variabilité est représentée (figure 5.5) en fonction de trois déterminants géométriques : le rayon de la branche à l'insertion R , sa longueur L et sa position dans le houppier H . De cette grille de représentation, deux comportements distincts sont à différencier :

1. *P. pinaster* (figure 5.5a) : le couple (λ_M, ν_M) trouve une bonne corrélation. Une branche plus chargée (λ important) a une cinétique de croissance « plus tardive » (ν_M important) : le développement en diamètre se fait moins vite. En revanche, aucun de ces deux déterminants ne semble corrélé significativement au rayon ou à la longueur. Le chargement d'une branche ne se restreindrait pas aux dimensions de son axe principal ! En revanche, la position dans le houppier semble un peu plus corrélée au chargement subi, les branches de bas de houppier subissant les chargements les plus importants.
2. *P. avium* (figure 5.5b) : comme pour *P. pinaster*, le couple (λ_M, ν_M) est positivement corrélé. En revanche, les schémas de variations de ces marqueurs semblent dépendre des déterminants géométriques. Notamment, en deçà d'un niveau seuil $(R, L) \approx (7,5 \text{ cm}, 8 \text{ m})$, les coefficients ont une distribution relativement homogène. Passé ce seuil, l'intervalle de variation augmente significativement (d'un facteur supérieur à 3 pour λ_M). A ce stade d'interprétation des données des maquettes, il est prématuré de chercher une raison à la présence de ces seuils. Une fois les seuils passés, les corrélations sont négatives : cela montre cependant que ce ne sont pas les branches ayant les plus gros axes principaux qui subissent les chargements les plus importants. Cela met aussi en évidence l'importance d'autres marqueurs, comme la ramification. Enfin, résultat un peu contre intuitif, et qui diffère par ailleurs de la distribution de chez *P. pinaster* : les

branches les plus chargées sont les branches les plus hautes ($H > 10\text{m}$). Les branches les moins chargées sont celles de « milieu de houppier » ($7 - 10\text{m}$).

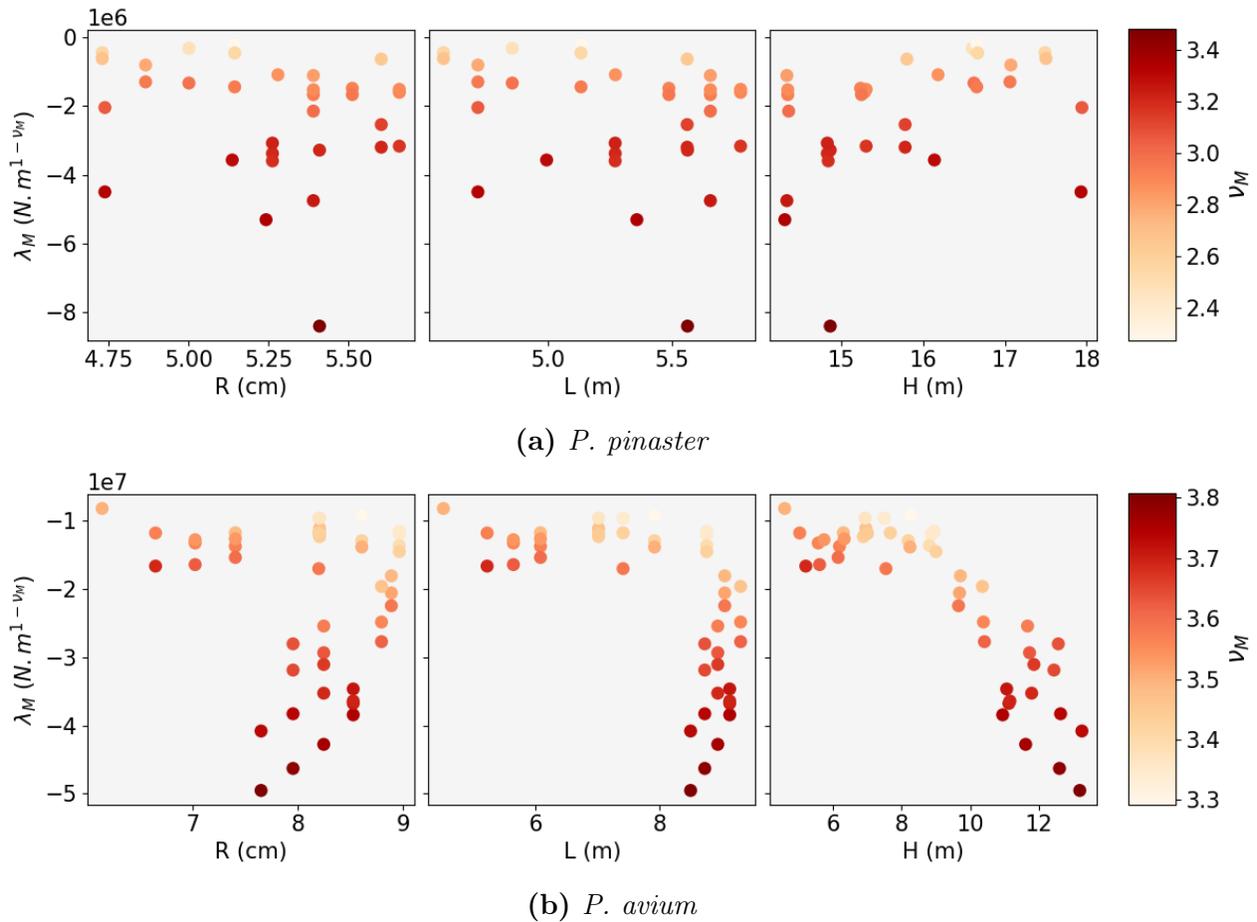


FIGURE 5.5 – Variation des coefficients allométriques (λ_M, ν_M) de chacune des essences en fonction de différents marqueurs : rayon à l’insertion R , longueur de la branche L , hauteur d’insertion h .

Les corrélations entre les coefficients (λ, ν) et les dimensions (R, L) de l’axe principal d’une branche ne sont ni évidentes, ni intuitives, ni communes aux deux espèces étudiées, mettant en évidence l’importance d’autres marqueurs importants dans le dimensionnement des branches, dont la ramification fait très certainement partie. Les variations de ces coefficients en fonction de la position dans le houppier est aussi intéressante, et montre que l’idée selon laquelle les branches subissant le chargement le plus important sont nécessairement les plus vieilles est à nuancer, et pourrait être espèce-dépendante.

5.3 Application du modèle à l'étude des stratégies de redressement : cas feuillu vs résineux

Nous nous sommes ici focalisé, dans chaque arbre, à la branche présentant les chargements les plus importants. Les caractéristiques de ces deux branches particulières sont résumées dans le tableau 5.3.

TABLEAU 5.3 – *Caractéristiques des branches choisies pour l'étude mécanique.*

Espèces	R (cm)	L (m)	λ_M (N.m $^{1-\nu_M}$)	ν_M	λ_N (N.m $^{-\nu_N}$)	ν_N
<i>Pinus pinaster</i>	5,5	5,5	$-8 \cdot 1e6$	3,4	$-3 \cdot 1e5$	2,6
<i>Prunus avium</i>	8	8,5	$-5 \cdot 1e7$	3,8	$3 \cdot 1e6$	3

R est le rayon à l'insertion, L la longueur totale de la branche. $\lambda_{M,N}$ sont proportionnels au chargement, $\nu_{M,N}$ sont des indicateurs de la cinétique de croissance secondaire. Ces coefficients interviennent dans les allométries $N(R)$, $M(R)$ (équation 4.23).

5.3.1 Formulation du problème

Le nombre de configurations possibles étant considérable, nous avons ici fixé quelques paramètres. En particulier, nous avons adopté un scénario d'orientation de croissance stationnaire. En d'autres termes, cela signifie que, quelques soient les tropismes en jeu, la branche garde la même orientation tout au long de sa croissance. Dans notre cas, nous avons choisi comme inclinaison constante les angles atteints par les branches étudiées dans leur état final. Cela correspond à un angle de 80° (par rapport à la verticale) pour les branches du pin et 70° pour le merisier. En termes mathématiques, cette stationnarité implique qu'il n'y a pas de changement de courbure dans le temps, soit encore $db/dR = 0$. Dans le système 4.21, cette condition de stationnarité donne une relation entre les moteurs internes e , σ_{BO} et σ_{BR} . En fixant deux de ces paramètres, la condition de stationnarité donne le troisième. Différents cas sont alors étudiés :

- 1. La déformation dans le bois de réaction permet le maintien de l'orientation.** Pour cela, la déformation de maturation du bois opposé μ_{BO} et l'excentricité e sont fixées constantes tout au long de la croissance. Pour mettre en évidence l'influence de l'excentricité de croissance secondaire sur la distribution des contraintes, différents cas sont étudiés. En particulier, une excentricité nulle $e = 0$ (le gradient de maturation est ici le seul moteur de redressement), ainsi que des excentricités épitrophiques et hypotrophiques $e = \pm 0,5$ (la stratégie de redressement est une combinaison des moteurs).
- 2. L'excentricité permet le maintien de l'orientation.** En suivant le même principe que le cas précédent, différentes valeurs de contraintes dans les bois de réaction seront

imposées. En particulier, pour le feuillu, les trois cas testés sont $\sigma_{BT} = \sigma_{BO}$ (pas de gradient de maturation, l'excentricité est le seul levier de redressement), $\sigma_{BT} = 2\sigma_{BO}$ et $\sigma_{BT} = 3\sigma_{BO}$ (stratégies combinées). Sur le même modèle, pour le résineux : $\sigma_{BC} = \sigma_{BO}$, $\sigma_{BC} = 0$ et $\sigma_{BC} = -\sigma_{BO}$.

La déformation de maturation dans le bois normal a été fixée en suivant les mesures reportées par Thibaut and Gril (2021). Cela correspond à des valeurs $\mu_{BO} \approx 700 \mu\text{def}$ pour le merisier et $\mu_{BO} \approx 400 \mu\text{def}$ pour le pin. Également, le module d'Young a été considéré comme homogène dans toute la section. Sa valeur a été obtenue en utilisant les corrélations des rigidités à l'état vert E_v et sec E_s (donnée par les mêmes travaux) : $E_v = 0,89E_s$. Les modules d'Young à l'état sec sont issus de la base TROPIX® du CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) [Gérard et al. (2011)]. La masse volumique du bois vert a été fixée égale à celle de l'eau $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$.

5.3.2 Résultats

P. avium, un exemple de feuillu

Les simulations des champs de contraintes dans les sections pour chacun des moteurs isolés sont représentés dans la figure 5.6. La distribution des contraintes de croissance sur toute la section (à l'insertion de la branche) y est observée. Dans la figure 5.6a, c'est la contrainte dans le bois de tension qui permet le maintien de l'orientation, tandis que c'est l'excentricité qui joue ce rôle dans la figure 5.6b. Dans chacun des cas, on retrouve de la tension en périphérie, et de la compression au centre. On retrouve dans la figure 5.6a un profil centré sur la moelle

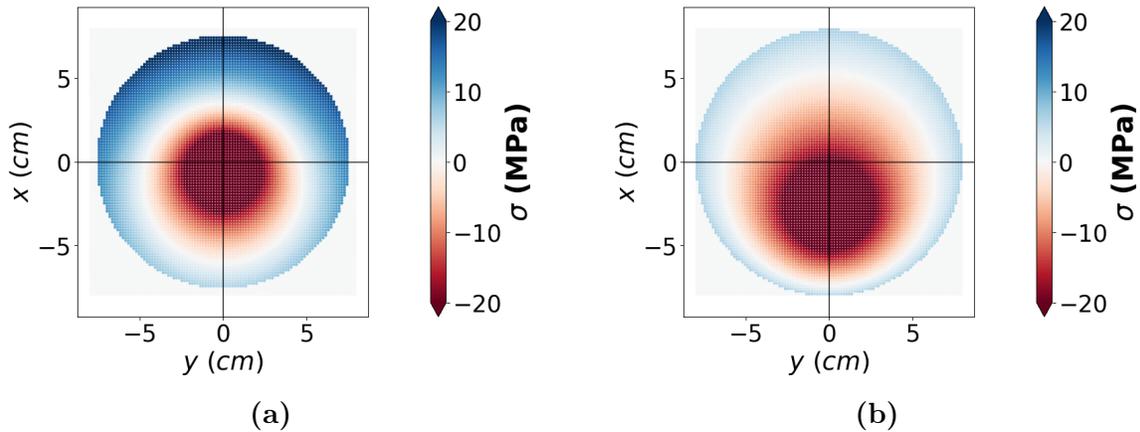


FIGURE 5.6 – *P. avium*. Représentation du champs de contraintes à l'insertion des branches . Deux moteurs différents sont utilisés : a) Déformation de maturation dans le bois de tension, b) Asymétrie de croissance secondaire (excentricité).

(pas d'excentricité), avec un gradient de tension en périphérie : environ 20 MPa sur la partie

la partie supérieure de la branche pour environ 6 MPa sur la partie inférieure. A contrario, dans la figure 5.6b, la distribution est excentrée, et il n'y a pas de gradient de tension en périphérie.

Les figures 5.7 et 5.8, illustrent les conséquences des effets combinés. Deux autres types de représentations sont proposés. Tout d'abord, en figure 5.7a et 5.8a, les profils de contraintes extrapolés sur l'axe $y = 0$. Ensuite, en figure 5.7b et 5.8b, l'évolution du paramètre moteur du maintien postural tout au long de la croissance de la branche. Pour plus de lisibilité, la visualisation des profils de contraintes est limitée en compression (-60 MPa). Dans la figure

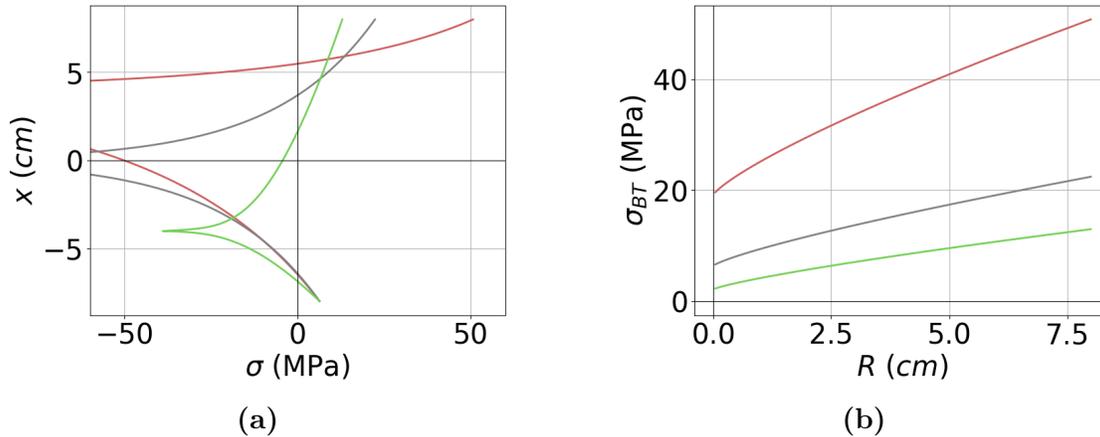


FIGURE 5.7 – *P. avium*. Représentation des profils de contraintes sur l'axe $y=0$ (a) et de l'évolution de la contrainte associée dans le bois tension (b), pour différents scénarii : gris, section centrée ($e = 0$) ; vert, croissance épitrophique ($e = 0,5$) ; rose, croissance hypotrophique ($e = -0,5$).

5.7, c'est la contrainte dans le bois de tension σ_{BT} qui assure l'orientation, pour différentes excentricités imposées. Les résultats confirment l'intuition naturelle : plus il y a de volume consacré au bois de tension, et plus la tension en périphérie est faible. Ainsi une excentricité épitrophique (courbe verte sur la figure 5.7a) permet de réduire la tension en périphérie. On remarque également que cette diminution de la tension en périphérie s'assortit d'une plus faible contrainte en compression au centre. De même, on observe sur la figure 5.7b que la contrainte dans le bois de tension augmente au fur et à mesure que la branche prend du poids. Également, la cinétique d'évolution de cette contrainte n'est pas la même suivant les configurations étudiées ; la pente étant plus forte au fur et à mesure de l'épitrophicité de l'excentricité.

Lorsque l'excentricité assure le maintien de l'orientation, on observe les mêmes types de profils de contraintes (figure 5.8a). Cependant, les évolutions de l'excentricité 5.8b présentent des profils particuliers, avec une chute dans les premiers stades de croissance. Ceci s'explique par la formulation du scénario : la branche est ici programmée pour maintenir son orientation dès le début de sa croissance. Dans les premiers stades, l'axe est léger et le chargement très petit devant le gradient de contraintes $\sigma_{BT} - \sigma_{BO}$ imposé, qui a tendance à la courber vers

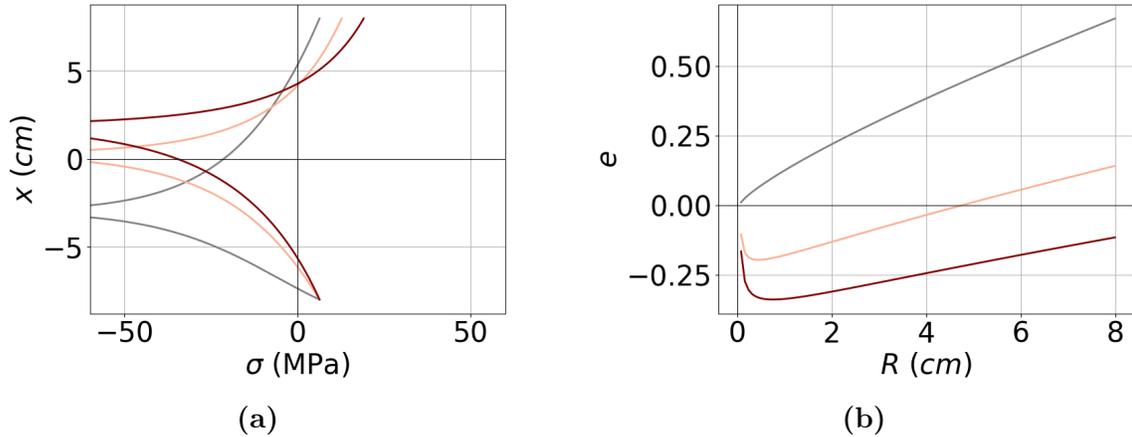


FIGURE 5.8 – *P. avium*. Représentation des profils de contraintes sur l'axe $y=0$ (a) et de l'évolution d'excentricité associée (b), pour différents scénarii : gris, pas de bois de réaction ($\sigma_{BT} = \sigma_{B0}$), rose, léger gradient de maturation ($\sigma_{BT} = 2\sigma_{B0}$); rouge, gradient important ($\sigma_{BT} = 3\sigma_{B0}$).

le haut. Pour maintenir l'orientation, l'excentricité doit contrer cette action, ce qui explique l'excentricité décroissante (et hypotrophique) observée les premières années. Passé ce stade particulier, la branche devient suffisamment lourde pour que le gradient de contraintes imposé ne permette plus le maintien de l'orientation. C'est à partir de cet instant que l'excentricité contrecarre l'effet du poids : elle augmente alors pour devenir épitrophique.

P. pinaster, un exemple de résineux

Une étude jumelle à celle présentée ci-dessus a été effectuée pour le cas de *P. pinaster*. Dans la figure 5.9 sont représentées les contraintes de croissance pour chacun des effets seuls, formation de bois de compression (figure 5.9a) ou excentricité (figure 5.9b).

Dans le premier cas, on observe à nouveau un gradient en périphérie, de la tension sur le côté supérieur jusqu'à de la compression sur le côté inférieur. Il n'y a dans ce profil pas de pic en compression à la moelle. L'allure du profil semble « en créneau », avec de la tension sur toute la partie supérieure et toute la compression sur le côté inférieur, ce qui est confirmé par la courbe en gris sur la figure 5.10a (qui est l'extrapolation de la figure 5.9a sur l'axe central $y=0$). En revanche, lorsque l'excentricité est seul moteur du maintien de l'orientation (figure 5.9b), on observe un profil plus classique : une section excentrée, une compression au centre et une contrainte en tension uniforme en périphérie.

Les résultats pour les effets combinés sont présentés dans les figures 5.10 et 5.11. Pour plus de lisibilité, la visualisation des profils de contraintes est limitée en compression (-20 MPa). Lorsque la contrainte dans le bois de compression est le moteur principal du maintien de l'orientation (figure 5.10), l'excentricité ne semble pas avoir d'influence majeure sur les contraintes en périphérie mises en jeu, qui ne varient que de quelques mégapascals entre

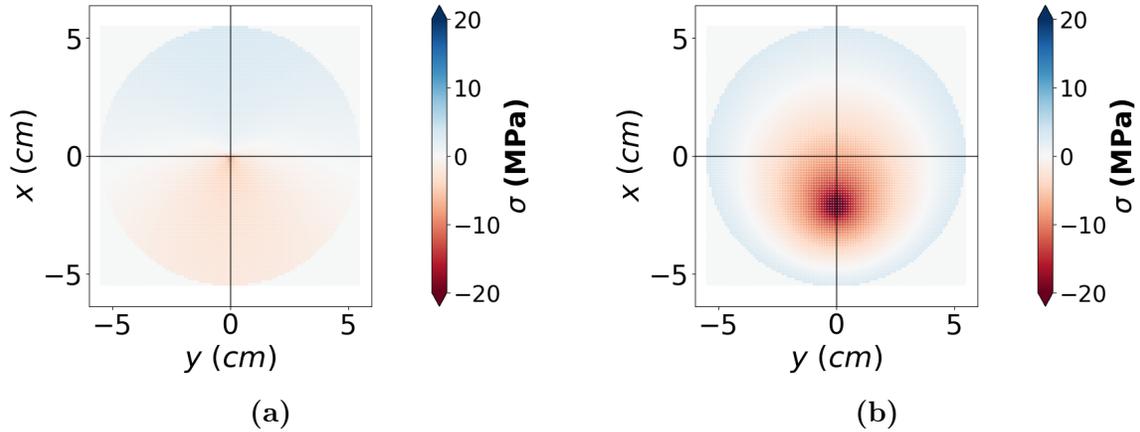


FIGURE 5.9 – *P. pinaster*. Représentation du champ de contraintes à l’insertion des branches étudiées. Deux différents moteurs sont utilisés : a) Déformation de maturation dans le bois de compression, b) Asymétrie de croissance secondaire (excentricité).

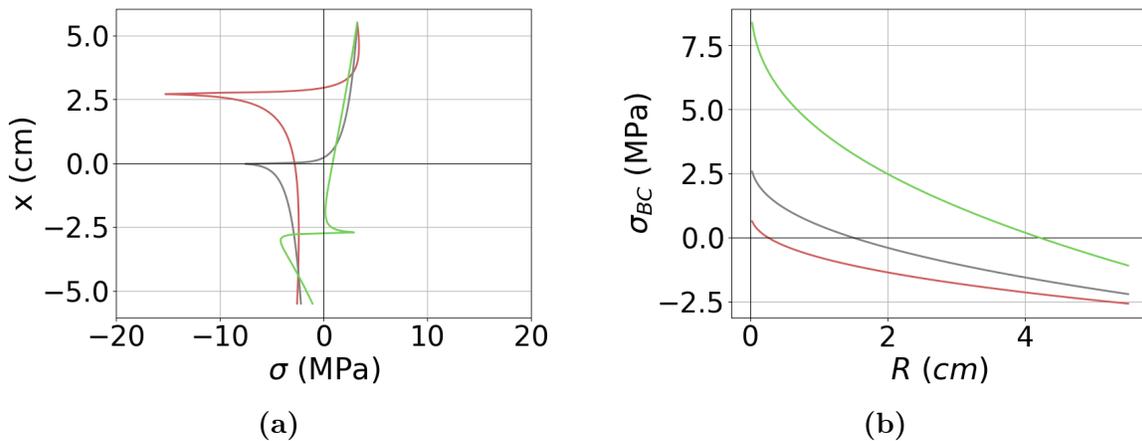


FIGURE 5.10 – *P. pinaster*. Représentation des profils de contraintes sur l’axe $y=0$ (a) et de l’évolution de la contrainte associée dans le bois compression (b), pour différents scénarii : gris, section centrée ($e = 0$); vert, croissance épitrophique ($e = 0,5$); rose, croissance hypotrophique ($e = -0,5$).

les deux extrêmes (courbe verte et rouge dans la figure 5.10a). Cependant, les variations d’excentricité semblent conditionner l’allure du profil, allant du profil « classique » (courbe rouge sur la figure 5.10a) à un profil avec de la tension à coeur (courbe verte) en passant par un profil « crénelé » mentionné ci-dessus (courbe grise). Comme pour le feuillu, la contrainte dans le bois de compression augmente avec les dimensions de la branche, mais sa cinétique semble diminuer avec le temps. Lorsque l’excentricité est le moteur principal du contrôle postural, on retrouve alors des profils plus classiques (figure 5.11a) et les profils d’excentricité 5.11b sont similaires à ceux obtenus pour le cas du merisier. Dans les stages jeunes, le scénario

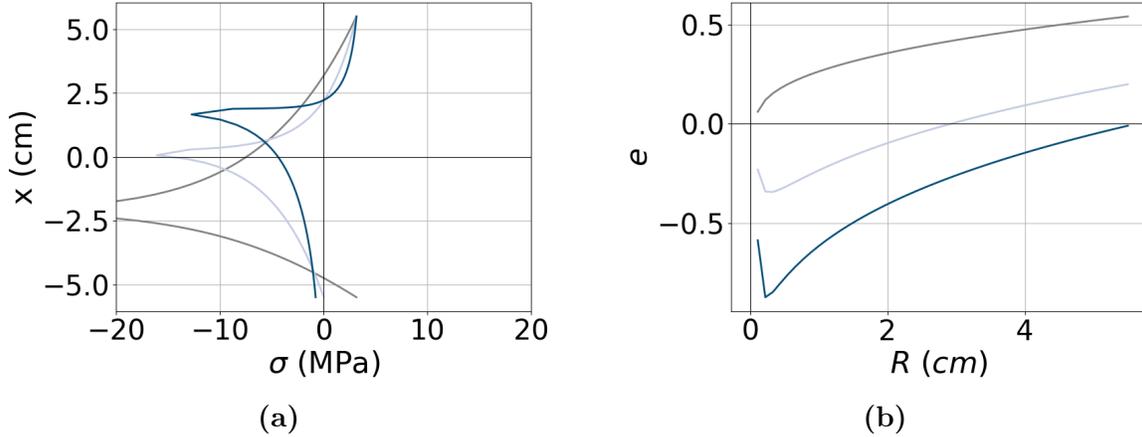


FIGURE 5.11 – *P. pinaster*. Représentation des profils de contraintes sur l’axe $y=0$ (a) et de l’évolution d’excentricité associée (b), pour différents scénarii : gris, pas de bois de réaction ($\sigma_{BC} = \sigma_{B0}$); bleu clair, léger gradient de maturation ($\sigma_{BC} = 0$); bleu foncé, gradient important ($\max(\sigma_{BC})$).

$\sigma_{BC} = -\sigma_{B0}$ était trop irréaliste (avec un pic d’excentricité compensatrice inférieur à -1!). La valeur maximale acceptable en compression a donc été prise en compte (environ -2 MPa).

5.3.3 Discussion

P. avium

Ces simulations montrent que chacun des moteurs isolés permet le maintien de l’orientation initiale, en assurant des profils de contraintes théoriquement réalistes (à l’exception de la zone autour de la moelle), et loin des caractéristiques de rupture du bois vert [Kretschmann (2010)]. L’artefact en compression (valeur irréaliste) proche de la moelle s’explique par la loi de comportement choisie (loi purement élastique donc une absence de palier plastique en compression).

Cependant, même si les ordres de grandeurs des contraintes sont réalistes, ce n’est pas nécessairement le cas des moteurs. Par exemple, en l’absence de bois de réaction, l’excentricité locale s’élève à 0,8 (courbe grise dans la figure 5.8b), ce qui est différent de ce qui a été observé dans la littérature : sur une dizaine de branches plagiotropiques de *Koelreuteria elegans* (Seem.) A.C.Sm., d’un diamètre moyen de 5,2cm, Hung et al. (2017) ont mesuré une excentricité moyenne $\bar{e} = -0,31 \pm 0,25$. L’excentricité mesurée dans ces travaux est une excentricité qui intègre toute la vie de la branche, contrairement aux simulations, où l’excentricité est locale. Obtenir une excentricité locale avec une norme de 0.8 n’est donc pas irréaliste. Cependant, les excentricités observées dans la littérature sont, à l’image de celles mesurées par Hung et al. (2017), hypotrophiques : Tsai et al. (2012) a mesuré les excentricités des branches mentionnées ci-dessus en deux points, et Wang et al. (2010) a également effectué des mesures sur les branches de trois arbres de *Viburnum odoratissimum*

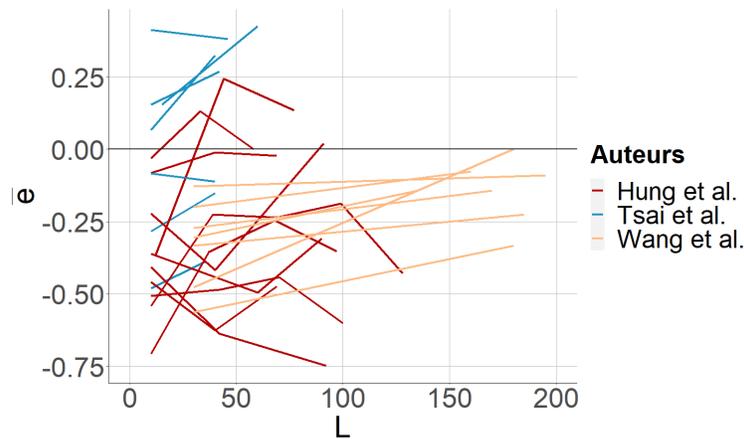


FIGURE 5.12 – Evolution longitudinale des excentricités moyennes \bar{e} observées dans les travaux de littérature. $L=0$ représente le point d'insertion de la branche. Plus d'une dizaine d'essences de feuillu sont représentées.

var. *awabuki*. Leurs résultats sont présentés dans la figure 5.12 : si la distribution spatiale de l'excentricité semble variable, elle reste dans la plupart des cas hypotrophique. Cela suggère que si théoriquement l'excentricité peut jouer un rôle déterminant dans la tenue à la charge pondérale statique, ce n'est probablement pas le cas dans la nature. À ce sujet, les résultats d'une excentricité hypotrophique pour le feuillu (courbe rouge sur la figure 5.7a) montrent que la contrainte en périphérie augmente fortement avec l'hypotrophie de l'excentricité, mais les valeurs obtenues restent dans l'ordre de grandeur de ce qui a été mesuré dans la littérature. Même si cette situation est probablement défavorable pour la branche d'un point de vue mécanique, elle reste cependant tenable.

Ces résultats suggèrent que le rôle de l'excentricité chez le feuillu ne réside pas dans le dimensionnement mécanique de la branche à son poids propre. Plus que ça, l'excentricité chez les branches feuillues serait pour les essences mesurées dans un sens contraire à celui du contrôle postural. Ceci est différent du cas de l'excentricité dans les troncs et tiges inclinées, qui est en grande partie épitrophique, bien que n'expliquant qu'une fraction minimale de la courbure [Alméras et al. (2005)]. Ces résultats intéressants sur les effets contraires des actions conjuguées du bois de tension et de l'excentricité posent alors la question de l'origine de ces deux moteurs. Si leur action n'est pas coordonnée, *quid* de leur origine ?

P. pinaster

Tout d'abord, les ordres de grandeurs des contraintes mises en jeu sont bien inférieurs à ceux obtenus pour *P. avium*. Ceci s'explique par les chargements appliqués : il y a un facteur 10 entre le facteur λ_M du merisier et celui du pin ! Les effets de chaque facteur isolé (figure 5.9) mettent en évidence que le gradient de maturation est bien plus efficace que l'excentricité.

Pour assurer le même scénario de croissance, l'excentricité avoisine les 0.6 (courbe grise dans la figure 5.11b), tandis que la contrainte dans le bois de compression est très faible (courbe grise dans la figure 5.10b : $\mu_{BC} < 200 \mu_{def}$). De plus, l'excentricité n'est encore une fois pas dans le sens de ce qui est observé dans la pratique. Cependant, dans ce cas, la situation s'explique par le fait qu'en l'absence de bois de réaction, l'excentricité épitrophique est le seul moyen de contrecarrer l'effet de la gravité. C'est donc un scénario théorique qui manque de réalisme.

Lorsque la maturation est combinée à différentes excentricités imposées, les profils de contraintes sont homogènes, caractérisés par des valeurs en compression et en tension relativement faibles. Cette situation peut être optimale d'un point de vue de la résistance à la rupture de la branche, et sera discutée dans le chapitre suivant. Même si la variation d'excentricité influe peu sur les ordres de grandeurs des contraintes mises en jeu, elle change l'allure du profil, ouvrant des perspectives expérimentales intéressantes. Notamment, le profil en créneau n'a jamais été mesuré. Pourtant, les profils en créneau semblent efficaces d'un point de vue d'une optimisation mécanique (réduction des pics en tension et en compression, donc plus de sécurité vis-à-vis de valeurs seuils de rupture).

Lorsque l'excentricité est combinée à différents paliers de gradients de maturation (figure 5.11), celle-ci est épitrophique. Cela est contraire à ce qui est attendu pour le résineux, mais s'explique par le fait que la valeur absolue de la contrainte dans le bois de compression est toujours inférieure à celle dans le bois normal. Il est donc plus efficace pour la branche de privilégier le moteur du bois normal plutôt que celui du bois de compression. Pour obtenir une excentricité hypotrophique, il aurait fallu augmenter les niveaux de chargement, ou imposer des contraintes de compression plus élevées ; ce que notre scénario ne permettait pas, à cause de l'incompatibilité gradient de maturation/excentricité évoquée ci-dessus. Également, une des limites de l'approche est l'hypothèse sur l'homogénéité des modules. Alméras et al. (2005) ont étudié les variations des rigidités dans le bois de tension, compression et bois normal de troncs inclinés de 14 angiospermes et 3 gymnospermes. Il a été montré que pour les angiospermes, le module d'Young était en moyenne 15% plus élevé dans le bois de tension, tandis que pour les gymnospermes, le module du bois de compression était 38% plus faible. Cette hétérogénéité du module joue un rôle important dans le contrôle postural [Alméras et al. (2005); Huang et al. (2010); Hung et al. (2017)], et participe au maintien (si ce n'est au redressement) de l'orientation. Prendre un module homogène comme nous l'avons choisi conduit donc à faire abstraction d'un autre paramètre impliqué dans le redressement. Notamment, cette hypothèse pourrait s'ajouter au manque de réalisme du scénario et jouer un rôle (en particulier chez le résineux) dans les valeurs non réalistes d'excentricités trouvées.

5.3.4 Conclusion

Cette application simple du modèle mécanique développé donne d'importants résultats sur les effets qu'ont les deux moteurs du contrôle postural sur les profils de contraintes de croissance. Si ces deux exemples, sur deux essences, ne permettent pas de complètement géné-

raliser, on peut faire l'hypothèse, reconnue dans la littérature, que les mécanismes de base sont similaires pour beaucoup d'essences du groupe des angiospermes et de même pour les gymnospermes. Si pour le feuillu l'excentricité pourrait jouer un rôle important, les mesures démontrent que son rôle vient freiner celui des contraintes de maturation. Contrairement à celle des troncs inclinés, l'excentricité dans les branches aurait donc une utilité autre que celle du seul maintien de la posture en réponse au poids propre.

Chez le résineux, contrairement au feuillu, la capacité de maintien de l'excentricité est moins importante. Son rôle serait donc secondaire. Cependant, si elle ne modifie pas les ordres de grandeurs des contraintes mises en jeu, l'excentricité change la forme des profils de contraintes. De nouveaux profils ont été mis en évidence, dont certains pourraient conduire à un bénéfice mécanique vis-à-vis de la rupture. Enfin, les scénarii testés n'ont pas permis de montrer des schémas réalistes d'excentricité lorsque celle-ci est le moteur principal du maintien de l'orientation.

Plus globalement, ces résultats montrent que les variations des moteurs internes conditionnent de manière non négligeable l'état de contrainte de la branche. Ainsi au vu des possibilités de modélisation dont nous disposons, il devient maintenant important de pouvoir mesurer les variations spatio-temporelles de ces deux paramètres internes. Aujourd'hui, les techniques mises au point permettent une mesure des variations circonférentielles des déformations de maturation en périphérie surtout, mais les mesures de l'historique de ces contraintes dans la section sont rares (section 1.3.2). De plus, les mesures d'excentricité existantes se cantonnent généralement à une excentricité moyenne (l'excentricité finale, du dernier cerne), qui n'est pas le reflet de la trajectoire de l'excentricité au cours de la croissance mais une intégration dans le temps. Il devient donc important de connaître l'histoire de la construction d'une branche dans le temps. La partie suivante propose une avancée en ce sens : elle décrit deux protocoles de mesures exploratoires, qui ont été appliqués à un tronçon de branche de chêne. L'objectif est à terme de disposer d'un historique complet de ces deux déterminants mécaniques, pour pouvoir mieux comprendre le dimensionnement des branches en réponse à leur poids propre.

5.4 Mesures de l'évolution spatio-temporelle de l'excentricité et des déformations de maturation

5.4.1 Introduction

Deux types de mesures sont proposées : Tout d'abord l'excentricité, mesurée directement par analyse d'image sur des sections prélevées tout au long de l'axe. Ensuite, une évaluation indirecte des déformations de maturation. Celle-ci suit un protocole issu des travaux de Thibaut and Gril (2021). Ces derniers, s'appuyant sur les mesures d'une vingtaine d'arbres (de familles et types différents), ont montré qu'il y avait une bonne corrélation entre les valeurs de retrait longitudinal au séchage (entre l'état vert et anhydre) et les déformations de maturation. La figure 5.13 montre les corrélations obtenues pour les deux grands groupes d'arbres : résineux en rouge, feuillus en bleu. Nous avons donc utilisé cette corrélation pour estimer les déformations de maturation dans différentes zones de la section par des mesures de retrait longitudinal au séchage.

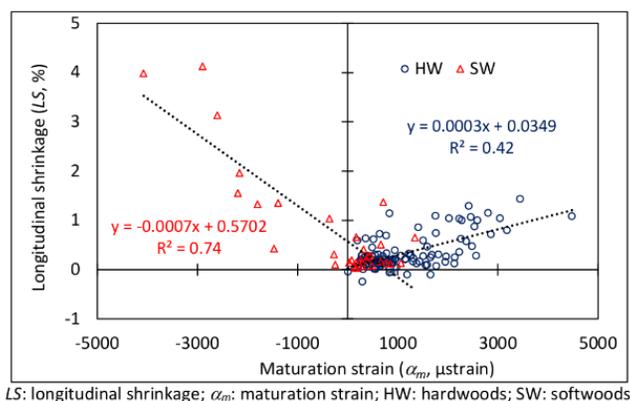


FIGURE 5.13 – Corrélation entre le retrait au séchage et les contraintes de maturation pour les feuillus (HW, en bleu) et les résineux (SW, en rouge). Extrait de Thibaut and Gril (2021).

Le retrait au séchage étant de l'ordre de quelques % (par exemple, <5% sur les mesures de Thibaut and Gril (2021)), la longueur de l'échantillon doit être suffisamment importante pour permettre une mesure correcte. Nous avons initialement choisi de prélever des échantillons de 10 cm de long, mais une seconde découpe nous a contraint à réduire la longueur d'un centimètre. Pour l'échantillonnage, une branche de chêne *Quercus pubescens* a été préalablement choisie. Le choix de l'essence a été un compromis entre plusieurs critères : il fallait une branche assez âgée, plagiotrope, avec le moins d'axes supérieurs possibles (limiter les embranchements, les noeuds), et dont les cernes sont facilement mesurables à l'oeil (nécessaire pour les mesures d'excentricité).

La branche choisie (longueur 6,5 m, rayon moyen à la coupe 3,5 cm, poids 50 kg) est photographiée dans la figure 5.14a. Deux types d'échantillons ont été prélevés :

1. Pour la mesure d'excentricité, des tranches de 2 cm d'épaisseur ont été sciées. À chaque abscisse de prélèvement, 2 tranches ont été extraites (une pour l'excentricité, et une jumelle pour une mesure exploratoire de la présence de bois de tension, non développée ici).
2. Pour les mesures de retrait au séchage, des tronçons de 10 cm de long ont été prélevés.

(a)



(b)

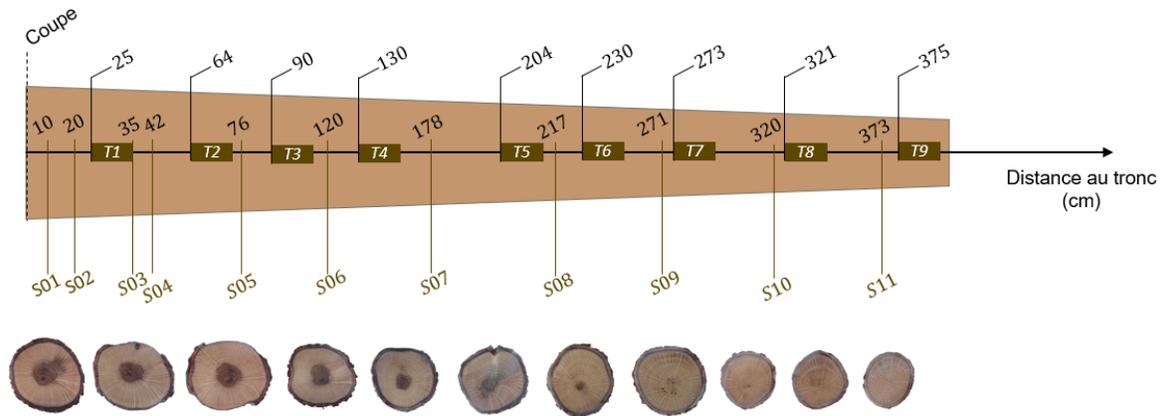


FIGURE 5.14 – a) Photo de la branche support de la mesure. b) Représentation de l'échantillonnage de la branche. Pour la mesure d'excentricité, 11 rondelles (S01-S11) ont été prélevées. Pour les déformations de maturation, 9 tronçons (T1-T9) ont été utilisés.

Les prélèvements ont été réalisés sur les quatre premiers mètres depuis l'insertion sur le tronc, distance à partir de laquelle une fourche importante ne permettait plus de distinguer clairement l'axe principal. Proche dans les premiers centimètres de la branche, les mesures ont ensuite été espacées d'environ 50 cm (modulo la présence de noeuds). Dans la figure 5.14b, le lecteur trouvera également un schéma complet de l'échantillonnage de la branche.

5.4.2 Mesure d'excentricité

Procédure de mesure

Les mesures successives d'excentricités ont été effectuées par Lucie Gourichon dans le cadre de son stage de M1. Les sections ont été poncées, puis photographiées (figure 5.15a) et analysées sous le logiciel Fiji [Schindelin et al. (2012)], via la procédure suivante :

1. Délimitation manuelle du contour de chaque cerne (figure 5.15b).
2. Identification du « bounding rectangle » (terminologie utilisée par Fiji pour désigner le plus petit rectangle contenant le cerne). Par mesure des côtés de ce rectangle, les rayons r_{xn} et r_{yn} du n -ième cerne sont estimés (figure 5.15c).
3. Mesure des coordonnées (x_m, y_m) de la moelle (figure 5.15d).
4. Calcul des coordonnées (x_n, y_n) du centre de gravité associé au n -ième cerne (figure 5.15d).

Les excentricités verticale et horizontale ont été mesurées, mais dans ce travail seule l'excentricité verticale (en réponse au chargement de la gravité) est présentée.

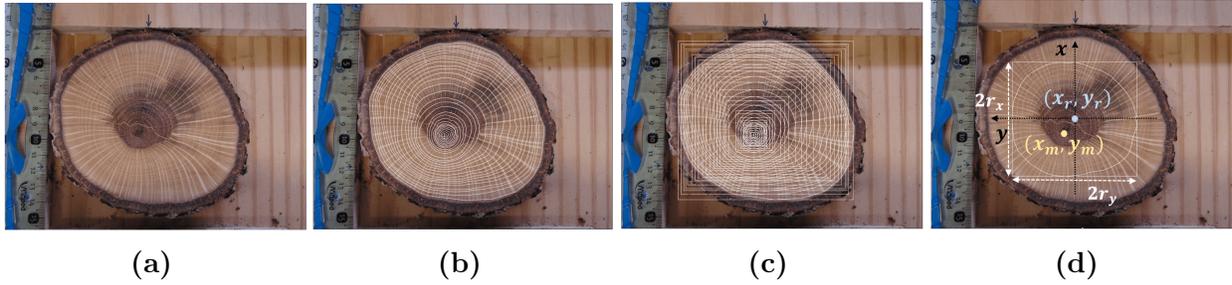


FIGURE 5.15 – Procédure de mesure de l'excentricité. a) Section poncée. b) Détourage manuel de chaque cerne. c) Calcul du « bounding rectangle ». d) Mesure des coordonnées de la moelle (x_m, y_m) , du barycentre du cerne n (x_n, y_n) , ainsi que ses rayons vertical r_{xn} et horizontal r_{yn} .

L'excentricité moyenne \bar{e}_n (intégrant toutes les excentricités précédentes $e_{i, i \leq n}$) du cerne n est obtenue par calcul direct :

$$\bar{e}_n = \frac{x_m - x_n}{r_n} \quad (5.4)$$

d'où l'on déduit l'excentricité locale e_n résultant de l'asymétrie de croissance secondaire du cerne n :

$$e_n = \frac{1}{\Delta r_n} \left[r_n \bar{e}_n - \sum_{k=1}^{n-1} e_k \Delta r_k \right] \quad (5.5)$$

avec r_n le rayon du cerne n , x_n la coordonnée verticale du centre de gravité du n -ième cerne, x_m celle de la moelle et $\Delta r_n = r_n - r_{n-1}$ l'incrément de rayon.

Premiers résultats et conclusion

L'âge de la branche a été déterminé à 27 ans. L'évolution temporelle de l'excentricité locale par section est représentée dans la figure 5.16. Les résultats montrent tout d'abord un important intervalle de variation, passant d'une excentricité hypotrophique de 0.75 à une excentricité épitrophique de -0.5 ! Cela souligne le côté fort de l'hypothèse de la constance de l'excentricité usuellement formulée dans la littérature. Malgré ces fortes variations, deux grandes trajectoires temporelles sont distinguées, et dissociées dans les figures 5.16a et 5.16b.

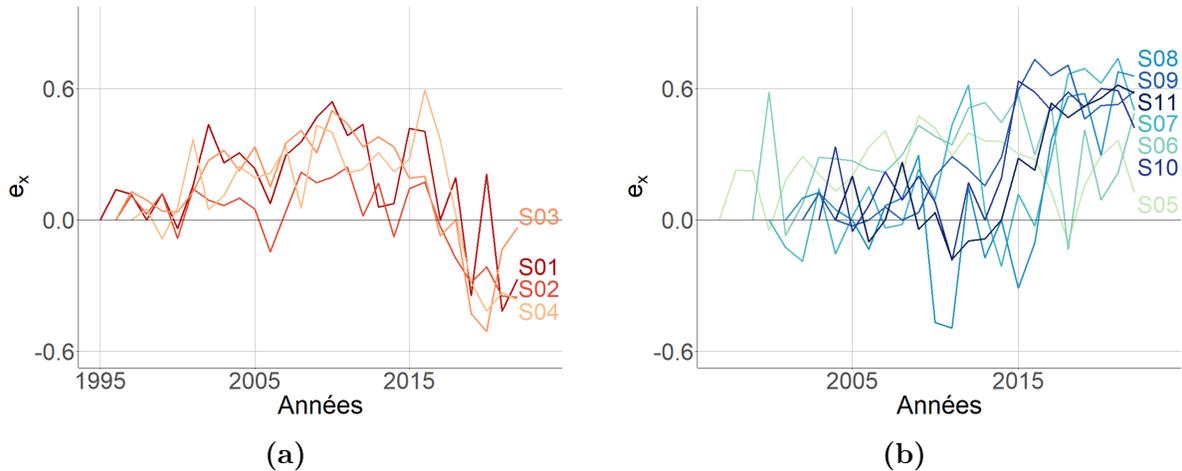


FIGURE 5.16 – Évolution temporelle de l'excentricité locale de chaque section transversale. Deux types de trajectoires sont distinguées : a) les 4 premières sections, dont l'excentricité est épitrophique sur les années 2000-2018, puis chute brutalement pour devenir hypotrophique ; b) les 6 suivantes, dont le caractère épitrophique est globalement croissant.

1. Sur les 50 premiers centimètres de la branche (sections S01-S04), trois phases sont identifiées. Tout d'abord, dans les premiers stades de croissance, l'excentricité est faible ($|e| < 0,1$), et peut être hypotrophique comme épitrophique. Puis l'excentricité augmente pour atteindre un plateau entre les années 2005 et 2015, avant de chuter brusquement et devenir hypotrophique à partir de l'année 2018.
2. Sur la portion de la branche restante, deux phases sont identifiables. Tout d'abord, comme sur la première partie de la branche, une phase de début de croissance, marquée par une excentricité faible, épitrophique comme hypotrophique ; puis une augmentation jusqu'à atteindre un plateau épitrophique sur les dernières années.

Pour chacune des trajectoires, le rôle de l'excentricité durant les premiers stades de croissance semble secondaire. Ensuite, l'excentricité dans la zone basale contrecarre l'effet de la gravité durant une période d'à peu près 10 ans, pour finir par créer un affaissement dans les dernières années. La partie centrale et distale de la branche est caractérisée par une excentricité croissante, contribuant à lutter contre la gravité. Cependant, malgré les tendances générales,

de grandes variations annuelles sont à noter, suggérant que l'excentricité pourrait être plus une variable d'ajustement que de maintien postural. En moyenne, l'excentricité observée est en effet épitrophique : en cela, nos résultats font figure d'exception par rapport aux mesures trouvées dans la littérature [Wang et al. (2009); Tsai et al. (2012); Hung et al. (2017)]. Dans le prochain chapitre, les excentricités moyennes de branches dans différentes configurations sont mesurées. Il s'avère que le caractère épitrophique fait encore figure d'exception. Il convient donc d'être prudent quand aux éventuelles corrélations entre l'excentricité et la charge de gravité.

L'évolution spatiale de l'excentricité locale est proposée dans la figure 5.17. À l'image de l'évolution temporelle, celle-ci est également hautement variable. Sa trajectoire ne semble pas suivre de schéma particulier, sauf sur les 5 dernières années, où elle tend vers un plateau épitrophique (2018-2020).

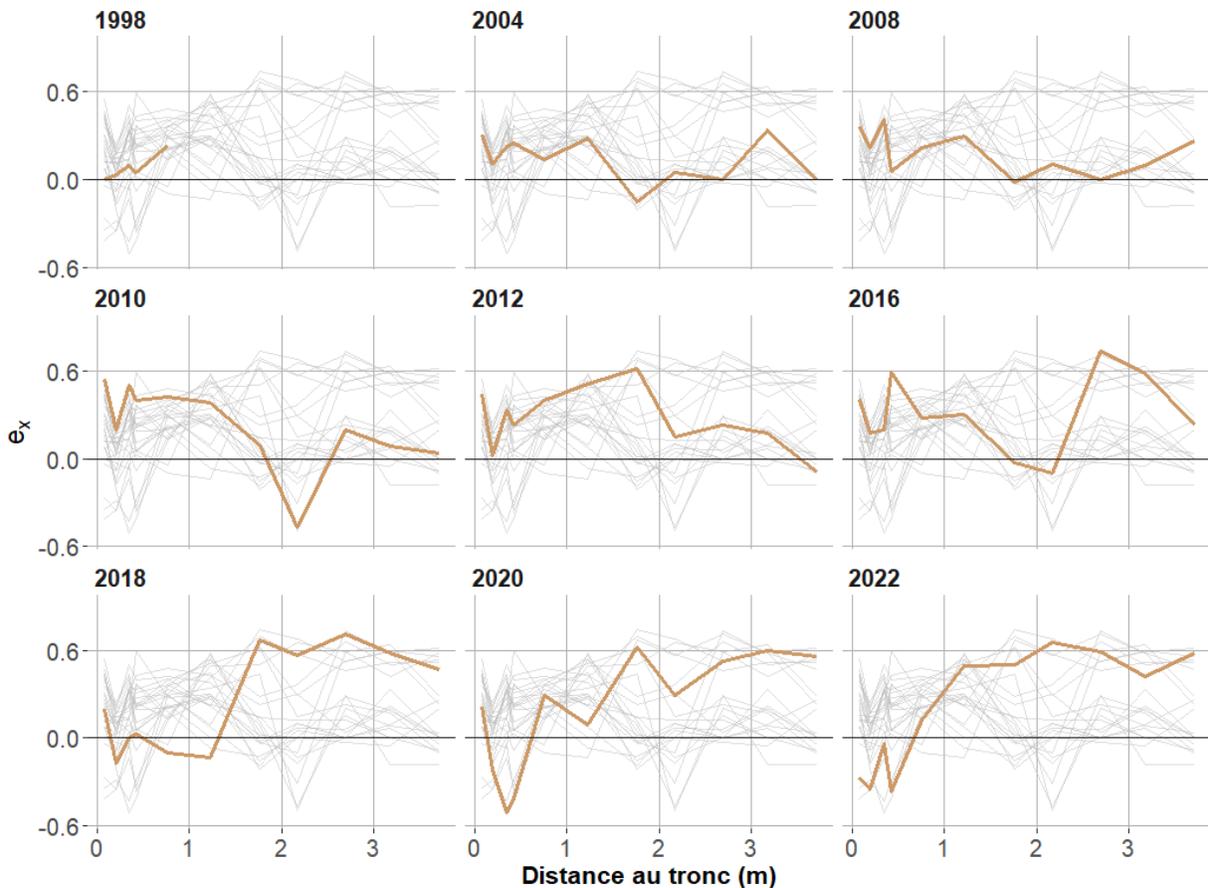


FIGURE 5.17 – Évolution spatiale de l'excentricité locale pour différentes années. En marron, la courbe de l'excentricité d'une année est mise en évidence. En gris clair, les courbes des autres années sont représentées.

Cette forte variabilité renforce l'hypothèse selon laquelle le rôle de l'excentricité pourrait

être celui d'un ajustement par rapport à des tropismes temporaires et locaux (recherche de lumière notamment), et non pas un tropisme constant comme celui de la gravité. En revanche, si la trajectoire de l'excentricité ne semble pas être une réponse directe à l'évolution du chargement, les valeurs atteintes semblent en corrélation avec l'augmentation du poids. Ainsi les années 1995-2008 sont caractérisées par une excentricité moyenne à faible ($< 0,4$ en moyenne). Puis les valeurs augmentent peu à peu. Ceci est aligné avec les fonctions de moteurs (quelque soit son origine) de l'excentricité : plus la branche est lourde, et plus ajuster une orientation demande un moteur de redressement important.

L'excentricité moyenne présente des valeurs plus faibles que l'excentricité locale. Dans la figure 5.18, l'évolution spatiale de cette excentricité est proposée à différents stade de croissance. Sur la dernière année (2022), cette excentricité est constamment épitrophique. En revanche, il y a des années (2010, 2011) où elle devient hypotrophique, suivant la distance à l'insertion. Cette forte dépendance temporelle de l'excentricité moyenne amène à être prudent lorsque l'on mesure, (et interprète!) cette dernière. Encore une fois, ces résultats font figure d'exception comparés aux mesures rapportées dans la littérature, où l'excentricité est très majoritairement hypotrophique (figure 5.12).



FIGURE 5.18 – Représentation de l'excentricité moyenne tout au long de la zone étudiée (0-4 m depuis l'insertion). Trois différentes années sont mises en évidence (marron), l'ensemble des autres années est représenté en arrière plan.

5.4.3 Évaluation des contraintes de maturation

Échantillonnage et mesures du retrait longitudinal

Les tronçons ont été stockés rapidement après le prélèvement de la branche, dans des linges humides ; le tout dans des sacs plastiques, jusqu'à la découpe finale (24 heures après) en barreaux longitudinaux. Dans chaque tronçon, les barreaux ont été prélevés, sur les axes verticaux et horizontaux. Les dimensions transverses des échantillons sont variables, entre 1

cm et 1,5 cm. Ces variations s'expliquent par le fait que les sections sont de tailles variables, et que le mode de prélèvement (scie) n'offre pas la possibilité d'avoir une haute précision.

Le nombre d'échantillons dans chaque tronçon n'est donc pas constant. Au total, 62 échantillons ont été prélevés sur les 9 sections. Ils sont référencés par des lettres, indexées par ordre alphabétique, avec un parcours de haut en bas, puis de gauche à droite. Une photo d'une section réelle ainsi que sa jumelle théorique est donnée en figure 5.20. L'ensemble des 9 sections est quant à lui proposé dans l'annexe B.1. Pour mesurer le retrait longitudinal, un dispositif adapté à nos échantillons a été conçu (figure 5.19). Chaque échantillon repose sur trois sphères de positionnement (suffisantes pour un appui quasi-statique), et est fixé sur une butée.

La longueur de l'échantillon est alors mesurée en 8 points, plus précisément sur les 4 côtés : (T : Top, R : Right, B : Back, L : Left) des 2 faces (F : front, B : Back). Chaque mesure possède donc un identifiant unique : Numéro du tronçon - Lettre de positionnement - Face mesurée - Côté mesuré. La figure 5.21 représente les points de mesures sur une vue éclatée de section.

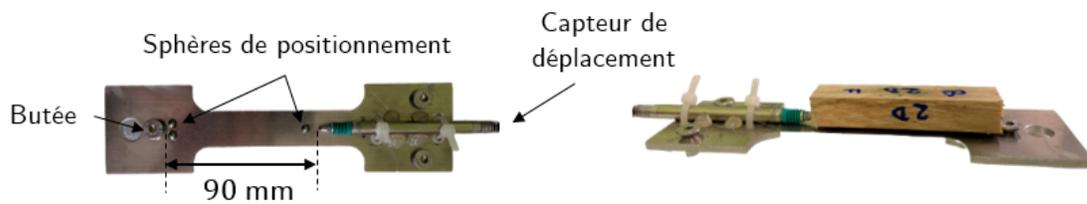


FIGURE 5.19 – Mesure du retrait longitudinal. Appareil de mesure des longueurs de chaque échantillon.

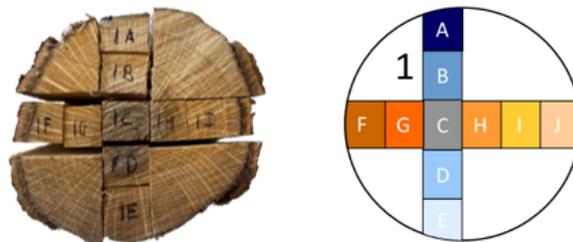


FIGURE 5.20 – Mesure de retrait longitudinal. Échantillonnage des sections, selon deux axes : vertical (bleu) et horizontal (orange), centrés sur la moelle.

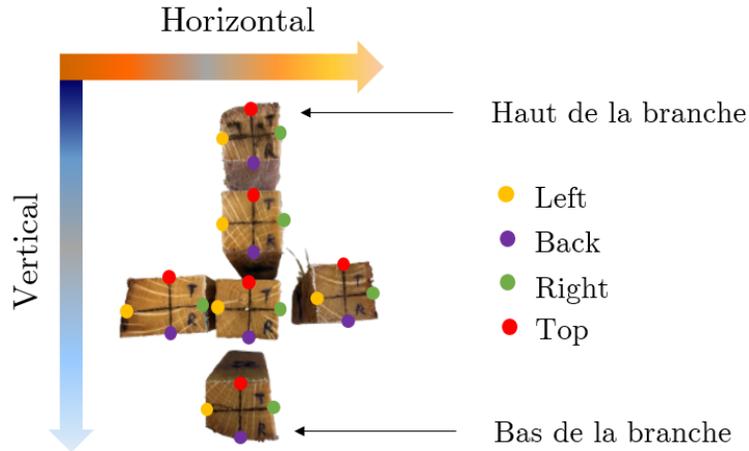


FIGURE 5.21 – Mesure du retrait longitudinal. Visualisation des différents points de mesures pour chaque échantillon d'une section.

Mesures des taux d'humidités

Les mesures de retrait longitudinal ont été effectuées à 4 états :

- État vert : juste après le prélèvement terrain, les barreaux ont été emballés hermétiquement et stockés en chambre froide avant d'être mesurés sous quelques jours.
- État humide : après la première campagne de mesures, les échantillons ont été placés quelques jours dans une boîte à 100% d'humidité, puis dans une enceinte à un taux d'humidité élevé (>95%), le tout à une température constante (20°). Ce palier intermédiaire a été mis en place pour éviter un séchage trop rapide des échantillons (permettant alors d'éviter notamment le flambement transverse). La seconde mesure de retrait a été effectuée après stabilisation de la masse des échantillons. La caractérisation de l'évolution de la masse s'est basée sur le suivi régulier de la masse de 9 échantillons pris au hasard. À chaque prise de mesure, le pourcentage de masse perdue Δm_p est calculé :

$$\Delta m_p = 100 \left(1 - \frac{m}{m_v} \right) \quad (5.6)$$

avec m_v la masse de l'échantillon à l'état vert. L'évolution de Δm_p entre les états vert et humide est représenté dans la figure 5.22.

- État sec à l'air : Une fois les échantillons mesurés, ces derniers ont été laissés à l'air libre dans une salle à atmosphère contrôlée (60% d'humidité, température ambiante 21°). Comme pour le passage de l'état vert à humide, c'est la stabilisation de la masse des échantillons qui a conditionné le statut de l'état sec à l'air. Cette stabilisation est représentée dans la figure 5.22.
- État anhydre : l'état anhydre a été obtenu après séchage des échantillons dans une étuve à 103° pendant 48h.

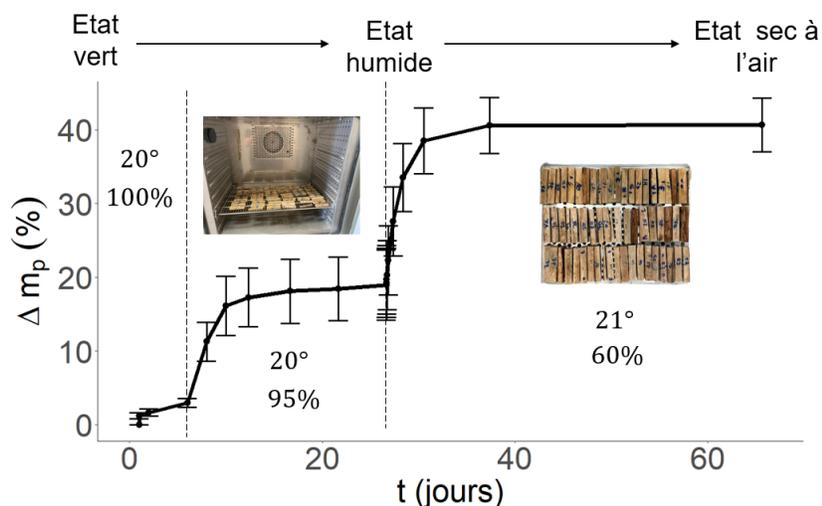


FIGURE 5.22 – Caractérisation du pourcentage de masse perdue Δm_p entre l'état vert et sec à l'air. Chaque état est défini par la stabilisation de Δm_p . Les mesures de masse ont été faites sur 9 échantillons pris aléatoirement dans le lot.

Caractérisation de la mesure

La caractérisation de l'incertitude liée au système de mesure s'est faite sur 3 échantillons pris aléatoirement dans les lots : 3D, 5B et 7C. À chaque campagne de mesure (4 états du bois), les 8 mesures décrites précédemment ont été effectuées 5 fois. Sur la figure 5.23 sont représentées les distributions de longueurs observées pour l'échantillon 3D. Les mêmes schémas sont trouvés pour les deux autres échantillons, et les résultats correspondants sont proposés dans l'annexe B.2. L'erreur calculée lors de la répétition des mesures est très faible devant les variations provoquées par le retrait naturel des échantillons aux différents états. Elle est en effet systématiquement inférieure à 5% de la valeur des retraits. Cela permet de valider la bonne répétabilité de la méthode de mesure.

Également, il est remarqué que les dimensions varient suivant le côté mesuré (on retrouve des similarités entre les mêmes côtés de deux faces opposées : BB/FB, BL/FL, BR/FR, BT/FT), ce qui s'explique par le fait que (i) les surfaces transverses ne sont pas parfaites (il n'y a eu aucun traitement de surface), (ii) les échantillons ne sont pas des volumes parfaits non plus (présence de défilement). Dans la suite de l'étude, par soucis de simplicité et de réduction de l'erreur de mesure, nous prendrons la valeur moyenne des 8 points de mesure pour chacun des échantillons. Pour évaluer la corrélation établie par Thibaut and Gril (2021) entre le retrait et la déformation de maturation (donnée dans la figure 5.13), nous avons réalisé des mesures de déformations à l'aide de la méthode « du trou unique » (décrite dans la section 1.3.2). Les mesures ont été réalisées sur les parties supérieure et inférieure de la branche, juste avant le tronçon T1 (figure 5.26). Une photo du dispositif est proposée dans la figure 5.25.

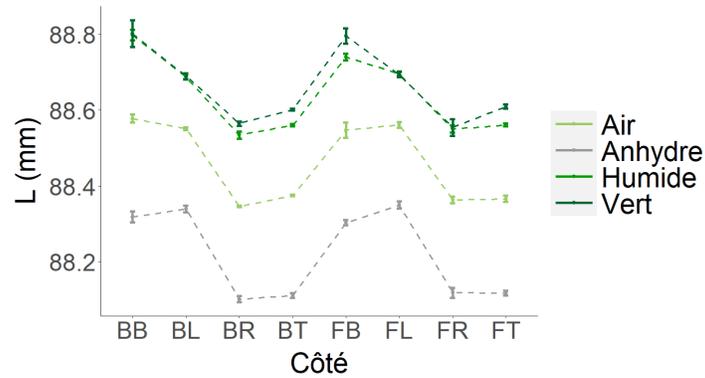


FIGURE 5.23 – Caractérisation de l’incertitude liée à la méthode de mesure. Pour chaque côté et pour chaque état, 5 mesures ont été réalisées et la distribution des résultats est proposée sous forme de barre d’erreur. L’échantillon référence (3D) a été choisi au hasard.



FIGURE 5.25 – Mesure des déformations de maturation à l’aide de la méthode du trou unique.

Le déplacement des pointes mesuré après relâchement des contraintes, appelé *GSI* (Growth Strain Indicator), est relié à la déformation μ par un facteur de conversion ϕ selon la relation $\mu = \phi GSI$. Ce facteur dépend du module d’Young spécifique [Thibaut and Gril (2021)], que nous n’avons pas pu mesurer dans cette expérimentation. Nous prendrons alors une valeur moyenne, basée sur les valeurs obtenues dans ces travaux : $\phi = 12$. Les valeurs trouvées par la méthode du trou ainsi que les déformations de maturation obtenues par la corrélation de Thibaut and Gril (2021) sont résumées dans la figure 5.26. Les mesures étant faites dans l’axe vertical de la branche, elle seront comparées avec les échantillons 1A et 1E. En moyennant les mesures sur chacun de ces échantillons, on obtient $\mu_A \approx 2334 \mu_{def}$ et $\mu_E \approx 419 \mu_{def}$. Les valeurs correspondantes obtenues avec la méthode du trou, $\mu_{sup} = 1950 \mu_{def}$ et $\mu_{inf} = 300 \mu_{def}$ diffèrent entre 20% et 30%. Cet écart, qui peut paraître important, est encourageant. En effet, les approximations sont nombreuses, notamment sur les positions des mesures et sur

l'approximation de ϕ . Cette comparaison nous permet de valider la corrélation de Thibaut and Gril (2021). En effet, dans un premier temps, le but de ce protocole n'est pas d'avoir des valeurs absolues et précises, mais une quantification globale de cette déformation.

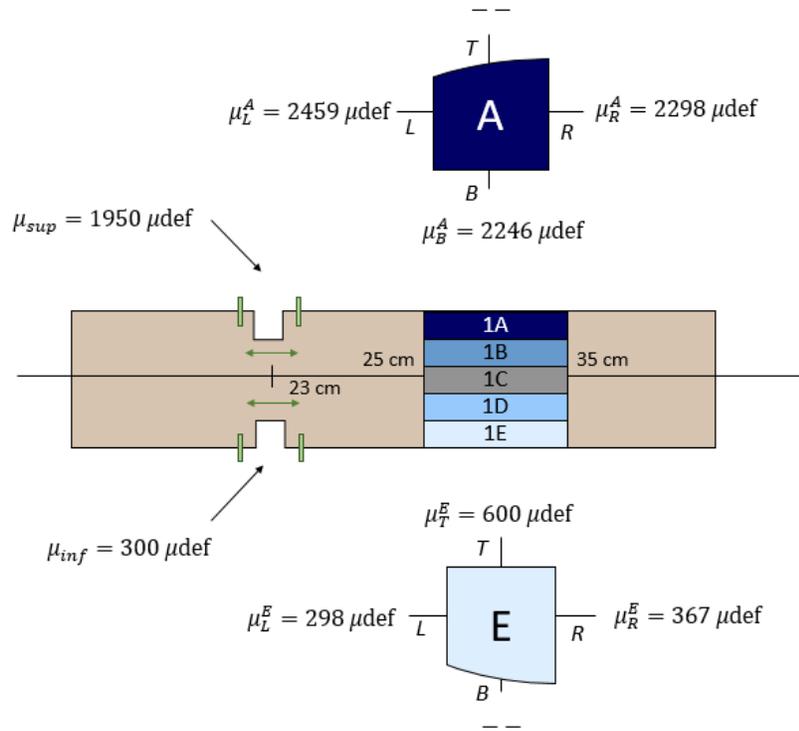


FIGURE 5.26 – Comparaison des valeurs de déformations obtenues avec la méthode de la mesure du retrait longitudinal (échantillons A et E) et avec la méthode du trou (μ_{sup} , μ_{inf}).

Premiers résultats et conclusion

Les valeurs de retraits dans les échantillons du tronçon T2 sont indiquées dans la figure 5.27. Les résultats montrent que dans l'axe vertical, les échantillons sur la partie supérieure (A,B) ont des valeurs de retrait plus fortes (d'un facteur 2 à 3) que les échantillons de la partie inférieure de la branche. Sur l'axe horizontal, la distribution des retraits est plus homogène. On retrouve globalement ces tendances de distribution des valeurs de retrait dans chacune des sections (dont le détail est donné dans l'annexe B.3). Cette forte dissymétrie circonférentielle (qui délimite les zones de bois de tension, bois opposé et bois normal) va dans le sens de ce qui a déjà été admis pour les déformations de maturation, et sous tend la corrélation entre le retrait longitudinal et ces déformations.

L'évolution spatiale des déformations de maturation (obtenues avec la corrélation donnée dans la figure 5.13) est alors proposée dans la figure 5.28. Le double gradient radial et cir-

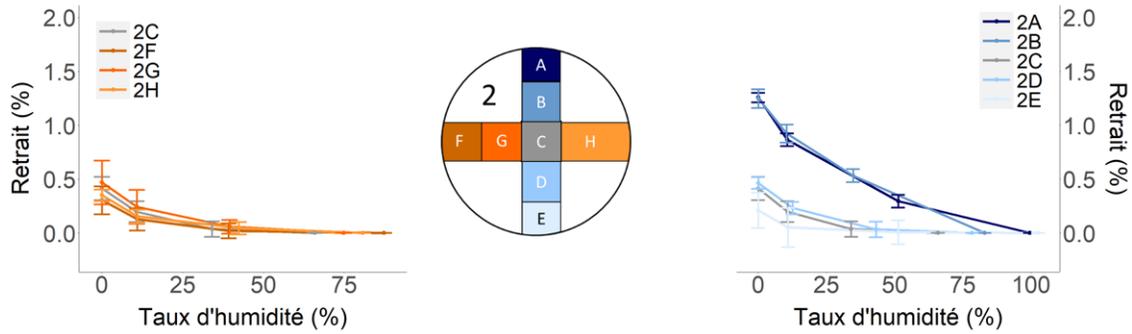


FIGURE 5.27 – Différentes valeurs de retraits longitudinaux obtenus sur le tronçon T2. En orange, les valeurs sont données suivant le diamètre horizontal. En bleu, les retraits suivant l'axe vertical.

conférentiel mentionné ci-dessus se retrouve bien. Tout d'abord dans la direction radiale, avec une déformation de maturation importante dans les zones supposées en tension (partie supérieure), et qui diminue ensuite pour atteindre des minimum dans la zone opposée. Circumférentielle ensuite, avec la zone de bois dite « normale », qui présente des valeurs entre les zones opposée et en tension.

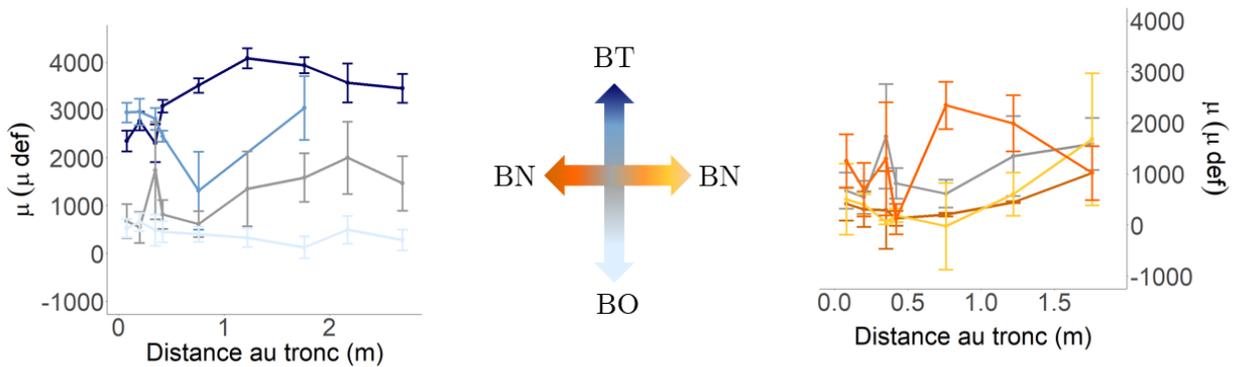


FIGURE 5.28 – Distribution spatiale des déformations de maturation en fonction de la position longitudinale dans la branche (distance depuis l'insertion) et de la position dans la section transversale. Les valeurs sont évaluées à partir des mesures de retrait longitudinal. Identification des différentes zones du bois : BT pour Bois de Tension, BO pour Bois Opposé, BN pour Bois Normal.

Les données obtenues permettent aussi de discuter des effets transverses dans les sections. Si le bois est supposé être dans une zone « normale » au regard de sa position face à la gravité, il n'en n'est rien si l'on se place dans le prisme d'une autre sollicitation comme le vent par exemple. En ce sens, les profils horizontaux sont intéressants. On remarque alors que la partie gauche de la branche (courbe orange sur la figure 5.28) est mise en forte tension durant une partie de la vie de la branche, puis est revenue à des niveaux de tensions moins forts (courbe marron). Cela pourrait être la réponse à une sollicitation horizontale, qui engendrerait une

réponse physiologique de même ordre de grandeur que celle liée au poids ! Il faut alors ici indiquer que cette branche, orientée Est-Ouest sur l'arbre, a été prélevée dans un couloir venteux important dans la vallée du Rhône avec forte dominance dirigée du Nord au Sud. Ce dimensionnement pourrait être l'expression d'une réponse thigmomorphogénétique (section 1.3.4).

Bien que les valeurs obtenues soient encourageantes, beaucoup d'améliorations pourraient être envisagées pour obtenir des profils de déformations de maturation adaptés au modèle. Les perspectives suivantes sont notamment dégagées :

1. Améliorer l'échantillonnage des tronçons. Contrairement au suivi d'excentricité qui est assez fin (27 points de mesures pour la première section), l'échantillonnage des tronçons est trop grossier (5 points de mesures pour l'axe $y = 0$). Diminuer légèrement les sections des barreaux est donc une perspective intéressante. Cette diminution permettrait également de mesurer simplement les modules d'Young longitudinaux, donnée ici manquante et qui joue un rôle non négligeable dans le contrôle postural [Almèras et al. (2005)].
2. Coupler la mesure des retraits avec quelques mesures de DLM permettrait de valider notre utilisation de la corrélation de Thibaut and Gril (2021), et sinon, de la corriger. Des premières comparaisons encourageantes ont été réalisées, mais il reste du travail pour corriger les approximations (notamment la mesure du module d'Young spécifique).

5.5 Conclusion

Comprendre le dimensionnement des branches par rapport à leur poids propre est fondamental si l'on veut pouvoir caractériser leur l'état mécanique. Parmi les nombreux paramètres impliqués, deux sont internes à la branche, et ont un rôle dans le contrôle postural : l'excentricité et le gradient de déformation de maturation. Une application de notre modèle à des maquettes numériques a permis de proposer une qualification de ces rôles. Deux comportements distincts ont été mis en évidence. Chez le feuillu, si l'excentricité est très efficace dans la théorie, elle ne semble pas être utilisée comme un acteur dans la réaction au poids propre. Une hypothèse d'un rôle « d'ajustement », par rapport à d'autres tropismes, aux temps caractéristiques plus courts (lumière, environnement proche) a alors été formulée. Chez le résineux, l'excentricité semble être un levier moins efficace que le gradient de déformation de maturation. Elle influencerait peu les niveaux de contraintes mis en jeu, mais changerait grandement l'allure des profils obtenus. Des profils intéressants (en créneau) ont été mis en évidence, et confirmer l'existence de ces profils par des mesures expérimentales est une perspective excitante ! L'excentricité pourrait alors avoir un rôle de réduction du risque de rupture, en réduisant les valeurs fortes des contraintes longitudinales.

Pour pouvoir aller plus loin dans la compréhension du dimensionnement des branches, des données expérimentales sur ces deux paramètres étaient nécessaires. Pour cela, un protocole expérimental a été proposé et appliqué à une branche de chêne. La mesure d'excentricité

est très concluante, et permettrait de remonter aux profils spatio-temporels complets de ce moteur. En revanche, le protocole de mesure des déformations de maturation n'est pas assez mûr pour pouvoir être intégré au modèle. Des pistes d'amélioration ont été proposées, et devraient pallier les lacunes actuelles. À terme, ce travail devrait permettre une cartographie complète et réaliste de l'état de contrainte longitudinale, tout au long de la vie d'une branche et en tout point, permettant alors évaluer son état mécanique lié à son chargement pondéral croissant.

Chapitre 6

Sensibilité du modèle mécanique et facteurs impliqués dans la tenue d'une branche à la rupture

Sommaire

6.1	Introduction	178
6.2	Matériel et méthode	178
6.2.1	Caractérisation de l'échantillonnage	178
6.2.2	Paramétrisation du problème	180
6.2.3	Calcul de la densité d'énergie élastique et étude de sensibilité	183
6.3	Résultats et discussions	185
6.3.1	Étude des indices de Sobol	185
6.3.2	Etude OAT	188
6.4	Conclusion	191

6.1 Introduction

Le chapitre précédent se voulait une avancée sur la compréhension du dimensionnement des branches : comment certains moteurs pouvaient être utilisés pour assurer des scénarios de croissance, et comment ces moteurs sont utilisés en pratique. Dans ce chapitre, une approche exploratoire, inspirée de la mécanique de la rupture, est proposée. L'objectif est de statuer sur le rôle relatif des paramètres pouvant influencer la tenue d'une branche à la casse. La densité d'énergie élastique emmagasinée par la branche tout au long de sa vie est alors supposée conditionner la rupture. Plus cette densité stockée est importante et plus la propension d'une branche à casser est forte.

Dans ce cadre, une étude de sensibilité du modèle sur la densité d'énergie élastique stockée durant la vie de la branche est proposée. L'un des points clef de cette étude de sensibilité est la paramétrisation du problème. Pour essayer de rester le plus réaliste possible, un travail expérimental de détermination des intervalles de variations des entrées du modèle a été effectué au préalable. Cette étude sur la morphologie des branches servira alors de support à l'étude de sensibilité.

6.2 Matériel et méthode

6.2.1 Caractérisation de l'échantillonnage

Pour mener cette étude expérimentale, les branches de 7 essences ont été mesurées : 6 sont des feuillus et une est un résineux. Cette répartition a été conditionnée par la disponibilité du matériel végétal souvent prélevé dans des parcs, et le fait que les essais destructifs rendent ce matériel difficile à se procurer. Pour chaque branche, le protocole suivant a été effectué :

- Sur site : Mesure de l'angle γ entre le point de coupe (proche de l'insertion) et le centre de gravité de la branche. Découpe de la branche selon un protocole bien spécifique, décrit dans le chapitre suivant. Traçage de la génératrice supérieure de la branche. Une fois la branche au sol, mesure de sa masse m , sa longueur L , et la longueur L_g entre le point de découpe et la position du centre de gravité. Prélèvement de la section de découpe pour une étude en laboratoire. Les longueurs L , L_g et l'angle γ sont représentés dans une situation fictive sur la figure 6.3.
- En laboratoire : Ponçage de la section, prise de photo et analyse d'image sous Fiji [Schindelin et al. (2012)]. Mesure des rayons vertical R_x et horizontal R_y , mesure de l'excentricité moyenne \bar{e} . Des mesures d'épaisseur d'écorce ont également été réalisées, mais ne seront pas présentées dans cette étude.

Un échantillonnage moyen de N branches par essence, excluant les branches trop jeunes (pas d'intérêt particulier dans ces travaux car comportant peu de cernes et de charge pondérale très réduite) ou trop lourdes (par manque de moyens techniques pour les manipuler), a été mis en place. La distribution des différents paramètres mesurés est résumée dans le tableau

6.1, puis représentée dans la figure 6.2. Dans ces représentations, R représente le rayon moyen $R = \frac{R_x + R_y}{2}$.

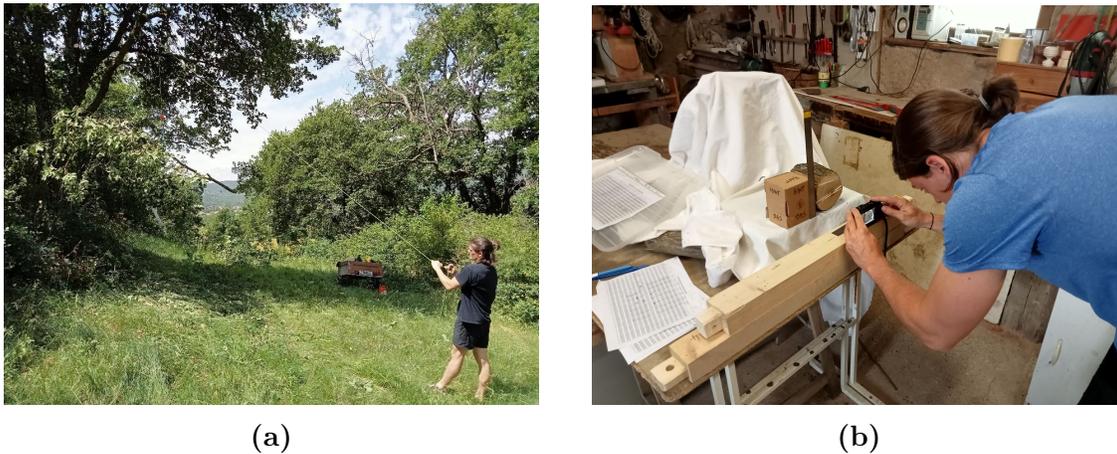


FIGURE 6.1 – Étude expérimentale des branches, quelques illustrations : a) Pesée d’une branche ; b) Photographie de section, avant étude en laboratoire.

TABLEAU 6.1 – Caractéristiques moyennes des branches échantillonnées.

Espèces	N	R (cm)	L (m)	L_g (m)	γ (°)	m (kg)	\bar{e}
Chêne	15	$4,4 \pm 1,3$	$5 \pm 1,3$	$2,1 \pm 0,6$	13 ± 28	$29,8 \pm 21,7$	$-0,13 \pm 0,14$
Érable sycomore	20	$3 \pm 0,7$	$4,9 \pm 1,1$	$2,1 \pm 0,5$	30 ± 22	$11,8 \pm 7,2$	$-0,04 \pm 0,08$
Frêne	16	$4,2 \pm 1,6$	$6,9 \pm 2,1$	$2,8 \pm 0,9$	37 ± 32	$34,9 \pm 31,3$	$-0,07 \pm 0,10$
Merisier	23	$3,2 \pm 1,3$	$4,4 \pm 1,8$	$2,3 \pm 1,1$	29 ± 21	$21,1 \pm 15,5$	$-0,04 \pm 0,24$
Noyer NG38	55	$3,9 \pm 1,1$	$5,4 \pm 1,3$	$2,1 \pm 0,5$	16 ± 12	$22 \pm 15,9$	$-0,25 \pm 0,12$
Peuplier I214	27	$4,6 \pm 1,8$	$5,3 \pm 1,9$	$1,9 \pm 0,5$	36 ± 16	$26,4 \pm 23,3$	$-0,09 \pm 0,12$
Pin noir	20	$2,7 \pm 1,1$	$5,3 \pm 1,9$	$2,1 \pm 0,5$	28 ± 13	$11,6 \pm 8,2$	$-0,05 \pm 0,15$

Le tableau 6.1 met en évidence la variabilité du nombre N de branches prélevées pour chaque essence. Plus de détails sur cette distribution seront donnés dans le chapitre suivant. Même si cette variabilité est importante, l’échantillonnage minimal ($N = 15$, pour le chêne) est suffisant pour pouvoir y appliquer un formalisme statistique. Dans la figure 6.2, les essences sont classées de gauche à droite par médianes de rayon moyen croissantes. Il est intéressant de constater les différences de morphologies entre essence : ce ne sont pas les espèces avec les plus gros diamètres qui montrent les branches les plus longues. Il en est de même pour la masse, dont la distribution assez indépendante des autres paramètres met en évidence le rôle non négligeable de la ramification sur la charge pondérale. L’excentricité observée est

la plupart du temps hypotrophique, confirmant les propos du chapitre précédent. Les angles moyens sont aussi espèce-dépendants, avec une grande variabilité observée : chez le frêne, l'orthotropie de certaines branches atteint 70° , tandis que chez le chêne l'affaissement peut conduire à dépasser les -15° .

NB : Avant toute quantification statistique, des tests de normalité (diagramme quantile-quantile, diagramme de densité) et d'homoscédasticité (méthode graphique) ont été effectués [Jobson (2012)], et ont confirmé la bonne adéquation du jeu de donnée avec des modèles de régressions linéaires.

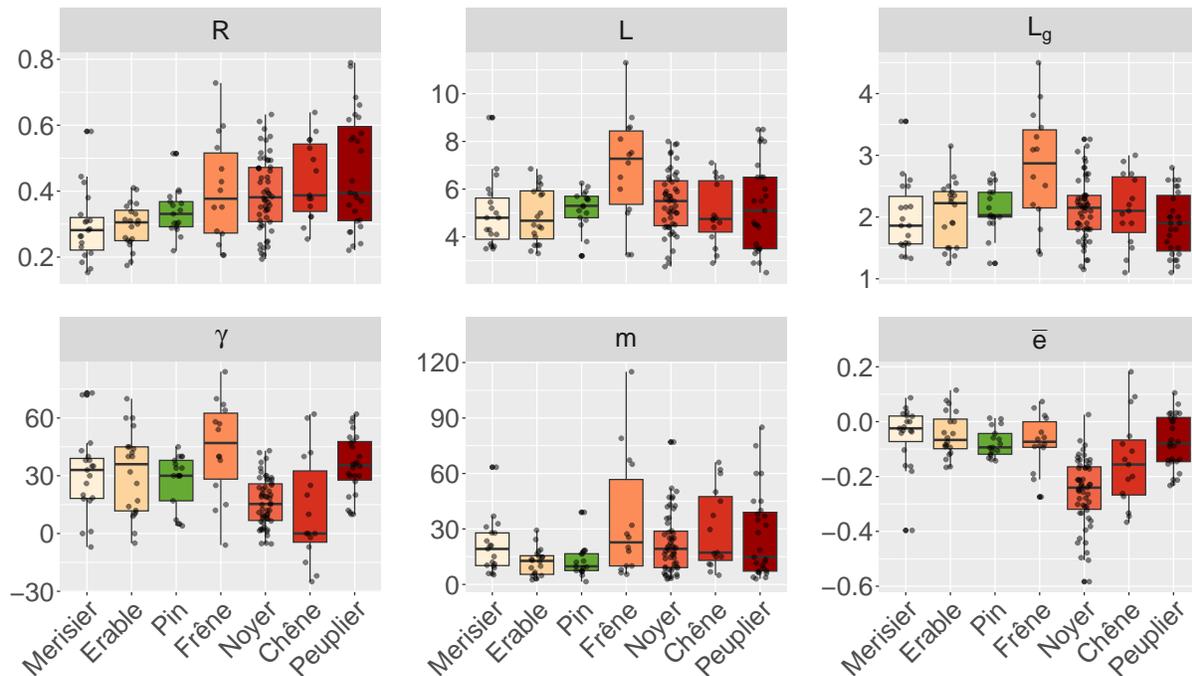


FIGURE 6.2 – Distribution de chacun des paramètres mesurés ; selon chaque essence. R le rayon moyen (cm), L la longueur (m), L_g la longueur de la branche du point d'insertion au centre de gravité (m), γ l'angle moyen avec l'horizontale ($^\circ$), m la masse (kg), et \bar{e} l'excentricité moyenne.

6.2.2 Paramétrisation du problème

Pour l'étude de sensibilité, la branche est assimilée à un cône de défilement variable, de densité et rigidité homogène, avec une croissance stationnaire (pas de variation de courbure dans le temps). Chaque branche est supposée rectiligne, de sorte à pouvoir être caractérisée par son angle γ , sa longueur L , son rayon à l'insertion $R = R_i$, et le défilement $\xi = R_f/R_i$; avec R_f le rayon en bout de branche. Cette donnée n'a pas été spécifiquement mesurée, mais

le paramètre ξ est aussi une fonction du rapport $\chi = L_g/L$ (voir paragraphe suivant) qui lui, a été mesuré.

Les différents paramètres sont représentés dans la figure 6.3. En fixant une géométrie, nous nous affranchissons du paramètre m , qui est directement calculé à partir du volume. Dans cette étude, la masse de la branche est donnée par ξ : $\xi = 1$ (cylindre parfait) conduit à une branche lourde, et $\xi = 0$ (cône parfait) conduit à une branche légère. Nous aurions pu ne pas utiliser de géométrie et directement utiliser les mesures de masse, mais dans l'étude de sensibilité, cela aurait dé-corrélé la masse de la longueur, ce qui amènerait à des situations irréalistes.

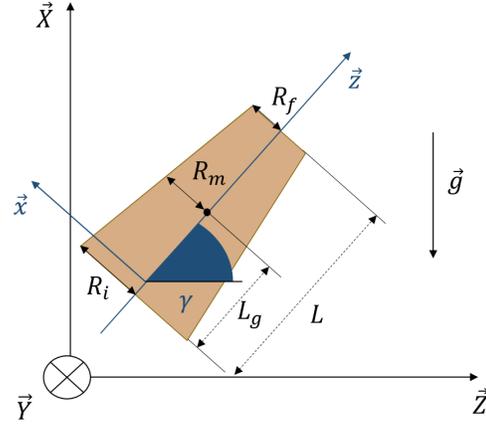


FIGURE 6.3 – Étude de sensibilité. Modèle géométrique de branche.

Calcul de ξ

Pour caractériser la loi $\chi = f(\xi)$, nous avons exprimé la longueur L_g en fonction de ξ . Les calculs sont détaillés en annexe C. On obtient :

$$L_g = \left(\frac{1 + 2\xi + 3\xi^2}{1 + \xi + \xi^2} \right) \frac{L}{4}$$

Soit encore, l'équation du second degré en ξ :

$$(3 - 4\chi)\xi^2 + (2 - 3\chi)\xi + 1 - 4\chi = 0 \quad (6.1)$$

Le discriminant associé à l'équation 6.1 est calculé :

$$\Delta = 8 [6\chi(1 - \chi) - 1]$$

L'étude du signe de Δ est celle d'une équation de degré 2 en χ , qui montre que Δ est positif dans l'intervalle $[1/2 - 1/\sqrt{(12)}, 1/2 + 1/\sqrt{(12)}]$. La figure 6.4 représente la distribution de χ en fonction du rayon, ainsi que les limites (ligne en pointillé noir) pour lesquelles Δ est positif.

On en déduit que la distribution expérimentale des χ est entièrement incluse dans l'intervalle qui correspond à un Δ positif.

L'équation 6.1 présente donc deux solutions théoriques, dont l'une est facilement éliminée (par contrainte de positivité de ξ). L'expression finale de ξ est alors déduite :

$$\xi = \frac{-(2 - 3\chi) + 2\sqrt{2[6\chi(1 - \chi) - 1]}}{2(3 - 4\chi)} \quad (6.2)$$

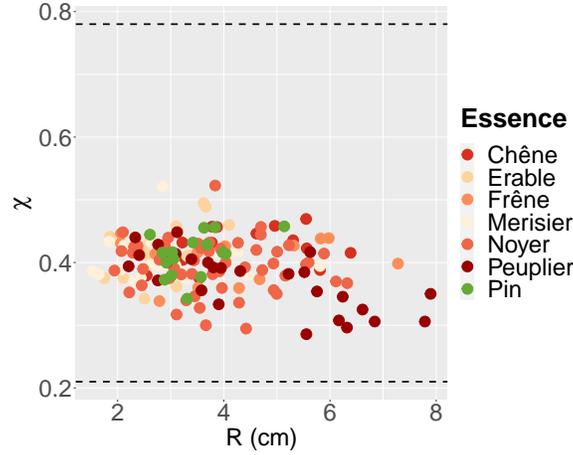


FIGURE 6.4 – Étude de sensibilité. Distribution du paramètre $\chi = L_g/L$. Les limites en noir correspondent aux valeurs pour lesquelles l'équation 6.1 a deux solutions réelles distinctes.

Calcul des incréments de chargement

Dans un deuxième temps, nous avons calculé les incréments de chargement δM et δN en fonction du jeu de paramètres $(R, L, \gamma, \xi, \bar{e})$. Par soucis de simplicité, il est supposé que les paramètres γ, ξ et \bar{e} sont constants tout au long de la croissance. Le paramètre L est supposé varier de manière allométrique selon la loi $L(R) = \lambda_L R^{\nu_L}$. La régression obtenue, résumée dans le tableau 6.2 est statistiquement significative.

TABLEAU 6.2 – Caractérisation de la loi allométrique $L(R) = \lambda_L R^{\nu_L}$.

ν_L	λ_L	$I_c(\nu_L)$	$I_c(\lambda_L)$	R^2
0,65***	40***	[0,57; 0,73]	[35; 60]	0,62

I_c représente l'intervalle de confiance à 95% et R^2 le coefficient de Pearson. Le niveau de significativité de la corrélation est donné par *** et correspond à une p -value inférieure à 0,001.

À rayon R fixé, le chargement est donc calculé à partir du jeu de paramètres $(\lambda_L, \nu_L, \gamma, \xi, \bar{e})$. La projection de l'effort normal dans le repère lié à la branche (figure 6.3) donne :

$$N = mg \sin(\gamma) = -\rho g V \sin(\gamma) \quad (6.3)$$

Pour la géométrie adoptée, le volume s'écrit (annexe C) :

$$V = \frac{\pi}{3} (\xi^2 + \xi + 1) L R^2 = \frac{\pi}{3} (\xi^2 + \xi + 1) \lambda_L R^{\nu_L + 2}$$

Ce dont on déduit, par combinaison avec 6.3 :

$$N = -\frac{\pi}{3} (\xi^2 + \xi + 1) \rho g \lambda_L R^{\nu_L + 2} \sin(\gamma)$$

Soit encore, par différentiation avec l'incrément δR , l'expression finale de l'incrément δN :

$$\delta N = C_N R^{\nu_L+1} \delta R \quad (6.4)$$

où $C_N = -\frac{\pi}{3} \rho g \lambda_L (\xi^2 + \xi + 1) (\nu_L + 2) \sin(\gamma)$.

De la même manière, le moment fléchissant M est exprimé :

$$M = -mg [L_g \cos(\gamma) - \bar{e}R \sin(\gamma)] \quad (6.5)$$

Or, la géométrie des branches impliquant $R \ll L_g$, il est déduit $\bar{e}R \ll L_g$, ce qui amène à la simplification de l'équation 6.5 :

$$M \approx -mg L_g \cos(\gamma) \quad (6.6)$$

Le même raisonnement que ci-dessus amène à l'expression suivante :

$$\delta M = C_M R^{2\nu_L+1} \delta R \quad (6.7)$$

avec $C_M = -\frac{\pi}{12} \rho g \lambda_L^2 (1 + 2\xi + 3\xi^2) (2\nu_L + 2) \cos(\gamma)$

Choix des intervalles de variation des données d'entrée

Une fois les incréments de chargement exprimés en fonction des données d'entrée, nous avons fixé les intervalles de variation de ces dernières. La paramétrisation du système étant complexe, du fait de l'interaction forte entre chaque donnée d'entrée, nous avons choisi d'étudier la sensibilité sur les seuls intervalles de mesures, quitte à limiter un peu la diversité de situations représentée. Ainsi les intervalles des paramètres supposés constant tout au long de la croissance, γ, ξ, \bar{e} , ont été fixés par les extremums mesurés. Pour les indicateurs allométriques λ_L, ν_L , les variations adoptées sont celles des intervalles de confiance à 5% (voir tableau 6.2). Enfin, il restait à fixer l'intervalle de variation des déformations de maturation dans le bois opposé μ_{BO} . Cette mesure n'était pas disponible dans notre jeu de données expérimentales et l'intervalle choisi couvre alors une diversité importante de situations. Un résumé des plages de variations de chacun des paramètres d'entrée est proposé dans le tableau 6.3.

6.2.3 Calcul de la densité d'énergie élastique et étude de sensibilité

Connaissant le champ de contrainte, nous pouvons calculer l'énergie élastique emmagasinée dans dans la section d'une tige :

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{l=0}^{N_e(k)-1} \frac{\sigma_l^{k2}}{E_l^k} \quad (6.8)$$

TABLEAU 6.3 – *Étude de sensibilité. Intervalle de variation de chacun des paramètres d'entrée.*

R (cm)	ν_L	$\lambda_L (m^{1-\nu_L})$	$\gamma (^\circ)$	ξ	\bar{e}	$\mu_{BO} (\mu\text{def})$
[1,5; 7,9]	[0,57; 0,73]	[35; 60]	[-25; 84]	[0,1; 1,1]	[-0,58; 0,18]	[-1000; -100]

R est le rayon à l'insertion, (ν_L, λ_L) représentent l'allométrie en longueur, γ l'angle moyen avec l'horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l'excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.

avec N_c le nombre total de cernes numériques, $N_e(k)$ le nombre d'éléments de la k -ième couche, σ_l^k la contrainte de l'élément (k, l) et E_l^k sa rigidité. En divisant par la surface de la section on obtient la densité d'énergie élastique moyenne w_e :

$$w_e = \frac{1}{2S} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{l=0}^{N_e(k)-1} \frac{s_l^k \sigma_l^{k2}}{E_l^k} \quad (6.9)$$

avec S la surface de la section et s_l^k la section de l'élément (k, l) .

Derrière le calcul de w_e , il y a l'idée, inspirée de la mécanique de la rupture, que lorsqu'une branche se casse, elle libère l'énergie élastique W_e au voisinage de la zone de rupture. Se son côté, cette rupture a exigé une énergie que l'on peut considérer proportionnelle à la surface de la section rompue et noter SG_c , où G_c serait une ténacité équivalente ne tenant pas compte de la forme réelle de la surface de rupture, qui peut être complexe. Le ratio $w_e = W_e/S$ est ainsi un indicateur de la densité d'énergie mobilisable par la branche pour causer sa rupture (une véritable application de la mécanique de la rupture, tenant compte d'un trajet de fissure réel et du travail des efforts extérieurs, sera proposée dans la section 7.4.4).

Pour chaque simulation, la densité d'énergie élastique w_e est calculée à l'instant final, avec un nombre de cernes numérique fixe $N_c = 25$. Même si la valeur est un peu faible (cf. chapitre 4 : l'étude sur la REQM entre la prédiction du modèle et une solution théorique avait mis en évidence qu'une valeur de $N_c \approx 100$ était un bon compromis temps de calcul/précision), ne pas dépasser cette valeur était nécessaire pour éviter des temps de calculs excessifs.

L'étude de sensibilité se base en effet en grande partie sur une méthode de décomposition de la variance : l'étude des indices de Sobol [Sobol (1993)]. Ceux-ci représentent la contribution des variables d'entrées du système (et de l'interaction inter-variables) sur la variance de la variable de sortie. Les avantages de ce type d'analyse sont nombreux. Sont notamment mis en avant l'absence d'hypothèse sur la forme du modèle, la prise en compte des interactions, un critère d'importance clair, facilement interprétable (indice entre 0 et 1), qui donne directement la valeur de la contribution de la variable d'entrée dans la variabilité de la variable de sortie. Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode est son coût en nombre de simulations. Dans notre cas, (un modèle à 7 entrées), les indices ont été calculés sur plus de

150 000 situations avant de présenter des critères de convergence pour les indices de premier ordre, 260 000 sur les indices de second ordre. Ce type d'analyse est donc très chronophage (avec $N_c = 25$ couches, les temps de calcul pour 260 000 cas étaient de l'ordre de grandeur de la journée). L'autre inconvénient de cette méthode est qu'elle ne donne aucune indication sur la façon dont les variables d'entrées conditionnent la variable de sortie, ce qui est pourtant très enrichissant pour mieux comprendre le système.

Pour pallier ces manques, cette étude a été complétée par une étude OAT (One-At-a-Time), qui consiste à faire varier une entrée en fixant les autres à une valeur nominale. Ce type d'analyse présente l'avantage d'être facile à mettre en place, peu coûteux en termes de temps de calcul. Cependant, il nécessite d'être prudent sur le choix des valeurs nominales (pour ne pas rendre le poids de certaines variations négligeable). Enfin, elle ne permet pas de se rendre compte de l'espace total des variables d'entrées (pas de prise en compte des interactions). En cela, les deux études proposées sont complémentaires.

Les deux études ont été réalisées sous Python. L'étude des indices de Sobol a été réalisée grâce à la bibliothèque SALib [Herman and Usher (2017)], dont l'architecture de calcul de base sur les travaux de A. Saltelli [Saltelli (2002), Saltelli et al. (2010)]. L'étude OAT n'a pas nécessité de recours à des bibliothèques spécifiques.

6.3 Résultats et discussions

6.3.1 Étude des indices de Sobol

Dans notre étude, nous nous intéressons aux deux premiers indices de Sobol, IS_1 et IS_2 . Le premier permet de quantifier la part de la variance d'une variable d'entrée sur la variabilité de la variable de sortie, tandis que le deuxième quantifie les effets croisés.

Indices du premier ordre

La contribution de chaque paramètre, pour les modes de croissance feuillu (bois de tension sur la partie supérieure) et résineux (bois de compression sur la partie inférieure), est donnée dans la figure 6.5. Les effets cumulés de chaque entrée représentent 58% de la variance de sortie dans le modèle feuillu, contre 40% pour les résineux.

Cela montre l'importance des effets croisés, dont nous parlerons ultérieurement. Également, dans le tableau 6.4, le classement des paramètres d'entrée par IS_1 croissant est résumé. L'analyse conduit aux constats suivants :

- **Le rayon a une influence faible.** Que ce soit pour le modèle feuillu ou celui du résineux, le rayon explique moins de 1% de la variance de sortie. Ceci est cohérent avec notre modélisation, où les profils obtenus sont auto-similaires.

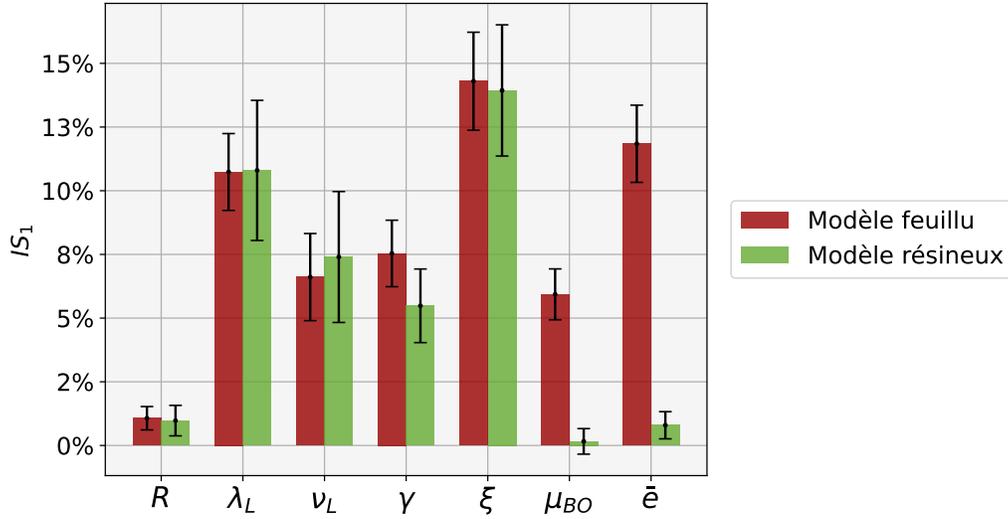


FIGURE 6.5 – Étude de sensibilité. Indices de Sobol du premier ordre pour chacun des paramètres étudiés. R est le rayon à l’insertion, (ν_L, λ_L) représentent l’allométrie en longueur, γ l’angle moyen avec l’horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l’excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.

TABLEAU 6.4 – Étude de Sobol. Poids des paramètres sur l’énergie élastique stockée, pour chacun des modes de croissance.

Feuillu	ξ^{+++}	λ_L^{+++}	\bar{e}^{+++}	γ^{++}	ν_L^{++}	μ_{BO}^{++}	R^{NS}
Résineux	ξ^{+++}	λ_L^{+++}	ν_L^{++}	γ^{++}	\bar{e}^{NS}	μ_{BO}^{NS}	R^{NS}

Signification des puissances : $+++$, le facteur explique plus de 10% de la variance de sortie ; $++$ entre 5% et 8% ; NS : le facteur n’a pas un poids significatif. R est le rayon à l’insertion, (ν_L, λ_L) représentent l’allométrie en longueur, γ l’angle moyen avec l’horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l’excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.

- **Dans les deux cas, le chargement explique une majorité de la densité d’énergie élastique stockée.** En particulier, on distingue les indicateurs de masse ξ (contribution d’environ 14% pour chacun des cas) et de taille λ_L ($\approx 10,5\%$). Les angles γ et les indicateurs des cinétiques de croissance secondaire ν_L (entre 5 et 8%) ont un effet secondaire. Au total, l’effet du chargement extérieur représente environ 40% dans le modèle feuillu et 35% pour le modèle résineux.
- **Le rôle de l’excentricité diffère selon les modèles.** Dans le modèle feuillu, l’excentricité a une contribution importante. C’est d’ailleurs même le deuxième facteur le plus influant, représentant à lui seul près de 13% de la variance de sortie. Au contraire, dans le modèle résineux, l’excentricité a un rôle négligeable, représentant moins de 1%

de la variance totale. Ainsi, contrairement à ce qu'aurait pu laisser penser les résultats du chapitre précédent, le rôle de l'excentricité chez les résineux ne semblerait pas être un rôle de réduction du risque de rupture ; en tout cas pas selon les termes de notre hypothèse.

- **L'importance de la valeur de la déformation de maturation diffère selon les modèles.** Le constat est ici le même que celui pour l'excentricité, avec une déformation dans le bois normal qui n'influence pas l'énergie stockée dans le modèle résineux, et qui explique 5% de cette énergie chez le feuillu, soit autant que l'angle γ ou l'indicateur de cinétique de croissance secondaire ν_L .

Indices du second ordre

Pour chacun des groupes feuillus ou résineux, les indices des termes croisés sont calculés, et représentés dans la figure 6.6. Logiquement, les indices de second ordre représentent une part plus importante dans le modèle résineux. Chez ce dernier, un groupe de 6 effets couplés se distingue (mis en évidence en vert clair dans la figure 6.6). Sur ces 6 effets, qui représentent ensemble une contribution d'environ 40%, 3 concernent l'excentricité, pour un total avoisinant les 30% ! Cette analyse complémentaire permet de pondérer l'influence quasi-inexistante de l'excentricité seule. Car c'est bien ce paramètre qui est le plus influent dans les effets croisés, suivi par l'indicateur de masse ($\approx 22\%$), puis par les coefficients allométriques λ_L et ν_L , chacun avec une contribution d'environ 10%. Ces fortes valeurs des indices de second ordre mettent en évidence le caractère hautement dépendant de tous paramètres à chacun. Si il y a un paramètre dont l'influence est négligeable chez le résineux, c'est la valeur nominale de déformation dans le bois opposé μ_{BO} . À ce stade de l'étude, il reste compliqué de comprendre pourquoi cette valeur influence si peu l'énergie stockée. Dans tous les cas, pour que l'association d'une hypertrophie de l'excentricité et de la création de bois de compression soit efficace, il faut que la déformation dans le bois de compression soit supérieure (en norme) à celle dans le bois opposé. Cela suggère que dans la nature, les valeurs de déformations de maturation du bois opposé sont relativement faibles ; propriété qu'il serait intéressant d'aller mesurer expérimentalement.

Chez le feuillu, les effets croisés sont relativement homogènes (aucun ne représente une contribution supérieure à 5%). Un groupe de 5 effets croisés se distingue, mis en évidence par une couleur plus claire sur la figure 6.6. Sur ces 5 effets, qui représentent une contribution totale d'approximativement 20%, 4 font intervenir l'excentricité moyenne, pour une contribution d'environ 15% ! Ceci permet de renforcer le constat préalablement établi sur rôle biomécanique majeur de l'excentricité chez le feuillu.

Conclusion

L'étude des indices de Sobol a mis en évidence une différence de pondération des paramètres d'entrée sur la densité d'énergie élastique stockée chez le feuillu ou le résineux. Pour le pre-

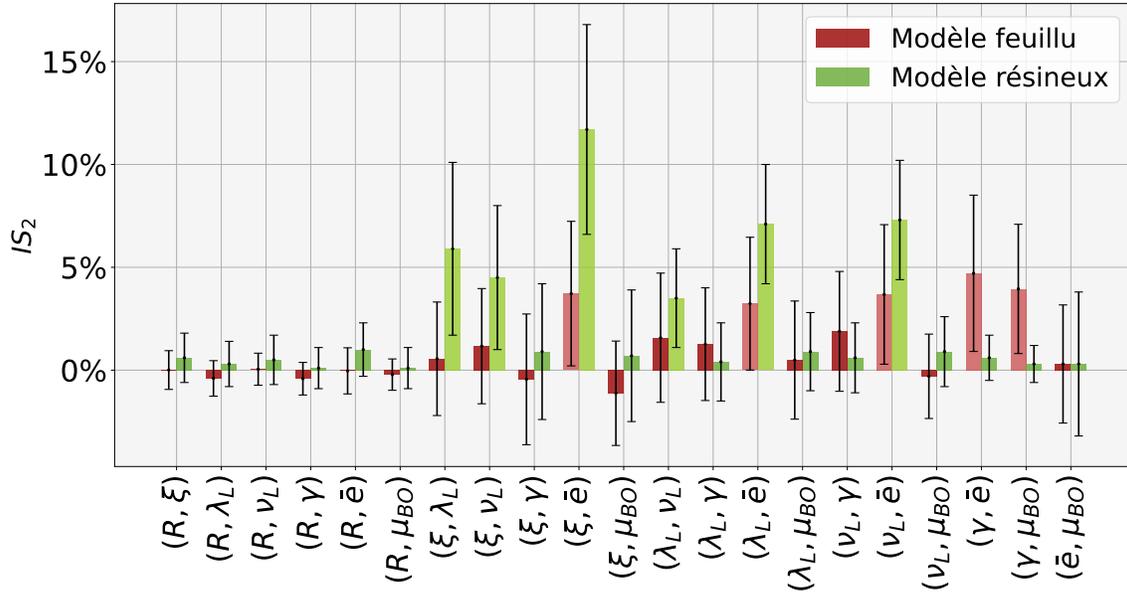


FIGURE 6.6 – Étude de sensibilité. Indices de Sobol du second ordre. R est le rayon à l’insertion, (ν_L, λ_L) représentent l’allométrie en longueur, γ l’angle moyen avec l’horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l’excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.

mier, l’excentricité semble jouer un rôle majeur : c’est le second paramètre le plus influent sur les premiers indices, et le premier sur les seconds indices. Dans le chapitre précédent, il a été mis en évidence que l’excentricité observée dans la littérature et dans nos expérimentations (hypotrophique) n’était pas optimale pour le maintien de la posture. Pour le résineux, l’étude cumulée des indices de premiers et seconds ordres met en évidence une pondération relativement homogène des paramètres de chargement et de l’excentricité. En revanche, la valeur nominale de la déformation dans le bois opposé ne semble pas jouer un rôle majeur dans le stockage de l’énergie élastique.

6.3.2 Etude OAT

L’analyse OAT a principal objectif de regarder comment les paramètres d’entrées influencent la distribution de la variable de sortie. Pour l’étude OAT, les valeurs nominales choisies - qui correspondent aux moyennes des données expérimentales -, sont résumées dans le tableau 6.5. L’évolution de la densité moyenne w_e en fonction de chaque paramètre est représentée dans la figure 6.7.

On observe en premier lieu que, pour les mêmes intervalles de variation des paramètres, la densité d’énergie élastique stockée chez le feuillu est entre trois et quatre fois supérieure à celle chez le résineux. Cela montre que la création de bois de compression permet de réduire de manière très significative les hauts niveaux d’énergie élastique, et donc le risque de rupture

TABLEAU 6.5 – Étude OAT. Valeurs nominales de chaque paramètre.

R (cm)	ν_L	λ_L ($m^{1-\nu_L}$)	γ ($^\circ$)	ξ	\bar{e}	μ_{BO} (μdef)
4	0,65	45	26	0,4	-0,13	-650

R est le rayon à l'insertion, (ν_L, λ_L) représentent l'allométrie en longueur, γ l'angle moyen avec l'horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l'excentricité et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.

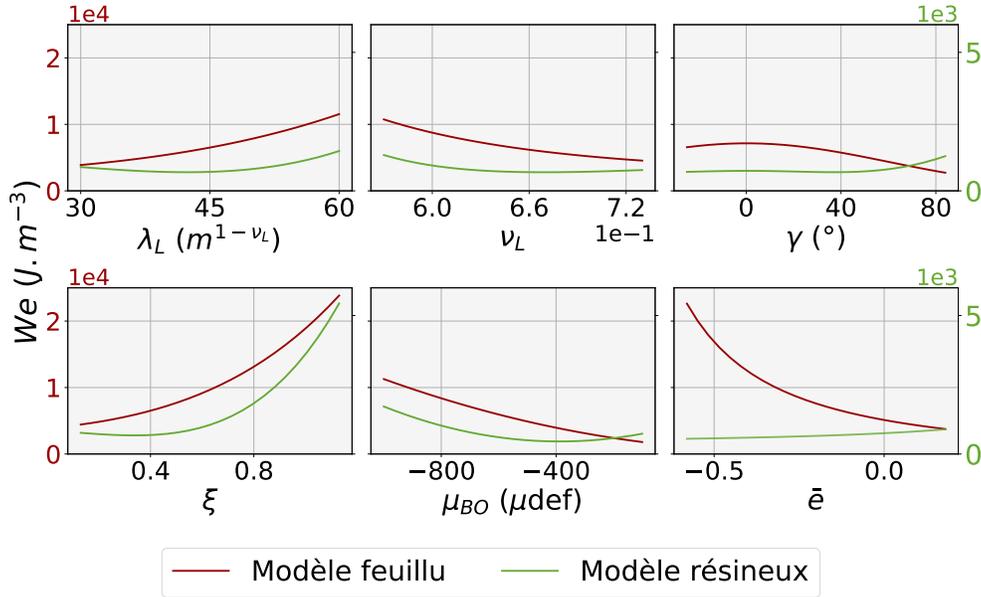


FIGURE 6.7 – Étude OAT. Évolution de la densité d'énergie élastique stockée w_e en fonction de chacun des paramètres d'entrée du modèle. R est le rayon à l'insertion, (ν_L, λ_L) représentent l'allométrie en longueur, γ l'angle moyen avec l'horizontal, ξ la masse de la branche, \bar{e} l'excentricité moyenne dans la section et μ_{BO} la déformation dans le bois opposé.

par propagation de fissure. Cela pourrait expliquer pourquoi les feuillus sont sur-représentés dans les observations de casses faites par les professionnels (figure 2.16, 88% des cas), ou relayées dans la presse (figure 2.6, avec 8 essences sur 9 identifiées, au biais déjà discuté de la représentation des essences en milieu urbain près). Ainsi, dans l'hypothèse où les casses brutales et inexplicables sont corrélées avec les niveaux d'énergie stockés dans la section, les feuillus seraient plus propices à casser que les résineux.

Toujours chez le feuillu, les schémas de variation sont cohérents : plus une branche est lourde (ξ, λ_L importants), plus les niveaux d'énergie mis en jeu sont importants. Concernant l'angle γ , le maximum est atteint pour une branche horizontale ($\gamma = 0$), et décroît au fur et à mesure que l'angle augmente, en cohérence également avec l'évolution du moment de flexion. Enfin,

la cohérence se retrouve aussi dans les variations de w_e en fonction de la déformation dans le bois opposé μ_{BO} : plus cette déformation est élevée, plus l'énergie stockée est importante. En revanche, les variations avec l'exposant allométrique ν_L sont contre-intuitives : un coefficient élevé indique un chargement plus important, et pourtant une énergie stockée plus faible. Cela vient de la manière dont le problème a été paramétrisé : les morphologies ont été construites en se basant sur la géométrie des branches à l'état final. En fixant cet état, augmenter l'exposant revient à faire diminuer le poids des paramètres dans les stades jeunes : les étapes passées sont donc relativement plus chargées au fur et à mesure que l'exposant diminue. Enfin, les variations en fonction de l'excentricité sont cohérentes avec ce qu'il a été observé dans le chapitre précédent : faire de l'excentricité hypotrophique ($\bar{e} < 0$) n'est pas bénéfique mécaniquement pour la branche, car cela amène à augmenter considérablement son énergie stockée. Ainsi l'excentricité hypotrophique chez le feuillu ne serait ni dans le sens d'une optimisation du contrôle postural, ni dans celui d'une diminution du risque de rupture. Cela confirmerait l'hypothèse selon laquelle l'excentricité serait une variable d'ajustement, pilotée par d'autres tropismes que la gravité seule. Attention, cela ne veut pas dire que son rôle est secondaire, loin de là ; en témoigne l'étude des indices de Sobol, qui a montré son importance capitale dans les niveaux d'énergie élastique stockée.

De plus, lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble des paramètres, on observe que les tendances ne correspondent pas exactement à celles quantifiées par l'analyse des indices de Sobol. On remarque en effet une nette domination des termes d'excentricité moyenne \bar{e} et d'indicateur de masse ξ , là où les parts cumulées des deux indices IS_1 et IS_2 indiquent une contribution plus uniforme des paramètres $(\lambda_L, \nu_L, \xi, \gamma, \bar{e})$. Comme précisé en amont de cette analyse, cela s'explique par le fait que l'analyse OAT ne représente qu'une fraction de l'espace total des variables d'entrée, qui présente un important conditionnement aux valeurs nominales choisies.

Chez le résineux, la situation est plus complexe à analyser. En effet, pour de nombreux paramètres, on observe un extremum local sur les variations, qui, contrairement au feuillu, ne sont donc pas strictement croissantes ou décroissantes. Prenons l'exemple de la variation en λ_L : sur l'intervalle $I(\lambda_L) = [30; 45]$, la densité d'énergie diminue avec l'augmentation de la longueur, puis sur la plage $I(\lambda_L) = [45; 60]$, cette dernière augmente. Pour comprendre ce comportement assez contre intuitif sur la première plage, il faut s'intéresser à la distribution de la contrainte dans la section. Une représentation des profils sur l'axe $y = 0$ est proposée dans la figure 6.8. Lorsque que le chargement est faible (jeune branche ou extrémité de branche), il n'y a pas besoin de faire du bois de compression pour maintenir l'orientation de la branche. C'est le cas pour $\lambda_L = 30$ (courbe grise). Puis lorsque le chargement augmente ($\lambda_L = 45$, courbe en vert clair), le bois de compression se met en place. Durant cette transition, la zone supérieure de la branche passe d'un état de compression à un état de tension, tandis que la zone inférieure passe de tension à compression. Ce changement progressif passe nécessairement par un profil qui minimise l'énergie stockée. C'est ce même phénomène, mais inverse, qui explique que lorsque la branche s'approche de la verticale (lorsque γ s'approche de 90°), l'énergie stockée augmente : le chargement diminue, donc la présence de bois de compression n'est plus nécessaire pour maintenir l'orientation, ce qui amène un profil de

contrainte en « V » similaire à celui obtenu pour $\lambda_L = 30$ dans la figure 6.8.

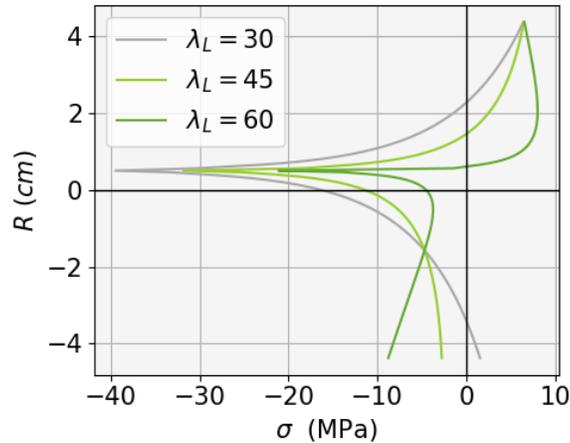


FIGURE 6.8 – Étude de sensibilité. Cas du résineux. Profil de contrainte longitudinale sur le diamètre $y = 0$, pour différentes valeurs de λ_L .

Également, il est observé que l'étude OAT ne met pas du tout en évidence l'effet de l'excentricité, qui se manifeste majoritairement en termes croisés.

6.4 Conclusion

L'étude de sensibilité proposée se base sur une hypothèse forte : celle que l'énergie élastique stockée dans la branche au cours de sa vie (en termes de contrainte longitudinale) joue un rôle important dans la propension d'une branche à casser. Différentes conclusions ont été dégagées. Tout d'abord, le niveau moyen d'énergie stockée est plus important chez le feuillu (d'un facteur 3 à 4) que chez le résineux. Cela suggère un état mécanique particulier qui pourrait expliquer la forte présence de feuillus dans les reports de casses inexplicables. L'étude de sensibilité montre aussi que sur les intervalles de variations considérés, l'ensemble des paramètres présentaient chez le feuillu une contribution assez homogène à l'énergie élastique stockée. Parmi ces contributions, l'excentricité moyenne fait figure importante ; l'énergie stockée augmentant de manière forte avec l'hypotrophie de l'excentricité. Cela confirme les conclusions du chapitre précédent, et souligne que l'excentricité, chez le feuillu, n'aurait vraisemblablement pas un rôle majeur dans la réponse au poids, ni dans la prévention de la casse vis-à-vis du poids propre. Chez le résineux, deux points intéressants ont été mis en évidence. Le premier est l'absence d'influence de la valeur nominale de la déformation dans le bois opposé. Le deuxième est la mise en évidence d'une zone de transition en réponse à l'augmentation continue du chargement, qui se traduit par la création progressive de bois de compression. Dans cette zone de chargement, l'énergie stockée diminue. Ainsi dans un certain intervalle, des branches plus chargées que d'autres peuvent finalement se retrouver

avec une énergie stockée plus faible ; ce qui pourrait assurer leur sécurité vis-à-vis de la casse liée au poids propre.

Il serait intéressant de compléter cette étude avec d'autres scénarios d'évolution de courbure. Dans cette première approche, nous nous sommes fixé sur un scénario « stationnaire » qui maintient la rectitude de la branche. D'autres scénarios qui peuvent être liés à des tropismes par exemple, affaissement passif, redressement actif, pourraient être envisagés. Cela pourrait permettre de quantifier l'évolution des moteurs tropiques (excentricité et gradient de maturation) en fonction de la variation de courbure. On peut aussi envisager de prendre en compte le caractère plastique des cellules du bois ; ce qui permettrait de rendre le modèle plus réaliste et limiterait l'artefact de contraintes au niveau de la moelle.

Chapitre 7

Dimensionnement des branches face à leur poids propre

Sommaire

7.1	Introduction	194
7.2	Matériels et méthode	194
7.2.1	Protocole expérimental	194
7.2.2	Échantillonnage	195
7.2.3	Caractérisation des données	197
7.3	Résultats et discussion	197
7.3.1	Paramètres qualitatifs : influence de la saison et de l'essence	197
7.3.2	Influence de caractéristiques physiques de la branche	201
7.3.3	Conclusion	201
7.4	Complément d'étude : modélisation des essais de sciage	203
7.4.1	Modélisation numérique de l'essai	204
7.4.2	Solution pseudo-analytique et validation de l'implémentation numérique	205
7.4.3	Application et perspectives	209
7.4.4	Quand la branche casse-t-elle vraiment ?	210
7.5	Conclusion	216

7.1 Introduction

Les chapitres précédents ont permis de mieux comprendre certains traits mécaniques du dimensionnement des branches. Même si alimentée par des données expérimentales indispensables, l'approche a été principalement théorique et se positionne comme un travail sous-jacent à celui de la compréhension des casses inexplicées. Dans ce chapitre, une approche basée sur des expérimentations est proposée : il s'agit de proposer une méthode expérimentale originale visant à caractériser le surdimensionnement des branches par rapport à leur poids propre. Les casses inexplicées sont des casses soudaines et correspondent à un instant où la branche n'est plus capable d'assurer le maintien de sa propre charge. L'objectif est d'estimer à quel point une branche est surdimensionnée par rapport à cette charge, et si ce surdimensionnement présente des critères de variabilité liés à la branche (âge, masse, morphologie, position dans l'arbre, essence, etc.) ,ou à son environnement.

Pour cela, un protocole expérimental de caractérisation du surdimensionnement des branches à leur poids propre a été conçu, et appliqué à l'échantillonnage décrit dans le chapitre précédent. L'analyse des résultats a permis de discuter des paramètres influençant ce surdimensionnement. En complément, une modélisation des essais expérimentaux est proposée, et permet d'ouvrir des perspectives intéressantes en terme d'amélioration de notre protocole de caractérisation mécanique *in situ* des branches d'arbres.



FIGURE 7.1 – *Le surdimensionnement des branches. Illustration sur une branche d'amandier (longueur 4,5m).*

7.2 Matériels et méthode

7.2.1 Protocole expérimental

L'objectif initial était de mettre au point un protocole très simple, qui pourraient ensuite, une fois son intérêt validé et dans une approche de sciences participatives, être diffusé auprès de professionnels afin de récolter de grandes quantités de données expérimentales. Le protocole imaginé consiste au sciage progressif d'une branche, près du point d'insertion, depuis sa face supérieure, jusqu'au premier signe d'amorce de sa rupture. Une fois la branche au sol, les paramètres géométriques sont mesurés (longueur L , distance entre le point de coupe et le centre de gravité L_g , angle entre le point de coupe et le centre de gravité γ). La masse totale de la branche m est aussi mesurée. Enfin, sur la section de coupe, on relève l'excentricité de

croissance secondaire moyenne \bar{e} et les rayons R_x et R_y . Dans un second temps, la section coupée est récupérée, ramenée au laboratoire, prise en photo et traitée par analyse d'image afin d'identifier et de caractériser les deux portions de section : du début jusqu'au moment de l'amorce de rupture, et la portion de section résiduelle non découpée au moment de la rupture. Enfin, plusieurs type d'indicateurs de surdimensionnement peuvent être envisagés. Nous proposons un indicateur de surdimensionnement simple η_h , défini comme le rapport de la profondeur verticale de l'entaille h_c à la dimension correspondante de la section de la branche h_t :

$$\eta_h = \frac{h_c}{h_t} \quad (7.1)$$

Ces deux dimensions sont représentées sur une section coupée, dans les figures 7.2d,e,f. Ce facteur ne prend pas en compte le champ de précontrainte de la branche. En cela, ce n'est pas un facteur qui donne une valeur absolue du surdimensionnement réel. Conceptuellement, $\eta_h = 0$ signifie que la branche ne peut pas tenir son propre poids. Au contraire, $\eta_h = 1$ est le cas théorique pour lequel la branche tient quelle que soit la profondeur de l'entaille. Ainsi η_h doit être pris comme un indicateur pour discuter de la variabilité du surdimensionnement en fonction des configurations des branches. Différentes étapes du protocole sont illustrées dans la figure 7.2.

7.2.2 Échantillonnage

L'échantillonnage est le même que celui présenté dans le chapitre précédent. Néanmoins, nous y ajoutons ici quelques éléments. En effet, cet échantillonnage a été construit pour étudier les variations du facteur de surdimensionnement à différents paramètres, notamment :

1. **La morphologie de la branche et son inclinaison** : représentées par les paramètres (R, L_g, L, m, γ) . Plus de détails sur l'utilisation de ce jeu de paramètres sont donnés ultérieurement.
2. **L'essence** : caractérisée par une géométrie propre (cf chapitre 6) et une architecture spécifique à l'échelle de l'arbre [Hallé et al. (1978)]. À cette géométrie est associée une anatomie spécifique (densité, AMF, etc.) , qui caractérise le comportement mécanique de l'essence et qui pourrait jouer un rôle dans la tenue mécanique des branches. Cependant, le degré d'analyse de cette étude n'ira pas jusqu'à ce spectre d'analyse.
3. **Le moment de l'année** : qui ramène à la question sur un éventuel lien entre le surdimensionnement des branches et la saison (statut hydrique, température, etc).

Notre échantillonnage permet de questionner les deux premiers points. Pour le troisième, la disponibilité du matériel végétal et la difficulté logistique qu'implique une telle expérimentation ont limité l'étude à une seule essence. Il s'agit d'un noyer (NG38). Cela explique pourquoi cette essence est sur-représentée dans le tableau 6.1. Également, pour limiter les biais d'expérimentation, les espèces étudiées ont été choisies (dans la mesure du possible), dans des zones géographiques limitées. Trois campagnes distinctes ont été menées :

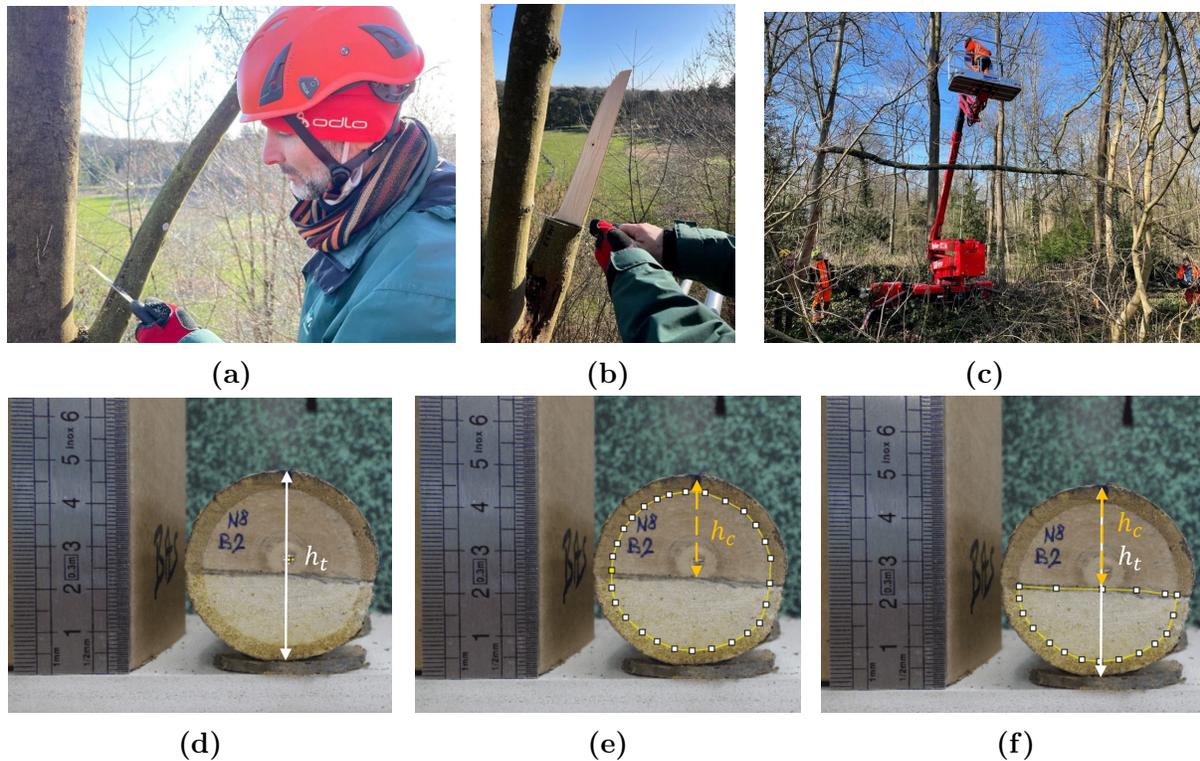


FIGURE 7.2 – Protocole d'évaluation du surdimensionnement mécanique des branches par rapport à leur poids propre : a) Sciage de la branche jusqu'à l'amorce de rupture, b) Exemple de profil typique après rupture, c) Mesures de la morphologie (ici mesure de la masse et positionnement du centre de gravité), (d-f) Étude des sections en laboratoire : e) Détourage de la section pleine, f) Détourage de la section résiduelle après coupe. Sur ces sections, h_c et la profondeur d'entaille et h_t et la dimension correspondante de la section sont également représentées.

1. Sur le site de INRAE de Crouel (Clermont-Ferrand, Puy de Dome, France). Cette campagne concerne exclusivement le noyer NG38 et est étalée sur toute l'année 2022.
2. Au parc de Sceaux (Sceaux, Hauts de Seine, France). Cette expérimentation a été possible grâce au soutien de P. Bujon (chef d'entreprise chez SARL AGENCE DE L'ARBRE¹⁵) et du département des Hauts-de-Seine. La campagne s'est déroulée en hiver, les 15 et 16 février 2022. Trois essences, issues du même site, ont été étudiées : du frêne *Fraxinus americana*, de l'érable *Acer negundo* et du merisier *Prunus avium*.
3. À Toulaud (Ardèche, France), dans la propriété d'E. Badel. Sur les années 2021 et 2022, trois essences ont été mesurées : du pin parasol *Pinus pinea* sur les mois d'avril-mai 2021, du peuplier I214 sur les mois de septembre-octobre 2022, et du chêne pubescent *Quercus pubescens* en mai 2022.

7.2.3 Caractérisation des données

Dans un premier temps, l'influence de la saison et de l'essence sur le surdimensionnement ont été analysés à l'aide d'analyse de variance ANOVA à 1 facteur, puis, dans le cas où une corrélation est mise en évidence, d'un test des étendues de Tukey.

Dans un deuxième temps, la corrélation entre le facteur de surdimensionnement et l'ensemble des déterminants $(R_x, R_y, L, L_g, m, \gamma, \bar{e})$ a été quantifiée par corrélation de Pearson. Cependant, pour éviter les redondances, les corrélations n'ont pas faites sur l'ensemble des déterminants, mais sur une partie d'entre eux, ainsi que des quantificateurs adimensionnés ; notamment :

- le rayon R .
- un indicateur de masse : dans le chapitre précédent, le descripteur ξ , associé à la géométrie d'un cylindre avec défilement linéaire, avait été pris en compte pour décrire l'effet de masse. Fixer une géométrie était nécessaire pour éviter les dé-corrélations masse/taille dans l'étude de sensibilité. N'ayant pas ce risque ici, la donnée $\chi = L_g/L$, dont la relation (unique) à ξ a été démontrée dans le chapitre précédent, sera choisie comme indicateur de masse.
- un indicateur d'élanement $\zeta = L/D$, avec D le diamètre de la branche.
- un indicateur de l'orthotropie de la branche : l'angle avec l'horizontale γ .

L'ensemble des tests statistiques ont été effectués sur le logiciel R (version 4.2.2) [R Core Team (2021)], à l'aide du paquet *rstatix* [Kassambara (2022)].

7.3 Résultats et discussion

7.3.1 Paramètres qualitatifs : influence de la saison et de l'essence

Une première attention est portée sur la distribution du coefficient η_h , représentée dans la figure 7.3, toutes essences confondues. Avec une valeur médiane $\text{Me}(\eta_h) = 0,56$ similaire à sa valeur moyenne $\bar{\eta}_h = 0,55$, cette distribution approche une loi normale, conformément à la distribution des autres paramètres.

En termes pratique, cela signifie que lors des essais, pour la majorité des branches, plus de la moitié (modulo le degré de circularité de la section) de la section était coupée avant que la branche ne cède. Comme expliqué précédemment, en l'absence de prise en compte du champ de précontrainte initial, il est compliqué de donner une interprétation mécanique rigoureuse à ce coefficient. Néanmoins, sa forte valeur met en évidence que les branches semblent globalement fortement surdimensionnées par rapport à leur poids mais qu'il existe une forte variabilité autour de cette valeur moyenne avec des extrêmes inférieurs à $\eta_h = 0,4$ et d'autres supérieurs à $\eta_h = 0,8$.

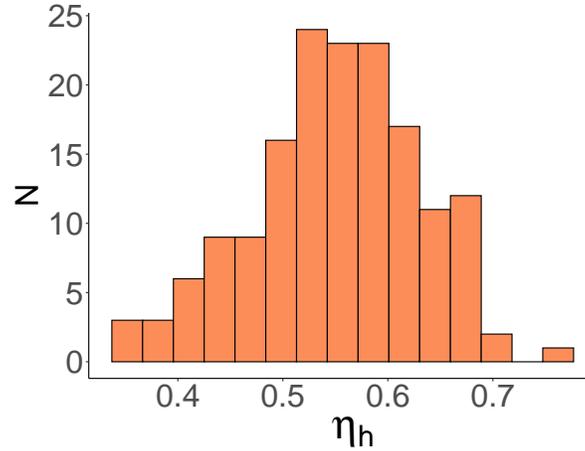


FIGURE 7.3 – Distribution fréquentielle de l’indicateur du surdimensionnement η_h

Influence de la saison

Le test ANOVA¹ (résumé dans le tableau 7.1) met en évidence une différence significative entre les saisons ($p = 1,7e - 5$). Ce test présente un éta carré généralisé $\eta^2 = 0,388$, ce qui signifie que que 38,8% des variations de l’indicateur de surdimensionnement sont attribuables aux saisons. Pour caractériser plus finement les variations inter-saisons, un test post-hoc de Tukey [Tukey (1949)] a été réalisé. Ce dernier (dont les résultats sont synthétisés dans le tableau 7.2) met en évidence que seul l’été se différencie statistiquement des autres saisons. Durant cette saison, l’indicateur de surdimensionnement est en moyenne plus faible de 6% qu’en automne, de 8% qu’au printemps et de 8% qu’en hiver. Les autres comparaisons inter-saisons ne sont pas significatives (figure 7.4).

TABLEAU 7.1 – Test ANOVA à un facteur sur l’impact des saisons.

Source	SC	DDL	CM	F-value	p-value
Saison	0,074	3	0,024	10,56	$1,7e - 5^{***}$
Résidus	0,117	55	0,0023		

SC : Somme des Carrés ; DDL : Degrés De Liberté ; CM : Carrés Moyens. Le test est significatif ($p < 0,05$).

Ce premier résultat semble en accord avec les observations rapportées par les professionnels qui semblaient indiquer que la casse inexplicquée survient majoritairement en été, et renforce ainsi l’hypothèse d’un potentiel rôle de la température. Néanmoins, il convient aussi de

1. L’échantillonnage étudié étant restreint (Noyer, 55 mesures), nous avons validé l’adéquation du jeu de données avec une analyse ANOVA par de nouveaux tests de normalité (Shapiro-Wilk [Shapiro and Wilk (1965)], $p = 0,99$) et d’homogénéité des variances (Fligner-Killeen [Azzalini (1985)], $p = 0,4$)

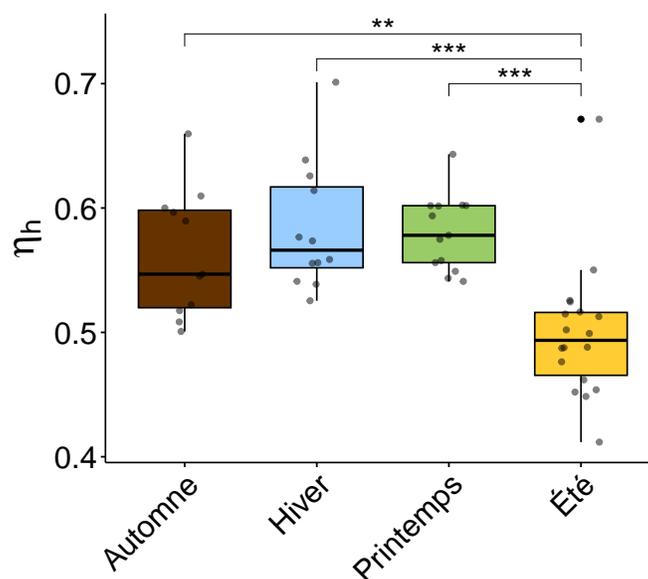


FIGURE 7.4 – Evolution de l'indicateur de surdimensionnement η_h en fonction de la saison.

TABLEAU 7.2 – Test de Tuckey sur l'impact des saisons

	Saison			
	Printemps	Été	Automne	Hiver
Printemps	0	-0,08***	0,01 <i>ns</i>	-0,003 <i>ns</i>
Été		0	0,06**	0,08***
Automne			0	0,02 <i>ns</i>
Hiver				0

Les valeurs données sont les différences estimées des valeurs moyennes par saison. L'indicateur *ns* signifie que la différence n'est pas statistiquement significative, contrairement aux étoiles : ** indique une *p*-value entre 0,01 et 0,1, *** inférieure à 0,001.

mentionner les nombreux changements physiologiques qui s'opèrent en été, et dont le rôle dans la tenue de la branche ne sont pas approfondis dans ce travail : le statut hydrique de l'arbre, l'augmentation du poids liée à la charge du feuillage et à la teneur en eau du bois plus élevée, ainsi qu'un potentiel effet de la ramification.

Il reste que ces résultats obtenus sur le noyer doivent être confirmés sur d'autres essences avant d'être généralisés et de valider le rôle important de la saison sur le surdimensionnement des branches. Une campagne de grande ampleur élargie à d'autres essences est donc nécessaire

pour confirmer cette tendance, ce qui promet des perspectives intéressantes. L'ampleur du travail à considérer est telle que l'idée d'un projet de sciences participative impliquant des professionnels de l'élitage, mais pourquoi pas aussi le grand public, pourrait ici trouver tout son sens.

Influence de l'essence

L'été étant donc une saison qui se détache des autres, nous avons étudié la variabilité inter-spécifique du facteur η_h sur l'ensemble des mesures prises pendant l'hiver, l'automne et le printemps. Cela rassemble l'ensemble des campagnes de mesures réalisées (tableau 6.1); excepté celles du Noyer NG38 en été. Les résultats du test ANOVA sont synthétisés dans le tableau 7.3. Le test statistique est significatif; avec un éta carré généralisé $\eta^2 = 0,15$; signifiant que l'essence explique 15% des variations de l'indicateur η_h . Le test de Tukey correspondant montre que l'essentiel de ces variations sont imputées au frêne, qui est significativement différent du merisier, du noyer et du peuplier, comme le montre la figure 7.5. Toutes les autres comparaisons inter-spécifiques se révèlent non significatives. Cependant, au regard des différences de moyennes qui semblent se dégager graphiquement, et de la variabilité intra-essence importante, ici encore, ces premiers résultats invitent à proposer une campagne pour augmenter le nombre d'essais par essence et à élargir à d'autres essences, en particulier résineuses.

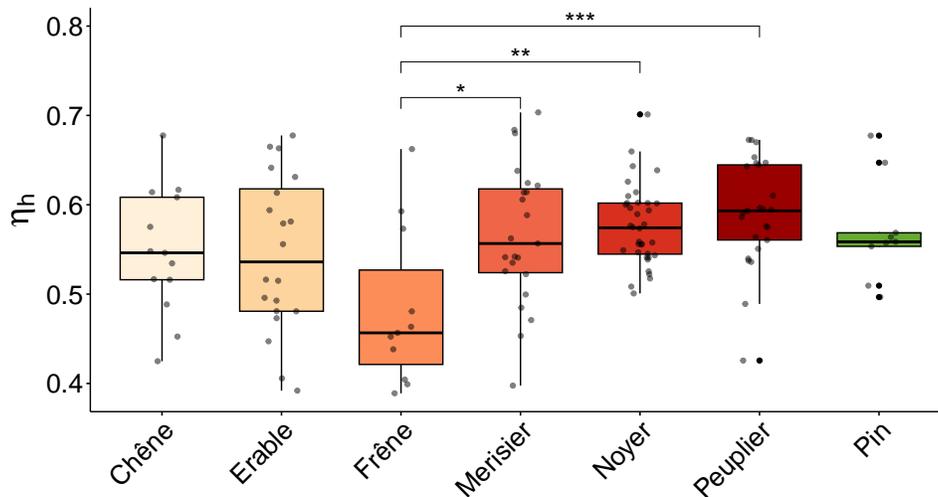


FIGURE 7.5 – Variation de l'indicateur de surdimensionnement mécanique des branches η_h en fonction de l'essence (valeurs mesurées en automne, hiver et printemps).

TABLEAU 7.3 – Test ANOVA à un facteur sur l'impact des essences.

Source	SC	DDL	CM	F-value	p-value
Essence	0,1062	6	0,018	3,856	0,0014**
Résidus	0,5969	130	0,005		

SC : Somme des Carrés ; DDL : Degrés De Liberté ; CM : Carrés Moyens. Le test est significatif ($p < 0,05$).

7.3.2 Influence de caractéristiques physiques de la branche

La corrélation entre η_h et le quadruplet $(R, \chi, \zeta, \gamma, \bar{e})$ a été évaluée par une suite de tests de corrélation de Pearson. Les valeurs des coefficients de corrélation trouvés ainsi que leur seuil de significativité sont représentés dans le tableau 7.4. L'indicateur de surdimensionnement semble corrélé à quelques caractéristiques physiques telles que l'élanement ζ , l'angle d'insertion γ et l'indicateur de masse χ . Il ne semble cependant pas lié du tout ni au diamètre, ni à l'excentricité moyenne. Le fait que η_h ne soit pas du tout corrélé au rayon confirme ce

TABLEAU 7.4 – Coefficients de Pearson entre l'indicateur de surdimensionnement η_h et l'ensemble des paramètres de croissance mesurés sur la branche $(R, \chi, \zeta, \gamma, \bar{e})$.

$\eta_h \sim R$	$\eta_h \sim \chi$	$\eta_h \sim \zeta$	$\eta_h \sim \gamma$	$\eta_h \sim \bar{e}$
-0,05 <i>ns</i>	-0,24**	-0,34***	0,25**	0,13 <i>ns</i>

R est lié à la section de la branche, χ est associé à sa masse, γ à l'angle avec l'horizontal, ζ correspond à son élanement, \bar{e} son excentricité moyenne. L'indicateur *ns* signifie que la corrélation n'est pas statistiquement significative ($p > 0,1$). Pour les autres indicateurs : ** pour $p \in [0,001, 0,01]$ et *** pour $p < 0,001$.

qu'avait suggéré l'analyse de sensibilité (en montrant que quelque soit le mode de croissance, le rayon n'influçait pas la variation de densité d'énergie élastique stockée). Même si elle est faible, la corrélation négative de η_h avec l'élanement ζ pourrait expliquer le fait que le frêne casse plus vite. C'est en effet l'essence qui montre les élanements les plus importants (figure 6.2). Ce résultat questionne aussi le rôle de la loi d'allométrie régissant la relation entre diamètre et longueur de l'axe.

7.3.3 Conclusion

Les résultats obtenus nous amènent à conclure que sur l'échantillonnage mesuré, le surdimensionnement des branches ne semble pas conditionné au rayon (R), et à l'excentricité

moyenne (\bar{e}) des branches. Une faible corrélation a cependant été mise en lumière entre le surdimensionnement et la masse (χ), l'élanement (ζ) et l'angle d'inclinaison (γ). Les premiers résultats de nos campagnes semblent indiquer qu'il pourrait y avoir une variabilité inter-spécifique qui reste à confirmer par des mesures complémentaires. L'étude de la variabilité inter-saisons du surdimensionnement a montré que c'est le premier facteur explicatif (38%) des variations. En particulier, les branches seraient moins surdimensionnées durant l'été (entre 5 et 10 % de moins) que pendant les autres saisons. Ceci pourrait constituer l'un des facteurs explicatifs des casses inexplicables.

Il reste maintenant à compléter ces premières campagnes de mesures, afin de confirmer ce rôle de la saison mais aussi trancher sur la potentielle variabilité inter-spécifique et sur certaines caractéristiques physiques qui pourraient à terme aider à proposer des indicateurs aux professionnels de la gestion des arbres. Enfin, il faut toujours garder à l'esprit que notre échantillonnage est biaisé par des considérations pratiques (accès aux arbres, accès aux branches, gamme de dimensions et poids des branches assez réduite, etc). Pour apprécier la variabilité intra-arbre, il serait par exemple intéressant d'échantillonner la totalité des branches d'un arbre adulte (dimension, âge et position de la branche dans le houppier, etc). Également, d'autres paramètres inter-arbres pourraient être considérés comme son statut (isolé ou non, dominé ou dominant) ou son exposition au vent.

L'une des principales limites de cette expérimentation est l'absence de prise en compte du champ de contraintes initial de la branche. C'est d'ailleurs pour cette raison que le facteur η_h n'est qu'un indicateur, dont la valeur absolue est difficilement transférable à une interprétation mécanique. Dans cette deuxième partie de chapitre, nous proposons une modélisation de l'essai de sciage progressif, incluant la prise en compte de ce champ. Ce volet de modélisation a plusieurs objectifs :

- Mieux comprendre l'essai. Si le protocole est trivial, comprendre la redistribution des contraintes et les raisons qui amènent la branche à casser pour une entaille donnée est complexe. En cela, la modélisation est un bon outil pour visualiser les dynamiques de redistribution, et analyser comment ces dynamiques varient en fonction de profils standards de précontraintes (bois de tension *vs* bois de compression, sections excentrées *vs* sections centrées).
- Donner une approximation du seuil de rupture *in situ* des branches. Cette donnée aujourd'hui méconnue est pourtant primordiale pour comprendre le dimensionnement mécanique des branches. C'est par ailleurs une donnée de premier plan lorsque l'on cherche à appréhender des problématiques de rupture. Un essai complet supposerait alors de connaître le champ de précontrainte de la branche, et de supposer un sens de rupture (traction ou compression).

7.4 Complément d'étude : modélisation des essais de sciage

Pour effectuer cette analyse, des hypothèses fortes ont été formulées : les effets de concentrations de contraintes au bord du trait de scie sont négligés, et le cadre théorique adopté est encore une fois celui de la résistance des matériaux.

Avant sciage, la section S_t (cercle de rayon R) a donc un champ de précontraintes σ_{ini} donné, qui lui permet, malgré la charge du poids, de maintenir sa posture. Le sciage est modélisé par une découpe horizontale : au fur et à mesure que la profondeur d'entaille h_c augmente, l'ensemble des contraintes internes à la section coupée S_c se répartit sur la section restante. La répartition est linéaire, centrée sur la ligne neutre de la section résiduelle S_r , conformément au cadre analytique fixé. La situation de référence est illustrée dans la figure 7.6. Les notations sont les mêmes qu'au chapitre 4.

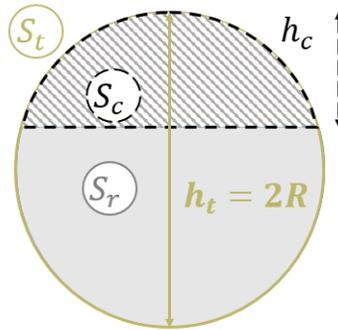


FIGURE 7.6 – Modélisation de l'essai de sciage. S_c représente la section coupée, S_r la section résiduelle et S_t la section totale. h_c représente la hauteur coupée, et h_t la hauteur totale de la section.

En appelant $\Delta\sigma_h$ l'incrément de contrainte engendré par la coupe d'une profondeur h_c , on obtient le système d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equilibre normal : } \int_{S_r} \Delta\sigma dS = \int_{S_c} \sigma_{ini} dS \\ \text{Equilibre en flexion : } \int_{S_r} x' \Delta\sigma dS = \int_{S_c} x' \sigma_{ini} dS \end{array} \right. \quad (7.2a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Equilibre normal : } \int_{S_r} \Delta\sigma dS = \int_{S_c} \sigma_{ini} dS \\ \text{Equilibre en flexion : } \int_{S_r} x' \Delta\sigma dS = \int_{S_c} x' \sigma_{ini} dS \end{array} \right. \quad (7.2b)$$

La loi de comportement adoptée suit la loi de Hooke :

$$\Delta\sigma_h = E\Delta\epsilon_h = E(\Delta a_h + x'\Delta b_h) \quad (7.3)$$

Avec, de manière similaire au chapitre 4, Δa_h l'incrément de déformation au centre de la moelle et Δb_h l'incrément de courbure autour de l'axe x , $\Delta\epsilon_h$ la déformation correspondante. La combinaison des équations 7.2 et 7.3 permet de mettre le système 7.2 sous forme

matricielle :

$$\begin{pmatrix} K_0 & K_1 \\ K_1 & K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta a_h \\ \Delta b_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta P_0 \\ \Delta P_1 \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

avec les rigidités $K_n = \int_{S_r} (x')^n E dS$ et les seconds membres $\Delta P_n = \int_{S_c} (x')^n \sigma_{ini} dS$.

7.4.1 Modélisation numérique de l'essai

Pour discrétiser de manière adéquate les équations ci-dessus, un changement de maillage a été mis en place. En effet, si le maillage adaptatif (chapitre 4) « par cernes » (figure 7.7a) était adapté au calcul du champ de précontraintes, il ne l'est plus du tout à la modélisation du sciage. Le trait de scie étant supposé horizontal, un maillage cartésien (figure 7.7b), avec des éléments rectangulaires, est le plus adapté à la situation.

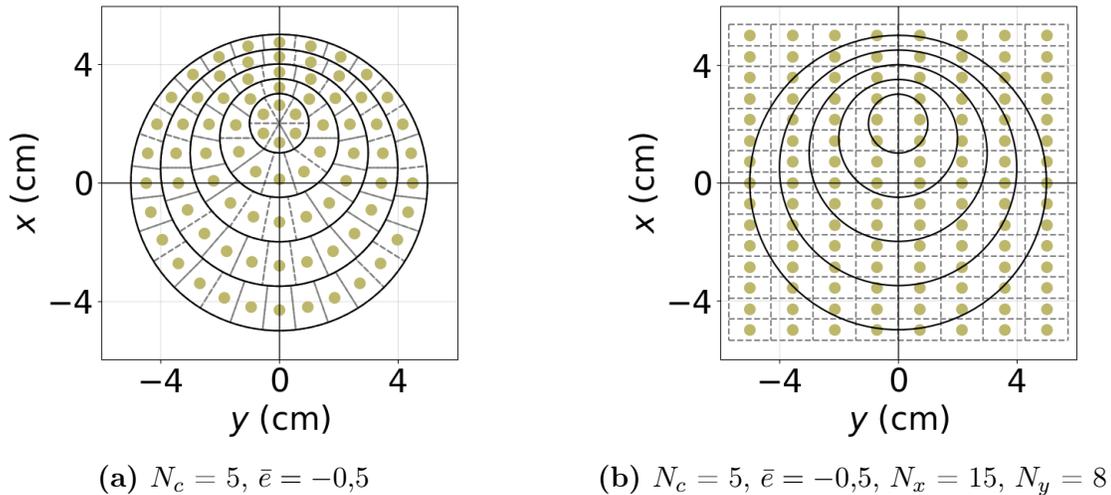


FIGURE 7.7 – Modélisation de l'essai de sciage. Passage d'un maillage adaptatif (a), adapté à la modélisation du champ de précontraintes, à un maillage cartésien (b), adapté à la modélisation du trait de coupe.

Ainsi dans un premier temps, un travail d'interpolation du deuxième maillage sur le premier a été effectué. Si le premier maillage était paramétrisé par le nombre de cernes N_c et le nombre d'éléments du k -ième cerne $N_e(k)$, le nouveau maillage cartésien est piloté par le nombre d'éléments contenus dans la plus petite longueur contenant la section, N_x dans le sens vertical et N_y dans le sens horizontal. Les deux maillages sont illustrés dans la figure 7.7.

Le maillage adaptatif ayant déjà été décrit dans le chapitre 4, seul le maillage cartésien est présenté ici. Pour celui-ci, un élément est repéré par le couple (i, j) . Les coordonnées du

centre géométrique associé (dans le repère de la moelle) sont définies comme suit :

$$\forall (i, j) \in ([0, N_x - 1] \times [0, N_y - 1]), (x'_i, y'_j) = (R - i\Delta x, -R + j\Delta y) \quad (7.5)$$

avec $\Delta x = 2R / (N_x - 1)$, $\Delta y = 2R / (N_y - 1)$.

En fixant la profondeur d'entaille $h_c = N_h \Delta x$, les différents termes du système 7.4 sont alors discrétisés :

$$K_n = \sum_{i=N_h}^{N_x-1} \sum_{j=0}^{N_y} (x'_i)^n E_{i,j} dx dy, \quad \Delta P_n = \sum_{i=0}^{N_h-1} \sum_{j=0}^{N_y} -(x'_i)^n \sigma_{ini}(x'_i, y'_j) dx dy$$

La résolution du système 7.4 permet alors de déterminer les composantes de la déformation ($\Delta a_h, \Delta b_h$). Ces composantes connues, la discrétisation de l'équation 7.3 donne l'incrément de contrainte $\Delta \sigma_h(x'_i, y'_j)$ sur la section résiduelle :

$$\Delta \sigma_h(x'_i, y'_j) = E (\Delta a_h + x'_i \Delta b_h) \quad (7.6)$$

La contrainte σ_t sur la surface résiduelle S_r s'écrit alors :

$$\sigma_t(x'_i, y'_j) = \sigma_{ini}(x'_i, y'_j) + \Delta \sigma_h(x'_i, y'_j) \quad (7.7)$$

7.4.2 Solution pseudo-analytique et validation de l'implémentation numérique

Dans un deuxième temps, une solution pseudo-analytique a été développée, afin de valider l'implémentation précédemment décrite. Les hypothèses de calculs sont les mêmes que celles du chapitre 4.

Également, pour simplifier le calcul, la section sera supposée centrée, sans excentricité. Cela signifie que les coordonnées exprimées dans le centre géométrique sont les mêmes que celles exprimées dans le repère de la moelle : $(x, y) = (x', y')$.

Enfin, pour calculer les intégrales K_n et ΔP_n , on définira l'angle de coupe θ_h (représenté sur la figure 7.8) lié à la profondeur de coupe h_c et tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_h = \arccos \left(\frac{R - h_c}{R} \right) \end{array} \right. \quad (7.8a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R - h_c}{R} \in [-1, 1] \end{array} \right. \quad (7.8b)$$

Calcul des rigidités

Le calcul des rigidités donne alors :

$$K_n = \iint_{S_r} x^n E r dr d\theta = \int_{-R}^{R-h} 2x'^n E ds(x)$$

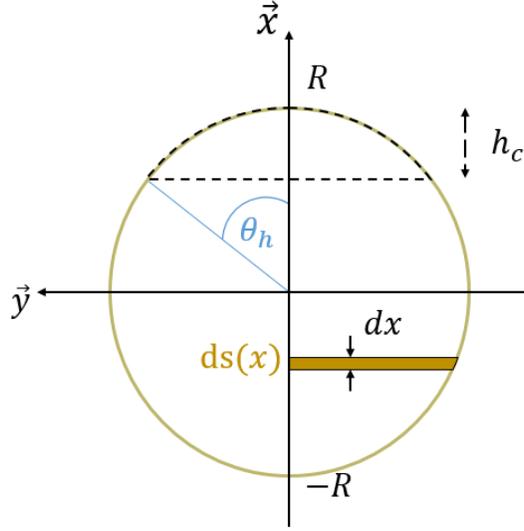


FIGURE 7.8 – Modélisation de l’essai sciage. Quelques éléments nécessaires au calcul : θ_h l’angle lié à la profondeur de coupe h_c , $ds(x)$ incrément de surface d’une tranche de longueur dx .

avec $ds(x) = R \sin \theta dx$ la surface d’une demi-tranche d’épaisseur dx (également représenté dans la figure 7.8). Le changement de variable $x = R \cos \theta$ conduit alors à l’expression :

$$K_n = 2ER^{n+2} \int_{\theta_h}^{\pi} \cos^n \theta \sin^2 \theta d\theta \quad (7.9)$$

Ce qui permet le calcul des coefficients K_n :

1. $K_0 = 2ER^2 \int_{\theta_h}^{\pi} \sin^2 \theta d\theta = 2ER^2 \int_{\theta_h}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\theta}{2} d\theta = ER^2 \left[\pi - \theta_h + \frac{1}{2} \sin 2\theta_h \right]$
2. $K_1 = 2ER^3 \int_{\theta_h}^{\pi} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = 2ER^3 \int_{\theta_h}^{\pi} \sin^2 \theta d(\sin \theta) = -\frac{2}{3}ER^3 \sin \theta_h$
3. $K_2 = 2ER^4 \int_{\theta_h}^{\pi} \cos^2 \theta \sin^2 \theta d\theta = \frac{1}{2}ER^4 \int_{\theta_h}^{\pi} \frac{1 - \cos 4\theta}{2} d\theta = \frac{1}{4}ER^4 \left[\pi - \theta_h + \frac{1}{4} \sin 4\theta_h \right]$

Calcul des incréments de chargement sur la section lors du sciage progressif

Le calcul des incréments de chargements lors du sciage progressif ΔP_n implique la connaissance du champ de contraintes initial σ_{ini} présent dans la section avant le sciage. L’expression de celui-ci est donnée dans l’équation 4.25, et rappelée ci dessous :

$$\begin{aligned} \sigma_{ini}(x, y, R) &= \sigma_0(x, y) + A_1 \ln \left(\frac{R}{R_{xy}} \right) + \frac{A_2}{A_3} (R^{A_3} - R_{xy}^{A_3}) + \frac{A_4}{A_5} (R^{A_5} - R_{xy}^{A_5}) \\ &+ x \left[B_1 \left(\frac{1}{R_{xy}} - \frac{1}{R} \right) + \frac{B_2}{B_3} (R^{B_3} - R_{xy}^{B_3}) + \frac{B_4}{B_5} (R^{B_5} - R_{xy}^{B_5}) \right] \end{aligned}$$

L'ensemble des coefficients A_i, B_i ainsi que la formulation de la contrainte σ_0 sont donnés dans la section 4.4. Pour simplifier le calcul, une transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées cylindriques conduit à l'expression :

$$\sigma_{ini}(r, \theta) = f(r) + g(r) \cos \theta \quad (7.10)$$

avec

$$\begin{cases} f(r) = \alpha + A_1 \ln \left(\frac{R}{r} \right) + \frac{A_2}{A_3} (R^{A_3} - r^{A_3}) + \frac{A_4}{A_5} (R^{A_5} - r^{A_5}) \\ g(r) = \beta + r \left[B_1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) + \frac{B_2}{B_3} (R^{B_3} - r^{B_3}) + \frac{B_4}{B_5} (R^{B_5} - r^{B_5}) \right] \end{cases}$$

Le calcul des rigidités donne alors :

$$\begin{aligned} 1. \Delta P_0 &= \int_{S_c} (f(r) + g(r) \cos \theta) ds \\ &= \int_{R-h_c}^R \left(\int_{-\theta_r}^{\theta_r} f(r) + g(r) \cos \theta d\theta \right) r dr \\ &= \int_{R-h_c}^R (2r f(r) \theta_r + 2r g(r) \sin \theta_r) dr \\ 2. \Delta P_1 &= \int_{R-h_c}^R \int_{-\theta_r}^{\theta_r} (f(r) + g(r) \cos \theta) r^2 \cos \theta dr d\theta \\ &= \int_{R-h_c}^R \left(2r^2 f(r) \sin \theta_r + 2r^2 g(r) \frac{2\theta_r + \sin 2\theta_r}{2} \right) dr \end{aligned}$$

avec $\theta_r = \arccos R - h_c/r$ l'angle de coupe au rayon r . On obtient :

$$\begin{cases} \Delta P_0 = \int_{R-h_c}^R F(r) dr \\ \Delta P_1 = \int_{R-h_c}^R G(r) dr \end{cases} \quad (7.11)$$

avec

$$\begin{cases} F(r) = 2r f(r) \theta_r + 2r g(r) \sin \theta_r \\ G(r) = 2r^2 f(r) \sin \theta_r + 2r^2 g(r) \frac{2\theta_r + \sin 2\theta_r}{2} \end{cases}$$

Le calcul des intégrales 7.11 a été effectué numériquement, en utilisant le module *scipy.integrate* de la bibliothèque SciPy [Virtanen et al. (2020)]. Avec la formulation choisie (champ de contraintes initial déterminé par $f(r), g(r)$), la solution pseudo-analytique n'est pas valable pour $h_c > R$. La comparaison entre l'implémentation incrémentale et la solution pseudo-analytique a donc été faite pour $h_c < R$. Pour fixer le champ de contrainte initial, les données du tableau 5.3 ont été prises en entrée du modèle. Il s'agit des données d'une grosse branche type issue de la maquette de *Prunus avium*. La déformation de maturation est fixée à $-1000 \mu\text{def}$ dans la partie supérieure et $-500 \mu\text{def}$ dans la partie inférieure.

Différentes extrapolations de la contrainte résultante σ sur l'axe $y = 0$ sont représentées dans la figure 7.9. La solution pseudo-analytique y est représenté en trait plein, et le résultat de la simulation incrémentale en points. Les résultats pour différentes profondeurs d'entaille y sont proposés. Pour obtenir le champ de contraintes initial, le nombre de cernes numériques a été fixé à $N_c = 50$. Puis, pour la discrétisation de l'espace, les paramètres N_x et N_y ont été pris tous les deux égal à 50.

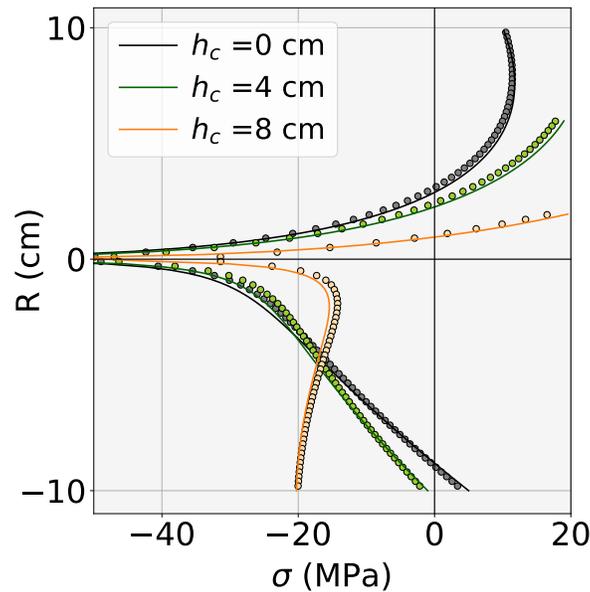


FIGURE 7.9 – Modélisation de l'essai de sciage. Comparaison entre la solution incrémentale (points) et pseudo-analytique (trait plein). Le rayon de la section est fixé à 8 cm, h_c représente la profondeur de coupe.

Les résultats obtenus montrent une bonne adéquation de la modélisation incrémentale avec la solution pseudo-analytique. Ceci permet de valider l'implémentation de la modélisation de l'essai de sciage, et d'examiner des cas plus variés qu'une section centrée avec une hauteur de coupe $h_c < R$. C'est ce qui est proposé dans la partie suivante.

7.4.3 Application et perspectives

Considérations générales

Pour ces premières simulations, nous avons considéré la situation d'une branche moyenne, dont la morphologie est basée sur des données mesurées (cf. tableau 6.5). La configuration a été choisie sans excentricité avec un rayon de 6 cm. Cela correspond à une branche d'environ 42 kg, pour une longueur d'environ 7 m ; ce qui est légèrement supérieur à la moyenne mesurée expérimentalement, mais qui est intéressant mécaniquement, la branche ayant un chargement non négligeable dans sa morphologie finale. Le scénario est la stationnarité de la rectitude de la branche. Un essai de sciage sur l'intégralité de la section a été modélisé. L'échantillonnage choisi est le même pour la suite de l'étude : $(N_c, N_x, N_y) = (100, 150, 150)$. Les résultats pour le modèle feuillu sont représentés dans la figure 7.10, ceux du modèle résineux dans la figure 7.11.

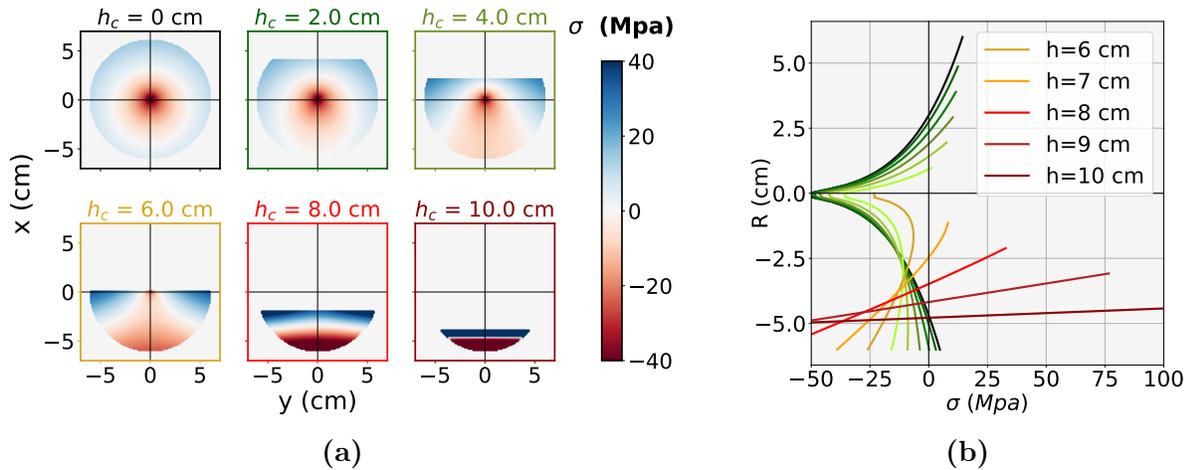


FIGURE 7.10 – Modélisation de l'essai de sciage. Simulation d'une section précontrainte avec du bois de tension (cas de feuillu). a) Représentation du champ de contraintes total pour différentes profondeurs d'entaille h_c . b) Interpolation de la contrainte sur l'axe $y=0$, pour des profondeurs incrémentées de 1 cm.

Dans les deux cas, la sous-figure (a) représente les champs de contraintes résultant des coupes successives (incrément de 2 cm). Dans la sous figure (b), le lecteur trouvera les profils de contraintes interpolés sur l'axe $y = 0$, pour des incréments de coupe de 1 cm. Que ce soit pour le feuillu ou le résineux, on constate le même comportement : on observe une mise en compression progressive de la partie inférieure de la section, qui n'est pas linéaire en h_c , ce qui s'explique par un couplage des effets « incrément de chargement » et « décrétement de section ». Sur les premiers centimètres de coupe, l'incrément de chargement est petit, et s'applique sur une surface importante. La redistribution est donc faible devant le champ de précontraintes initial. C'est au niveau de la ligne neutre que les effets sont les plus importants (incrément

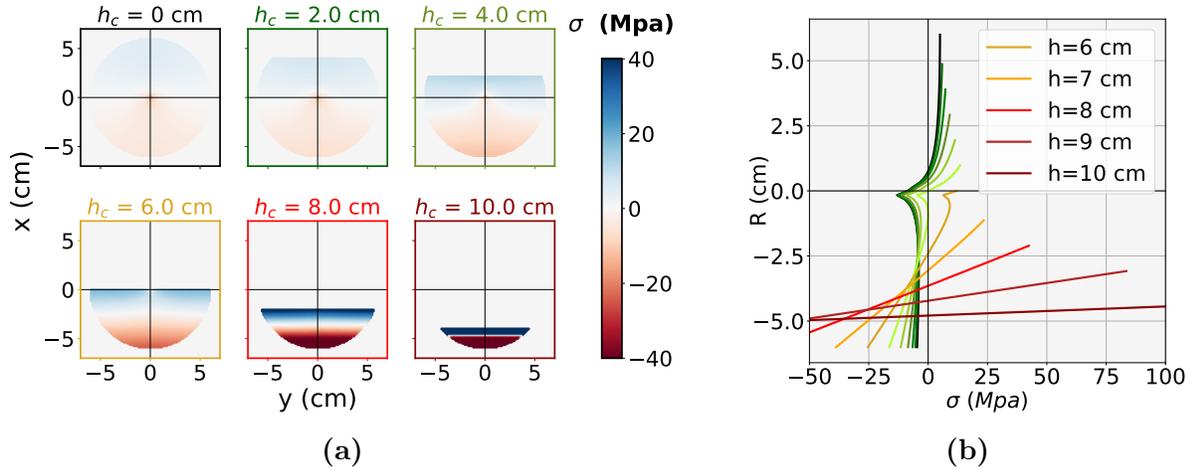


FIGURE 7.11 – Modélisation de l'essai de sciage. Simulation d'une section précontrainte avec du bois de compression (cas de résineux). a) Représentation du champ de contraintes total pour différentes profondeurs d'entaille h_c . b) Extrapolation de la contrainte sur l'axe $y=0$, pour des profondeurs incrémentées de 1 cm.

de moment et décrétement de surface). Mais ce n'est que légèrement après avoir coupé la moitié de la section que cette redistribution prend le pas sur le champ de précontraintes. Ce dépassement se manifeste de manière assez brusque, entre le 7ème et le 9ème centimètre de coupe. Dans cette zone, la contrainte de traction en périphérie est multipliée par 6 chez le feuillu, et par 3 chez le résineux (figures 7.10b et 7.11b).

7.4.4 Quand la branche casse t-elle vraiment ?

Ces premières modélisations mettent en évidence la présence d'une zone, qui semblerait relativement petite, et pour laquelle la redistribution du moment de flexion prend le pas sur le champ de précontrainte initial. Cette zone s'accompagne d'une redistribution brutale du champ de contrainte, amenant à des niveaux de contrainte non supportables par la branche. Un questionnement important (et fondamental dans la compréhension de cet essai) concerne le rapport entre l'instant de rupture et les valeurs des contraintes dans la section : la branche casse t-elle parce qu'elle a atteint des niveaux de contraintes supérieurs à ces seuils de rupture ? Ou casse t-elle car l'énergie libérée par unité de surface atteint une valeur critique ? Dans la première situation, l'essai permettrait (sous réserve de connaître avec précision le champ de précontraintes) d'obtenir un seuil limite de rupture (traction ou compression) *in situ* de la branche. Dans la deuxième situation, cela voudrait dire que l'essai est plus un essai de résistance à la propagation d'une fissure qu'un essai de tenue au poids propre.

Pour répondre à cette interrogation, deux approches conjointes sont proposées : (i) une approche « contrainte de rupture », qui consiste à regarder l'évolution de la contrainte en

des points particuliers de la section, afin de déterminer une profondeur critique d'entaille basée sur des critères de limite théorique en rupture ; et (ii), une approche énergétique basée sur l'étude du critère de Griffith [Griffith (1921)]. Cette théorie suppose que la propagation d'une fissure de surface S à une nouvelle surface $S + \delta S$ exige une énergie $G_c \delta S$. G_c , qui est homogène à une énergie par unité de surface, est appelé « énergie de Griffith », ou « taux de restitution d'énergie critique ». Dans le cas où la rupture a lieu sous charge constante, la valeur du taux d'énergie est estimée par l'équation suivante [Bui, H.B. and Dang Van, K. (1974)] :

$$F\delta u = \delta W_{elas} + G\delta S = \delta W_{elas} + Gd_h\delta l \quad (7.12)$$

avec F la force imposée par le chargement de la branche, δW_{elas} la variation d'énergie élastique emmagasinée dans la section, d_h la longueur du fond d'entaille et δl l'incrément de longueur de propagation. Les deux derniers paramètres sont représentés dans la figure 7.12.

Le taux limite de restitution d'énergie s'exprime alors :

$$G = \frac{1}{d_h\delta l} [F\delta u - \delta W_{elas}] = \frac{1}{d_h} \left[\frac{F\delta u}{\delta l} - \frac{\delta W_{elas}}{\delta l} \right] \quad (7.13)$$

Des considérations géométriques donnent l'expression de d_h : $d_h = \sqrt{2Rh_c - h_c^2}$.

Pour le calcul du premier terme $F\delta u/\delta l$, la déformation au niveau de la moelle est négligée. Le seul mouvement engendré par le chargement est une rotation ω , dont l'incrément vaut :

$$\frac{\delta\omega}{\delta l} = FL_s \left[\frac{1}{EI(0)} - \frac{1}{EI(h_c)} \right] \quad (7.14)$$

Avec E le module d'Young et $I(h)$ l'inertie de la section résiduelle à une coupe de profondeur h_c . En particulier, $EI(h_c) = K_2(h_c) - K_1^2(h_c)/K_0(h_c)$, où $K_i(h_c)$ représente la rigidité d'ordre i de la section résiduelle. En calculant le déplacement associé $\delta u = L_s\delta\omega$, on obtient :

$$\frac{F\delta u}{\delta l} = F^2L_s^2 \left[\frac{1}{EI(0)} - \frac{1}{EI(h_c)} \right]$$

Le calcul du second terme $\delta W_{elas}/\delta l$ donne :

$$\begin{aligned} \frac{\delta W_{elas}}{\delta l} &= \frac{1}{\delta l} [W_{elas}(h_c) - W_{elas}(h_c = 0)] \\ &= \int_{S_r} \frac{(\sigma_{ini} + \Delta\sigma)^2}{E} dS - \int_{S_r+S_c} \frac{\sigma_{ini}^2}{E} dS \\ &= - \int_{S_c} \frac{\sigma_{ini}^2}{E} dS + \int_{S_r} \frac{2\sigma_{ini}\Delta\sigma + \delta\sigma^2}{E} dS \\ &= - \int_{R-h_c}^R W(x) dx + \int_{-R}^{R-h_c} [2\sigma_{ini}(\Delta a_h + x\Delta b_h) + E(\Delta a_h^2 + 2\Delta a_h\Delta b_h x + x^2\Delta b_h^2)] dx \\ &= -W^h + 2\Delta a_h\Delta P_0^h + 2\Delta b_h\Delta P_1^h + \Delta a_h^2 K_0^h + 2\Delta a_h\Delta b_h K_1^h + \Delta b_h^2 K_2^h \end{aligned}$$

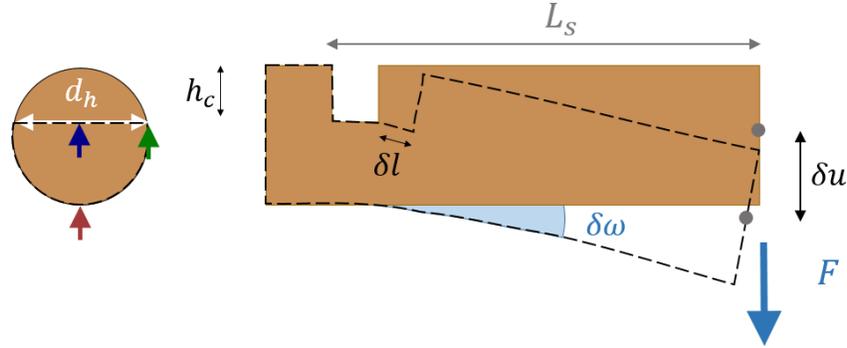


FIGURE 7.12 – Modélisation de l'essai de sciage. Schématisation des différents éléments. Sur la section de gauche, les flèches de couleur (bleu, rouge, vert) représentent les points de suivi de l'évolution des contraintes. Sur le schéma de droite, les différentes grandeurs nécessaires au calcul sont représentées : la profondeur d'entaille h_c , l'incrément de rotation $\delta\omega$, l'incrément de fissure correspondant δl , l'incrément de déplacement δu , la force de chargement F et le bras de levier à partir du trait de scie L_s .

Avec W^h l'énergie élastique sur la section résiduelle S_r . Pour une profondeur d'entaille h_c donnée, les différents termes ci-dessus sont calculés numériquement.

Une évolution des contraintes aux trois points d'intérêt (figure 7.12) est proposée dans les figures 7.13a (cas du feuillu) et 7.13b (cas du résineux). Le taux de restitution énergétique associé G est proposé dans la figure 7.14. Pour disposer d'un indicateur commun d'amorçage de la rupture, nous avons fixé la contrainte limite de rupture en compression à -50 MPa, celle en traction à 100 MPa [Kretschmann (2010)] et le taux de restitution critique à 500 J.m⁻² [TRIBOULOT, P. et al. (1982); Bardet et al. (2003)]. Ces valeurs sont des valeurs générales, qui n'ont pas vocation à quantifier le phénomène de manière précise, mais plus à signifier des tendances de comportement.

Les trois points de suivi des contraintes (représentées dans la figure 7.12) ont été choisis car ils représentent le comportement limite de la redistribution. De ce qui a été vu précédemment, la découpe s'accompagne d'une mise en compression progressive de la partie inférieure de la branche, associée à une mise en tension de la partie supérieure. Le point qui est le plus à même d'atteindre une limite en compression est donc le point le plus bas de la branche (en rouge sur les figures 7.12 et 7.13). Un bon candidat de limite en traction pourrait être le centre du front d'entaille (couleur bleue), mais l'artefact de compression au centre de certains profils vient fausser la valeur de la contrainte en ce point. Le suivi de ce point sera donc complété du suivi de la contrainte sur le côté du front de l'entaille (couleur verte).

Les résultats précisent les propos établis lors de l'analyse des figures 7.10 et 7.11 : on observe bien une mise en traction des deux points sur le front de l'entaille, et une mise en compression du point bas de la branche.

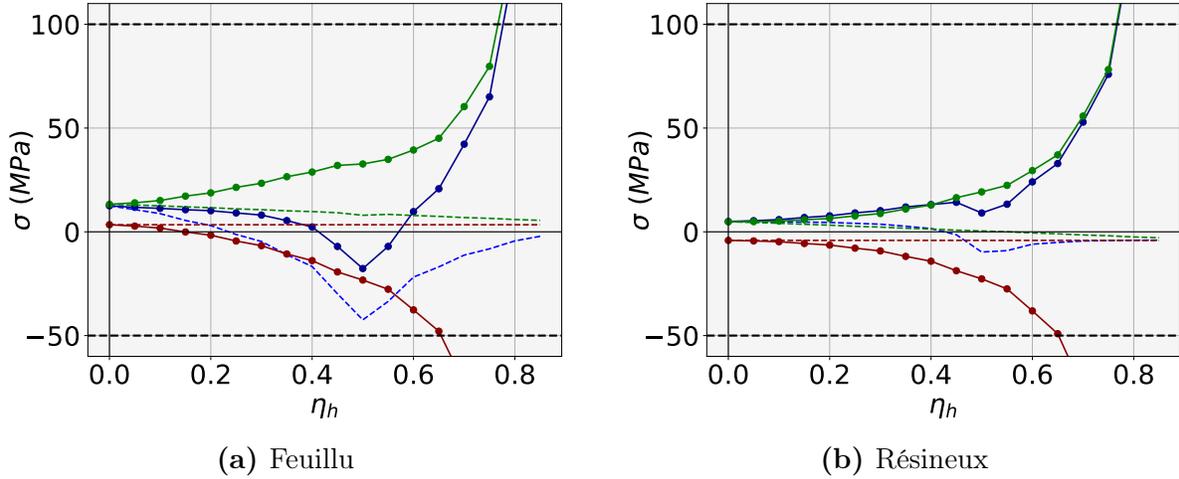


FIGURE 7.13 – Modélisation de l'essai de sciage. Représentation de l'évolution des profils de contrainte sur le front de l'entaille (au milieu en bleu, sur le côté en vert) et sur le point bas de la branche (rouge). En pointillé, le profil de précontrainte initiale, en trait plein (marqueurs ronds), celui de la contrainte totale après redistribution. En pointillé noir, les limites supposées de rupture en traction et compression.

C'est d'ailleurs cette mise en progression qui atteint le plus vite un indice limite ($\eta_{hlim} \approx 0,65$ pour les deux cas), suivi d'une montée exponentielle des contraintes en traction dans le dixième suivant ($\eta_{hlim} \approx 0,78$). Le délai de découpe entre ces deux limites est donc court. De manière intéressante, le comportement de la redistribution de contrainte est très proche pour le résineux ou le feuillu, et ne semble donc pas conditionné par le champ de contraintes initiale : les profondeurs où les contraintes atteignent des seuils limites pour la tenue de la branche sont les mêmes. L'une des différences se fait au niveau de la moelle, avec un pic en compression chez le feuillu qui diminue un peu la valeur de la traction sur le centre du front d'entaille, mais qui, une fois passé, n'a pas de conséquence sur η_{hlim} .

L'évolution du coefficient de Griffith, en fonction de η_h , proposée dans la figure 7.14, montre une différence de comportement feuillu/résineux, avec une limite $\eta_h \approx 0,47$ chez le feuillu et $\eta_h \approx 57$ chez le résineux. Malgré cette différence, les seuils limites sont plus faibles que

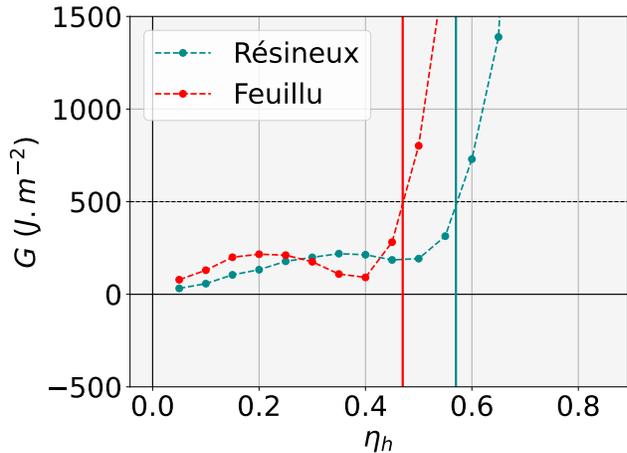


FIGURE 7.14 – Modélisation de l'essai de sciage. Évolution du taux de restitution d'énergie G . En pointillé, le taux d'énergie limite pour lequel la rupture s'amorce.

ceux qui seraient atteints par des critères de ruptures. Ce résultat suggère que la branche amorce une dynamique de fissuration avant d'avoir atteint des paliers limites en rupture. Par ailleurs, cette valeur est dans les ordres de grandeurs mesurées (figure 7.3). L'essai développé ne serait donc pas une mesure de la résistance de la branche à sa charge, mais plutôt une mesure de la résistance de la branche à la propagation d'une entaille. Nous nous sommes assuré que cette conclusion n'était pas fonction de l'excentricité, en comparant les dynamiques de redistribution des contraintes pour des excentricités constantes $e = \pm 0,5$, chez le feuillu et le résineux. Les résultats sont présentés dans la figure 7.15.

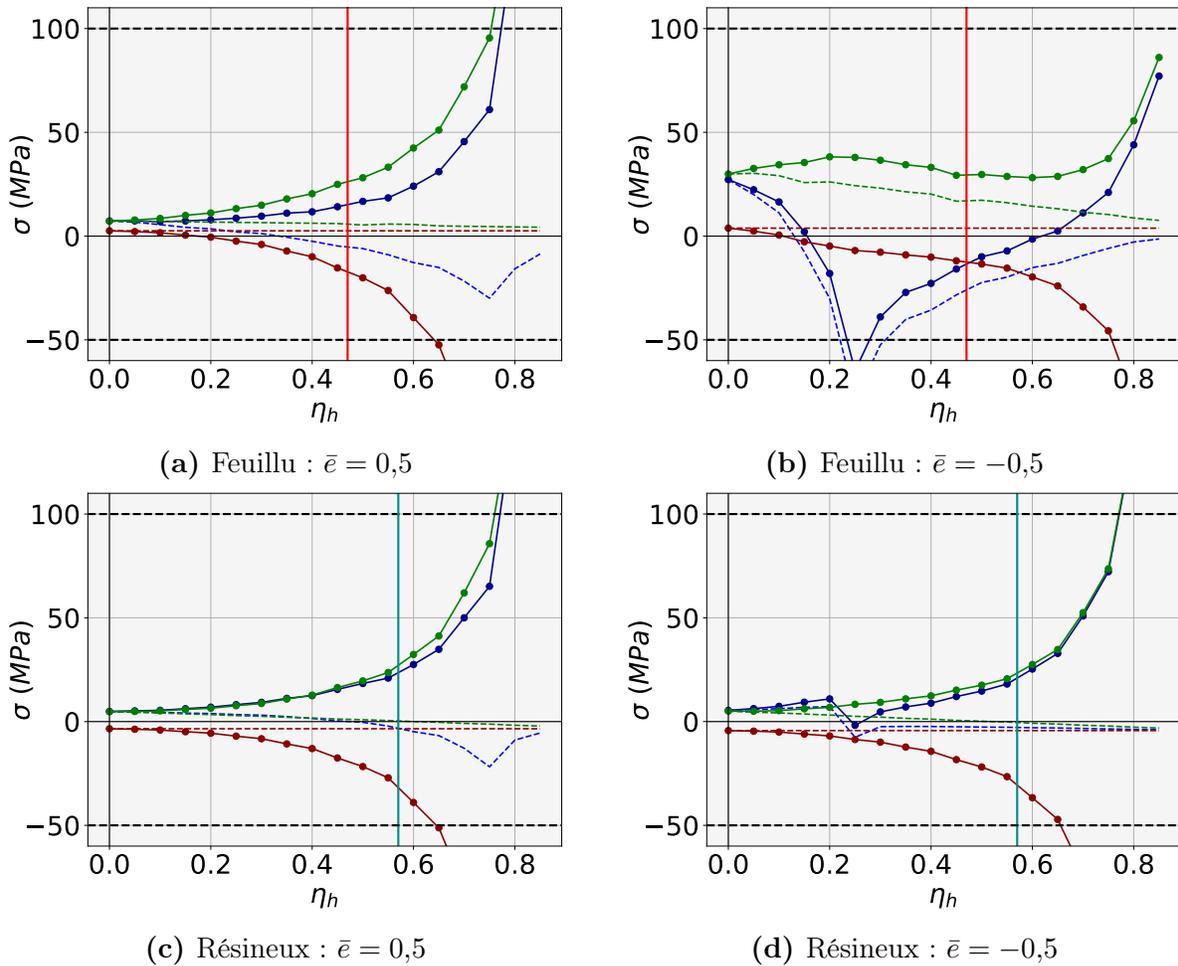


FIGURE 7.15 – Modélisation de l'essai de sciage. Représentation de l'évolution des profils de contraintes sur le front de l'entaille (au milieu en bleu, sur le côté en vert) et sur le point bas de la branche (rouge foncé). En pointillé, le profil de précontrainte initiale, en trait plein (marqueurs ronds), celui de la contrainte totale après redistribution. En pointillé noir, les limites supposées de rupture en traction et compression. Différents cas d'excentricité sont explorés.

Bien qu'une excentricité hypotrophique décale légèrement les profondeurs limites (figure

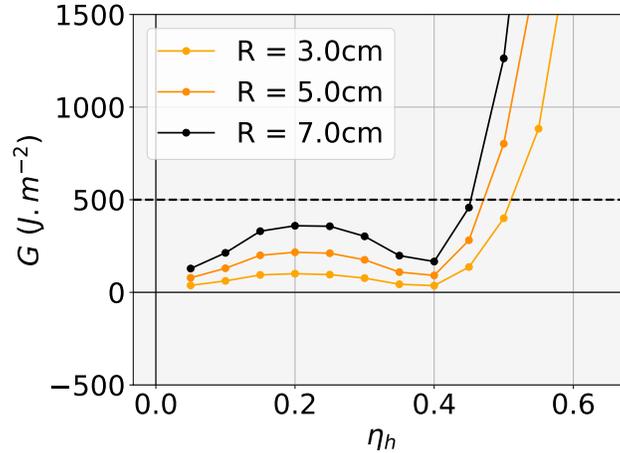


FIGURE 7.16 – Modélisation de l'essai de sciage. Évolution du taux de restitution d'énergie G . En pointillé, le taux d'énergie limite pour lequel la rupture s'amorce. Différentes situations, pour différents rayons à l'insertion, sont représentées.

7.15b), les niveaux de contraintes mis en jeu pour $\eta_{hlim}(G)$ (en rouge sur la figure 7.15) sont relativement faibles dans toutes les situations. Cela confirme que le critère de Griffith est celui qui contrôlerait l'amorçage de la rupture.

Enfin, nous nous sommes assurés que la variabilité de $\eta_{hlim}(G)$ restait réaliste par rapport aux mesures effectuées. 3 situations ont été étudiées. Des branches de rayon $R = 3, 5$ et 7 cm ont été choisies. En conservant les mêmes paramètres de croissance (λ_L, ν_L, ξ , tableau 6.5), cela conduit à des masses totales de $m = 7, 26$ et 64 kg pour des longueurs respectives de $L_g = 1,7; 2,4$ et $2,9$ m. Une comparaison avec les données morphologiques mesurées (figure 6.2) nous confirme que ces trois cas couvrent bien une majorité des cas mesurés. Les variations du taux de restitution, ainsi que les $\eta_{hlim}(G)$ associés, sont représentés dans la figure 7.16.

Les résultats montrent un coefficient limite entre 0.4 et 0.6, ce qui est tout à fait dans l'ordre de grandeur des valeurs que nous avons mesurées lors de nos campagnes expérimentales (figure 7.3). Même si la théorie de Griffith donne une dépendance entre le point de rupture et la dimension de la branche qui n'est pas retrouvée expérimentalement, nous considérerons que les résultats montrent quand même une bonne adéquation avec les mesures. Cela nous permet d'affirmer que l'essai mis en place, contrairement à ce que nous pensions initialement, ne nous permet pas d'avoir accès aux contraintes de rupture *in situ* des branches. En revanche, il donne une bonne indication de la résistance des branches au phénomène de propagation d'une entaille. Or, une des hypothèses précédemment décrites (section 3.1.1) était que des variations de températures trop importantes pouvait amener à des phénomènes de fissurations internes. Bien que caricatural (notamment sur les échelles des fissurations imposées dans l'essai, par rapport aux longueurs des supposées fissurations internes), cet essai de sciage est en quelque sorte une situation forcée de ce qui pourrait arriver en cas d'initiation de fissure interne.

7.5 Conclusion

Un protocole expérimental original et très simple de caractérisation de la résistance des branches à leur propre poids a été développé et appliqué sur plus de 150 branches de différentes tailles et essences. Un large éventail de situations a été étudié. Ces campagnes expérimentales ont montré qu'il fallait généralement scier plus de la moitié de la section de la branche avant que cette dernière ne cède sous son propre poids. Si cet indicateur n'est pas directement transférable à une quantification mécanique, il témoigne de l'important surdimensionnement des branches par rapport à leur poids. Certaines caractéristiques physiques de la branche comme son élancement, son inclinaison ou sa masse semblent être corrélées à cet indicateur. De même, une variabilité inter-spécifique mériterait d'être confirmée. Ces investigations pourraient à terme permettre de proposer des indicateurs, peut-être essence par essence, aux professionnels de la gestion des arbres afin d'identifier les branches pouvant présenter des risques accrus de casse. L'influence de la saison, qui n'a pu être caractérisée ici que sur une seule essence feuillue, le noyer, a été clairement mise en lumière. Celle-ci explique plus de 38% des variations de cet indicateur. En effet, l'été, les branches sont moins surdimensionnées que pendant les autres saisons. Ce résultat intéressant, qui mériterait d'être confirmé par des mesures complémentaires, pourrait être un des facteurs qui expliquerait que l'on trouve plus de casses inexplicables en période estivale.

Une modélisation de l'essai a permis d'y associer le champ de précontrainte, élément primordial du dimensionnement des branches. L'analyse effectuée a montré que contrairement à ce qui avait été pensé au moment de la campagne, cet essai est probablement plutôt représentatif d'un essai de résistance à la propagation d'une fissure sous charge constante. La modélisation ne permet donc pas de repérer d'éventuels déterminants mécaniques (seuils de rupture réels in situ du bois vert). En revanche, elle donne des informations sur la résistance à la propagation d'une fissure, qui peut être un des modes de ruine des casses inexplicables. Notamment, un couplage du protocole expérimental décrit dans le chapitre 5, et de cet essai permettrait d'avoir une idée du taux de restitution critique pour lequel une fissure se propage.

Une évolution du protocole expérimental pourrait être un sciage vertical d'une branche dont la fissuration est contenue (par cerclage autour de la section par exemple). Cela limiterait le phénomène de propagation, et permettrait de pouvoir remonter aux caractéristiques de ruptures des branches, qui, on le rappelle, est primordial pour mieux comprendre et quantifier leur dimensionnement mécanique.

Chapitre 8

Modèle élastoplastique et conséquences sur le risque de rupture des branches

Sommaire

8.1	Introduction	218
8.2	Développement de la formulation élastoplastique	218
8.2.1	Loi élastoplastique	218
8.2.2	Formulation incrémentale du problème	219
8.3	Illustrations	221
8.4	Conclusion	226

8.1 Introduction

Comme l'ont montré les précédents chapitres, l'une des limites importantes du modèle développé est la présence de valeurs de compression irréalistes au niveau de la moelle. La prise en considération de l'influence de l'écorce a permis de diminuer un peu l'artefact observé, mais dans beaucoup de situations, notamment chez le feuillu, les valeurs dans cette zone restent nettement au dessus des contraintes seuils de rupture pour le bois. Dans ce chapitre, nous proposons une amélioration du modèle, en adoptant une formulation élastoplastique. Cette formulation peut se faire pendant la croissance de l'axe, mais aussi de manière instantanée. La prise en considération de ce seuil plastique a deux objectifs : (i) améliorer le modèle en le rendant plus réaliste car plus proche du comportement réel du bois vert, (ii) simuler l'effet d'un changement du palier plastique sur la redistribution du champ de contraintes. Sur le deuxième point, différents scénarios thermiques, purement théoriques, sont proposés afin de répondre à l'une des hypothèses initiales formulées en introduction de ce mémoire. Cette hypothèse stipulait qu'un changement de température pouvait induire une modification du comportement plastique, pouvant entraîner une modification importante de la distribution de contrainte et aboutir à des niveaux non supportables pour la branche (section 3.1.1).

8.2 Développement de la formulation élastoplastique

8.2.1 Loi élastoplastique

Comme le modèle élastique, le modèle élastoplastique est incrémental. À chaque instant t , l'équilibre statique dans la section est résolu. À la différence du modèle élastique, les éléments peuvent avoir deux statuts : le statut élastique ET0, ou le statut plastique ET1. Ce statut n'est pas définitif : un élément qui se plastifie au temps t_n peut potentiellement revenir dans le domaine élastique au temps t_{n+1} . La loi décrite ici est une loi élastoplastique parfaite : lorsqu'un élément passe du domaine plastique au domaine élastique, le même module d'Young est utilisé. Comme l'ont montrées les précédentes modélisations, l'artefact à la moelle est en compression. La loi formalisée aura donc un seuil limite plastique de compression, que nous nommons Π_n .

Cette loi est décrite dans la figure 8.1. Soit un élément qui porte la contrainte σ_n au temps t_n . Entre le temps t_n et t_{n+1} , quatre situations sont envisagées, suivant la valeur de σ_n et de l'incrément de déformation résultant du calcul de l'équilibre statique $\Delta\epsilon$:

1. $\sigma_n + E\Delta\epsilon > -\Pi_{n+1}$: l'élément est dans le domaine élastique au temps t_n et le reste au temps t_{n+1} (figure 8.1a). L'incrément de contrainte correspondant est alors $\Delta\sigma = E\Delta\epsilon + \sigma_0$, où σ_0 représente la contrainte de maturation.
2. $\sigma_n + E\Delta\epsilon < -\Pi_{n+1}$: l'élément passe du domaine élastique (temps t_n) au domaine plastique (temps t_{n+1}). L'incrément de contrainte correspondant est alors $\Delta\sigma = -\Pi -$

σ_n (figure 8.1b).

3. $\sigma_n = -\Pi_{n+1}$, $\Delta\epsilon < 0$: l'élément est dans le domaine plastique au temps t_n et y reste au temps t_{n+1} (figure 8.1c). Dans ce cas, l'incrément de contrainte correspondant est nul : $\Delta\sigma = 0$.
4. $\sigma_n = -\Pi_{n+1}$, $\Delta\epsilon > 0$: l'élément est dans le domaine plastique au temps t_n , et passe dans le domaine élastique au temps t_{n+1} (figure 8.1d). L'incrément de contrainte correspondant est alors $\Delta\sigma = E\Delta\epsilon$.

En réalité, ces quatre situations ne couvrent pas la gamme de tous les possibles mais sont valables dans la situation où les variations du seuil plastique entre les instants t_n et t_{n+1} ne changent pas le statut de la contrainte σ_n .

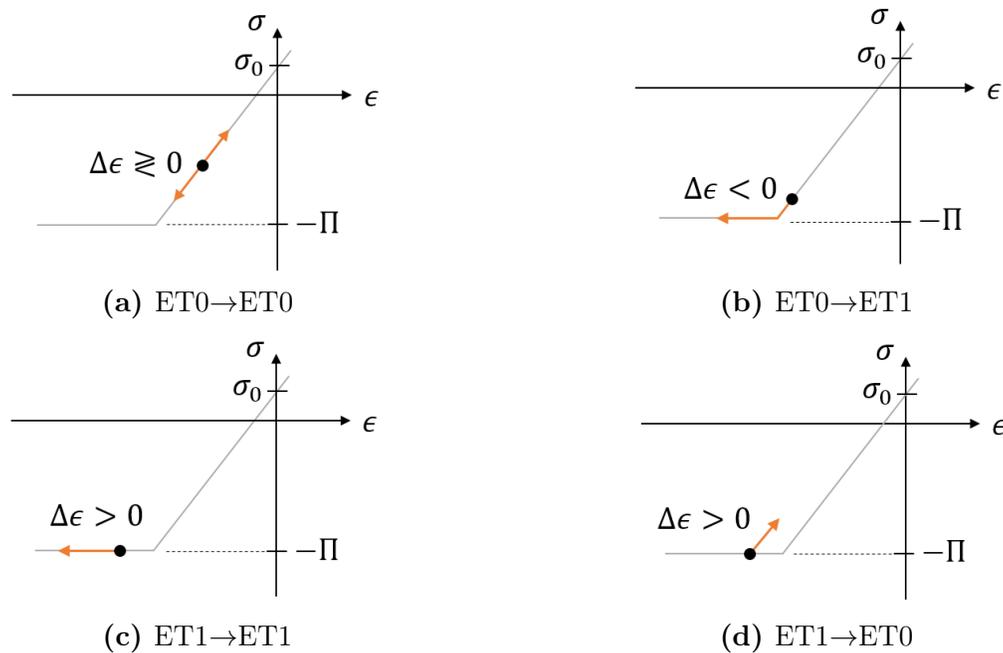


FIGURE 8.1 – Représentation de la loi élastoplastique implémentée. 4 situations sont envisagées. Elles sont décrites par les potentiels passages d'un état plastique ET1 à un état plastique ET0. La loi est une loi de Hooke précontrainte (σ_0 représente la contrainte de maturation) avec un seuil de limite plastique en compression Π (supposé constant dans cette illustration).

8.2.2 Formulation incrémentale du problème

Pour simplifier l'écriture de la formulation, seule la situation d'un seuil plastique pendant la croissance de la branche est décrite. Le changement de seuil plastique instantané (sans accumulation de nouveaux cernes), s'écrit de manière similaire, sans le terme de maturation

des cellules. Comme pour la formulation du chapitre 3, nous posons N_c le nombre de cernes, k l'index temporel, $N_e(k)$ le nombre d'éléments du k -ième cerne, l l'index spatial. En plus de pouvoir évoluer chaque année, le seuil plastique n'est pas homogène, et peut varier spatialement dans la section. À chaque instant k , les rigidités K_n et termes de chargement δF_n sont alors calculés :

$$K_n = \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{N_e(j)-1} E_l^j (x_l^j)^n S_{j,l}, \quad \delta F_n = h_n + \sum_{i=0}^{N_e(k)-1} E_i^k \mu_i^k (x_i^k)^n S_{k,i}$$

avec h_n une fonction définie telle que $h_0 = \delta N^k$ et $h_1 = \delta M^k$. Le calcul de ces termes permet de remonter aux incréments de déformations δa^k et δb^k puis de contraintes $\delta \sigma_l^j$, $j \in [0, k-1]$ (équation 4.1). C'est à ce stade du calcul que l'élément peut être amené à changer de statut.

Deux cas sont alors distingués :

1. L'élément est dans le domaine élastique ($ET_{k,l} = 0$), et passe dans le domaine plastique : $\sigma_l^j + \delta \sigma_l^j < -\Pi_l^{k,j}$ (figure 8.1b). Dans ce cas, il ne contribue plus au maintien de l'équilibre dans la section (sa contribution aux rigidités est enlevée) et il augmente le chargement extérieur (une contribution aux chargements extérieurs est rajoutée) :

$$\begin{aligned} - K_n &\leftarrow K_n - E_l^j S_{j,l} (x_l^j)^n \\ - \delta F_n &\leftarrow \begin{cases} \delta F_n + S_{j,l} \left(\Pi_l^{k,j} + \sigma_l^j - E_l^j \mu_l^k \right) (x_l^j)^n & \text{si } j = k-1 \\ \delta F_n + S_{j,l} \left(\Pi_l^{k,j} + \sigma_l^j \right) (x_l^j)^n & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

2. L'élément est dans le domaine plastique ($ET_{k,l} = 1$), et passe dans le domaine élastique : $\sigma_l^j + \delta \sigma_l^j > -\Pi_l^{k,j}$ (figure 8.1d). Dans ce cas, il contribue à nouveau au maintien de l'équilibre dans la section (sa contribution aux rigidités est rajoutée) et sa contribution au chargement extérieur est enlevée :

$$\begin{aligned} - K_n &\leftarrow K_n + E_l^j S_{j,l} (x_l^j)^n \\ - \delta F_n &\leftarrow \begin{cases} \delta F_n - S_{j,l} \left(\Pi_l^{k,j} + \sigma_l^j - E_l^j \mu_l^k \right) (x_l^j)^n & \text{si } j = k-1 \\ \delta F_n - S_{j,l} \left(\Pi_l^{k,j} + \sigma_l^j \right) (x_l^j)^n & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

Une fois les matrices de rigidité et de chargement mises à jour, un calcul des nouveaux incréments de déformation δa_1^k et δb_1^k est effectué. Un test de convergence est alors effectué, avec comme critère d'arrêt une condition sur la déformation cumulée en périphérie de la section :

$$|\delta a_1^k - \delta a_0^k + (\delta b_1^k - \delta b_0^k) \max(x_l^j)| + |\delta a_1^k - \delta a_0^k + (\delta b_1^k - \delta b_0^k) \min(x_l^j)| < \Delta \epsilon_X \quad (8.1)$$

Tant que ce critère n'est pas satisfait, le code parcourt à nouveau les éléments ; jusqu'à convergence. Le calcul passe alors à l'étape $k+1$. Avant de calculer l'effet du nouvel incrément (entre $k+1$ et $k+2$), la section complète est de nouveau parcourue afin de mettre à jour le statut du champ de contrainte σ^{k+1} en fonction du seuil plastique Π^{k+1} .

8.3 Illustrations

Pour illustrer la formulation précédemment décrite, nous avons considéré la même configuration de branche que dans la section 7.4.3 : la branche virtuelle étudiée a la morphologie moyenne des morphologies mesurées lors de la campagne décrite au chapitre 6. La configuration a été choisie sans excentricité avec un diamètre de branche de 12 cm proche de l'insertion. Cela correspond à une branche de longueur $L \approx 7$ m et qui pèse environ 42 kg. Comme dans le chapitre précédent, nous avons imposé la stationnarité de l'orientation : une branche initialement rectiligne et qui le reste ; donc sans variation de courbure entre deux incréments d'accroissement radial. Pour cette illustration de simulation, nous avons fixé $N_c = 50$ afin de rester dans des temps de calculs raisonnables. Pour donner un ordre de grandeur, pour ces valeurs décrites, le calcul peut prendre plusieurs minutes, et augmente de manière conséquente avec le nombre de couches.

Les résultats à l'échelle de la section, et visualisés sur l'axe principal $y=0$, sont représentés dans la figure 8.2. Trois cas ont été envisagés : (i) une loi de comportement élastique, sans limite plastique, (ii) une loi de comportement élastoplastique, avec un seuil plastique constant $\Pi = 50$ MPa, et (iii), une loi de comportement élastoplastique dont le niveau du seuil plastique ($\Pi = \Pi_{lim} = 31$ MPa) est une valeur limite qui correspond au moment où la branche ne peut plus assurer le scénario imposé de courbure constante (ici nulle).

Dans ces modélisations, le critère de convergence (somme des déformations de la section en périphérie) a été fixé à $\Delta\epsilon_X = 10^{-6}$. Les résultats mettent bien en évidence une plastification dans la zone de la moelle (ici le centre de la section). Plus le seuil est petit, et plus cette zone est importante. Ce qui est moins évident à observer graphiquement est la redistribution des contraintes en réponse à la plastification. En réalité, la zone plastifiée est petite devant l'échelle de la section, et l'incrément de contrainte en compression supprimé par la plastification entraîne une petite mise en compression de l'ensemble des cellules qui sont dans le domaine élastique. De plus, le seuil plastique est constant, et ne présente pas de variation pendant des phases d'arrêt de croissance. Cela signifie qu'il n'influence pas les variations de contraintes en périphérie, dont la valeur est fixée à chaque nouvel incrément par la condition de stationnarité de la courbure. Les cellules les plus touchées sont donc celles situées proches de la zone plastique. Cette redistribution se devine en comparant les courbes à $y=0$ des seuils à $\Pi = 50$ MPa et $\Pi_{lim} = 31$ MPa.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés au cas d'une plastification instantanée (sans croissance) : les mêmes paramètres que précédemment sont adoptés mais lors du dernier accroissement radial, nous imposons une plastification instantanée. Deux cas sont illustrés

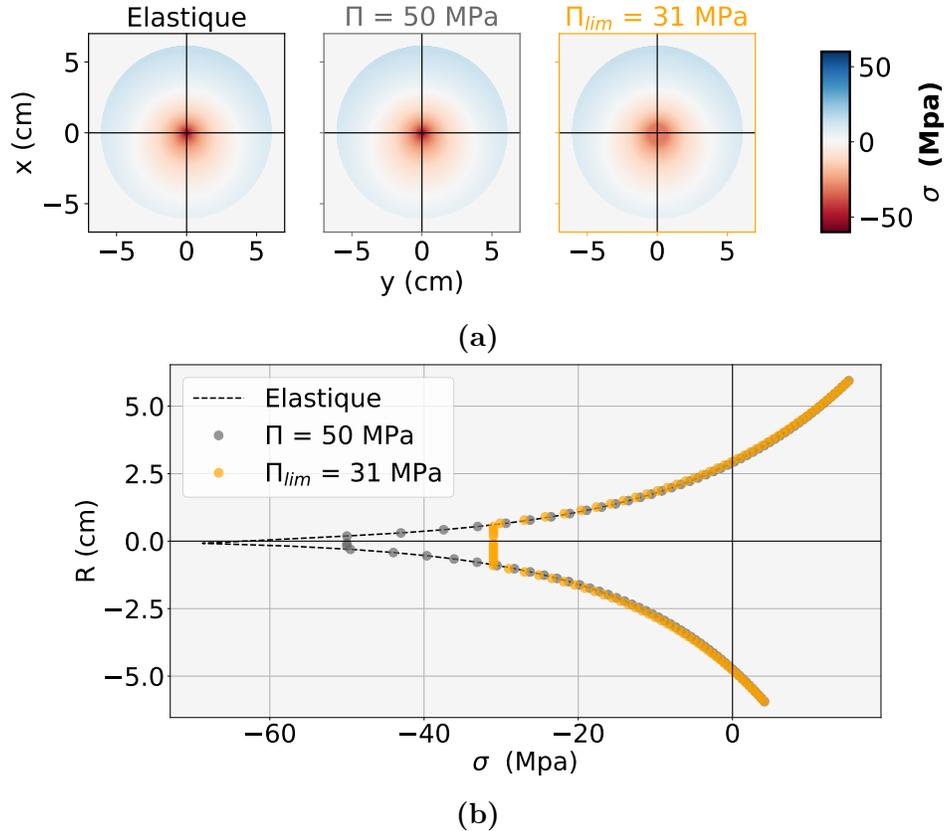


FIGURE 8.2 – Modèle élastoplastique. Distribution des contraintes de croissance d'une branche rectiligne à l'échelle de la section (a) et calculée sur l'axe central $y=0$ (b). Trois lois de comportements sont illustrées : loi élastique (graphique (a) gauche et courbe en pointillés sur (b)) ; loi élastoplastique avec un seuil constant $\Pi = 50$ MPa (graphique (a) centre et courbe en points gris sur (b)), et loi élastoplastique avec un seuil constant $\Pi_{lim} = 28$ MPa (graphique (a) droite et courbe en points jaunes sur (b)). La valeur de seuil $\Pi_{lim} = 28$ MPa est la limite après laquelle le calcul diverge (i.e. la valeur seuil après laquelle la courbure de la branche ne peut plus rester constante).

(figure 8.3) : (i) une plastification à $\Pi = 50$ MPa, et (ii) la plastification maximale que l'on puisse imposer avant divergence du calcul (ici $\Pi_{lim} = 24$ MPa). Même si nous supposons un cas théorique où cette plastification arrive au cours d'un accroissement radial, nous avons été contraint de diminuer ce seuil (sans croissance) par pallier. En effet, lorsque trop d'éléments plastifient d'un coup, le calcul diverge. Les seuils présentés ont donc été obtenus avec une chute progressive par incréments de 2 MPa. Dans la figure 8.3a, les profils de contraintes sont représentés. L'évolution de la courbure b à partir de la plastification est illustrée dans la figure 8.3b.

Comme dans le cas précédent, le segment plastifié au niveau de la moelle augmente avec la valeur du palier limite. Cependant, à la différence d'un seuil plastique en période de croissance, les contraintes en périphéries vont aussi subir un décretement de tension, et la suppression de

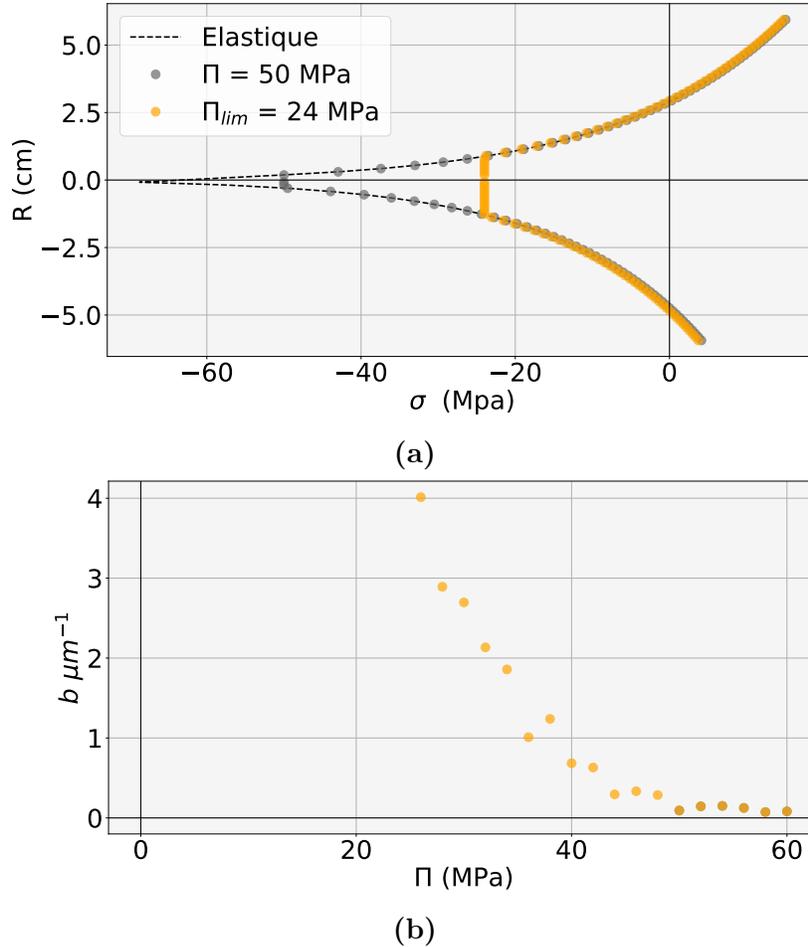


FIGURE 8.3 – *Modèle élastoplastique. Distribution des contraintes sur l'axe $y=0$ (a). Variation de la courbure en fonction de la diminution du palier plastique imposé (b). La plastification est instantanée. Trois lois de comportements sont illustrées : loi élastique (trait pointillés) ; loi élastoplastique avec un seuil homogène $\Pi = 50$ MPa (points noirs), et loi élastoplastique avec un seuil homogène $\Pi_{lim} = 24$ MPa (points jaunes). La valeur de seuil de plastification $\Pi_{lim} = 24$ MPa est la limite avant la divergence du calcul (i.e. après laquelle la courbure de la branche ne peut plus rester constante).*

la compression provoquée par le changement plastique est compensée de manière uniforme par tout le reste de la section. Dans la situation illustrée, le seuil peut chuter de manière conséquente (jusque $\Pi_{lim} = 24$ MPa!) avant que le calcul diverge.

Lorsque la branche plastifie sans croissance, sa courbure augmente (figure 8.3b), ce qui traduit un affaissement. Le palier limite correspond à une augmentation trop forte de la courbure, ce qui entraîne la ruine de la branche. Cependant, contrairement à notre hypothèse initiale, la redistribution des contraintes en réponse à la plastification (instantanée ou durant la période de croissance) reste faible, car la surface concernée est généralement peu importante. Par

ailleurs, dans la situation d'un affaissement, la ligne neutre de la branche se déplace vers le haut : faire du bois en bas de section serait alors un moyen efficace pour compenser ce transfert mécanique provoqué par la flexion. Cela pourrait expliquer pourquoi les résineux et les feuillus font de l'excentricité hypotrophique. Dès qu'un axe se charge de manière importante, la plastification conduirait à des petites flexions passives, que l'hypotrophie de la croissance permettrait de compenser. Cependant, si le cas d'une croissance hypotrophique est optimal pour compenser un affaissement potentiel de l'axe, cette stratégie est aussi défavorable car ce mode de croissance asymétrique conduit à des niveaux de contraintes plus importants, et donc des segments plastifiés plus conséquents. Ces considérations suggèrent qu'il pourrait y avoir une balance entre les bénéfices que peut apporter une croissance hypotrophique en limitant la flexion vers le bas, et les inconvénients que cette croissance asymétrique implique, en amenant des niveaux de contraintes plus importants dans la section.

Pour vérifier l'effet de l'excentricité sur la distribution du seuil plastique limite, nous avons simulé le cas d'une branche (même dimensions que la branche précédemment décrite) avec un seuil plastique initialement imposé constant à $\Pi_{ini} = 60$ MPa. Après $N_c = 50$ cernes numériques, une décroissance brutale du palier plastique (sans accroissement de la section) est imposée par incréments de 2 MPa (à l'échelle biologique, cela correspondrait à une chute quasi-instantanée). La figure 8.4 représente l'évolution de la courbure en fonction de la plastification dans le cas d'une excentricité hypotrophique $e = -0,5$ ou épitrophique $e = 0,5$ (dans les deux cas, l'excentricité est supposée constante au cours de la croissance de la branche).

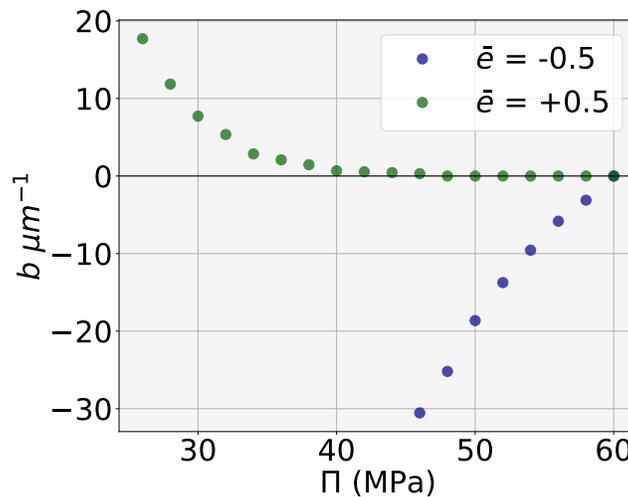


FIGURE 8.4 – Évolution de la courbure b de la branche en fonction de la plastification. Cas d'une loi élastoplastique, avec un seuil limite initialement imposé constant à $\Pi_{ini} = 60$ MPa. Au bout de $N_c = 50$ itérations, une décroissance brutale est imposée par incréments de 2 MPa jusqu'à la ruine de la branche. Les évolutions des courbures résultantes sont représentées dans les cas d'une croissance secondaire hypotrophique ($\bar{e} = -0,5$) ou épitrophique ($\bar{e} = +0,5$).

Deux résultats importants se distinguent : (i) lorsque l'excentricité est hypotrophique, la plastification conduit à un redressement passif (courbure négative)! L'effet de la croissance

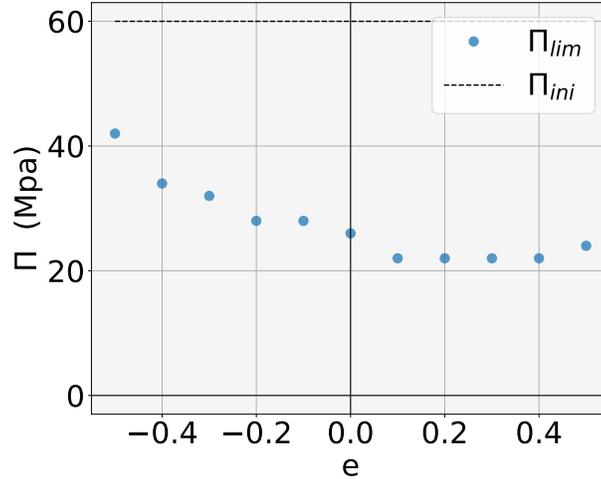


FIGURE 8.5 – Evolution des seuils limites Π_{lim} en fonction de l'excentricité e (supposée constante) de la section. Cas d'une loi élastoplastique, avec un seuil limite initialement imposé $\Pi_{ini} = 60$ MPa. Après $N_c = 50$ itérations, une décroissance brutale de ce seuil est imposée par incréments de 2 MPa jusqu'à la ruine de la branche.

asymétrique ne compense alors pas du tout la flexion vers le haut, et ne contribue pas à limiter l'effet de la plastification ; (ii) l'excentricité épitrophique a un seuil limite beaucoup plus tardif, du fait des plus faibles niveaux de contraintes mis en jeu.

La distribution des paliers limites, pour des excentricités moyennes variant de -0.5 à 0.5 est illustrée dans la figure 8.5, et confirme ces observations. Finalement, contrairement à ce qui avait été supposé en amont, la croissance hypotrophique dessert la branche quant au phénomène de plastification (durant la période de croissance ou non).

Au delà de cet aspect du dimensionnement des branches, il semble que dans le cas de la plastification instantanée, le seuil peut chuter de manière importante sans forcément conduire à la rupture de la branche (figures 8.3,8.5). De plus, il faut noter que nous avons supposé ici une plastification totale, homogène et très rapide de la section qui, pour être provoquée, nécessiterait une hausse de température importante et rapide aussi sur la totalité de la section. En réalité, les effets de réchauffements les plus importants, liés au rayonnement solaire direct sur les branches, sont locaux et ne pourraient entraîner éventuellement qu'une plastification partielle de la section. Nos scenarii majorent donc probablement de manière importante l'effet d'un changement de température. Il semble donc que pour une branche moyenne comme celle modélisée, le risque de rupture lié à ces changements de plasticité soient peu probables.

Cependant, la branche considérée n'est pas un branche très chargée, et dans les faits, une branche très chargée plastifiera beaucoup plus vite. Nos simulations montrent que pour des branches lourdes, avoir un seuil plastique pendant la croissance correspondant aux mesures sur du bois vert (environ 50 Mpa [Kollman F (1968)]) n'est souvent pas compatible avec une stationnarité : la branche devrait alors concéder des micro changements d'orientations (redressement ou affaissement, suivant le signe de l'excentricité) passifs. Dans ces situations, une plastification instantanée légère suffirait à mener à la ruine de la branche. Ainsi dans certaines situations rares de branches avec un chargement important qui ont déjà fait des sacrifices par rapport à leur posture, une petite plastification supplémentaire pourrait entraîner la rupture. Ceci est encourageant et donne du poids à l'hypothèse selon laquelle une augmentation de température pourrait amener à la rupture. Pour valider cette dernière totalement, il est important de : (i) pouvoir quantifier le caractère élastoplastique du bois vert, et son évolution avec la température et (ii) pouvoir modéliser l'effet d'un réchauffement hétérogène de la section (par secteur) sur des branches qui ont déjà un chargement important.

8.4 Conclusion

La formulation élastoplastique proposée, bien que simpliste (pas d'endommagement), constitue une avancée importante dans la construction du modèle. Son application très sommaire et théorique à des scénarios élastoplastiques montre que pour des branches de dimensions moyennes, des modifications de seuils plastiques (comme pourraient entraîner des températures élevées) : (i) n'influencent pas de manière notable la redistribution du champ de contrainte, et (ii) se traduisent par des changements d'orientation très petits. Ces résultats suggèrent que l'hypothèse d'un changement de plastification ne peut probablement pas expliquer la casse inexplicée et brutale de branches de petites tailles. Cependant, pour des branches de très grande dimension, dont le chargement pondéral serait plus important, la plastification durant la période de croissance peut causer des micro changements d'orientation qui peuvent mettre la branche dans un état mécanique limite : Une petite plastification supplémentaire pourrait alors suffire à créer un effet d'emballage, conduisant à une rupture brutale. Un travail expérimental de caractérisation du comportement du bois vert en fonction de la température serait à envisager pour pouvoir alimenter cette théorie.

Conclusion générale et perspectives

Rappel de la problématique

L'objectif de ce travail de thèse était de nourrir la connaissance scientifique sur le phénomène de casses inexplicables de branches. Incident bien connu des professionnels, mais dont les caractéristiques sont encore floues pour les scientifiques, cet événement est l'expression d'un échec : celui de la branche à supporter sa propre charge, et ce en l'absence de toute perturbation mécanique telle que le vent ou une charge de neige. En préambule de la compréhension de ces ruptures très particulières, il y a en réalité un véritable travail de recherche fondamentale sur la caractérisation du dimensionnement mécanique des branches à leur propre charge. Ces structures végétales ont des architectures particulières, qui les amènent à des états de contrainte spécifiques, dont les déterminants, identifiés par analogie avec l'étude des troncs, ont un impact encore mal défini.

Différentes problématiques ont été menées de front. Une première très appliquée a consisté à développer une meilleure connaissance phénoménologique de ces ruptures. Une seconde approche, plus fondamentale, avait pour objectif d'accroître le savoir sur le dimensionnement des branches en réponse à la charge pondérale. Ces deux problématiques ont été travaillées en regard l'une de l'autre.

Approche proposée

Tel sujet, telle approche. Pluridisciplinaire est l'adjectif qui caractérise le mieux la démarche de ce travail. Des sciences sociales à la biomécanique en passant par la thermique, les disciplines impliquées sont variées. Cette pluridisciplinarité se retrouve aussi dans les outils utilisés : modélisations et expérimentations se répondent tout au long de cette étude.

Tout d'abord, le positionnement du sujet s'est fait au moyen d'une enquête sociale avec la communauté des professionnels du monde de la gestion et de l'expertise de l'arbre. Cette enquête a été co-construite avec l'aide d'acteurs de cette communauté, et diffusée à un large panel. Les résultats issus de ce questionnaire ont été étudiés et comparés à une analyse de presse effectuée sur la durée de la thèse ; laquelle rend compte de l'intérêt sociétal. L'ensemble de la démarche a été encadrée par une anthropologue (P. Moity-Maïzi). Ce travail a fait ressortir des pistes permettant notamment de dégager des hypothèses biomécaniques et

physiques sur la possible implication de la température sur la casse inexplicée des branches d'arbres.

En parallèle de ce travail d'enquêtes, pour mieux comprendre le dimensionnement des branches à leur propre poids, nous avons développé une approche de modélisation. Un modèle biomécanique de la mise en place des contraintes de croissances longitudinales dans une branche au cours de sa croissance a été développé. Ce modèle a été dans un premier temps appliqué à des branches virtuelles d'arbres numériques fournies par l'UMR AMAP (une unité de modélisation de la croissance des plantes, constituée de modélisateurs et botanistes). Travailler sur des branches numériques a constitué un atout intéressant ; pouvoir évaluer la trajectoire mécanique du chargement de la branche tout au long de son développement, ce qui est particulièrement difficile à obtenir d'un point de vue expérimental. Cette application avait pour objectif de discriminer le rôle des deux moteurs connus dont les branches disposent pour contrôler leur orientation : l'asymétrie de croissance secondaire (excentricité) et l'asymétrie des contraintes de maturation (en particulier la formation de bois de réaction). Cette étude numérique a été complétée par une approche expérimentale, avec la proposition d'un protocole permettant de retracer les variations spatio-temporelles de ces deux moteurs.

L'utilisation du modèle a permis ensuite une étude de sensibilité sur la densité moyenne d'énergie stockée au cours de la croissance, supposée conditionner la casse. Cette étude numérique s'est appuyée sur un travail expérimental de mesure d'un ensemble de caractères physiques et morphologiques de branches de taille moyenne.

Un autre volet, expérimental, a été mis en œuvre afin d'essayer de dégager quelques paramètres qui pourraient, à terme, aider les gestionnaires à anticiper les casses : nous avons construit un protocole original, qui devait rester simple, et qui permet de caractériser le surdimensionnement mécanique des branches par rapport à leur poids propre. La compréhension de cet essai mécanique a été améliorée grâce à la modélisation précédemment décrite.

Enfin, conjointement à ces études, un travail a été effectué sur le rôle potentiel de la température dans ces événements de casse inexplicée. Initié par le volet social, ce travail a d'abord pris la forme d'une longue campagne expérimentale (sur plus d'un an) de monitoring des températures dans des branches d'arbres. L'approche a été doublée d'un travail numérique : le modèle biomécanique implémenté a été amélioré pour pouvoir tester une partie des hypothèses.

Principaux résultats obtenus

L'enquête auprès des professionnels a permis de mieux délimiter la compréhension du phénomène. Certains traits ont été confirmés : les ruptures semblent survenir majoritairement en été, ce qui traduit un probable rôle des conditions environnementales, en particulier la chaleur et/ou la sécheresse. Les casses ne surviennent jamais la nuit, et semblent plutôt apparaître en fin de journée chaude, sans vent. Contrairement à nos a priori, les branches touchées ne seraient pas seulement de grosses branches charpentières de bas de houppier,

mais aussi des axes +2, ou encore des axe +1 de milieu de houppier. La gamme de diamètres impliqués semble assez large, même si des réserves persistent sur ce déterminant. Un résultat que suggère l'analyse de presse et les rapports de professionnels est la potentielle influence du groupe d'arbre : les feuillus semblent beaucoup plus impactés que les résineux. Mais il faut ici garder à l'esprit que ces gestionnaires, dont le terrain de jeu est principalement la ville, ne sont confrontés qu'à une distribution des essences très spécifique de l'arbre urbain. Quant au profil de l'arbre, il s'agirait d'arbres matures, dont le statut en ville (isolé ou non, en parc ou non) ne semble pas avoir d'influence.

La température apparaissant comme un marqueur clé de ces ruptures, nous avons focalisé une part de notre travail sur ce facteur. Le monitoring de température a permis de discriminer les phénomènes qui pilotent la dynamique thermique des branches. La diffusion radiale du rayonnement extérieur et la convection axiale liée au flux de sève froide depuis les racines en période d'activité, se combinent, et expliquent une dynamique de température très variable, spatialement comme temporellement. Parmi les paramètres importants, nous avons mis en évidence des effets d'échelle et d'essence. Les mesures ont aussi suggéré un réchauffement non négligeable de la sève, de la base du tronc vers les branches, lors de son passage dans le bois. De plus, une potentielle compartimentation du système hydraulique a été mise en évidence, et mériterait d'être confirmée. Lors du monitoring, nous n'avons jamais enregistré de valeurs de températures extrêmes. Cela nous a cependant permis d'identifier des situations pour lesquelles la température pourrait augmenter de manière sensible. Sont concernés les branches situées loin du sol (réchauffement de la sève) et exposées à un rayonnement direct en journée, pendant de longues période (ce qui est favorisé par un feuillage épars et peut alors traduire un effet d'essence). Théoriquement, les petits axes sont donc ceux qui vont subir les plus hautes températures. Sur ces critères thermiques, la branche la plus critique serait donc une petite branche exposée vers la cime de l'arbre. Ce n'est cependant pas le profil de branche qui ressort de l'enquête sociale, mais (i) le caractère thermique n'est sûrement pas le seul facteur des casses inexplicables, (ii) il est fort probable que la casse de petits axes passe inaperçue.

En parallèle à ces travaux, le développement du modèle biomécanique a permis de mieux comprendre les rôles de l'excentricité et de la formation de bois de réaction chez les feuillus et résineux. Ce modèle se base sur des théories existantes [Fournier et al. (1994)], et y ajoute les variations temporelles de ces deux moteurs, ainsi que le rôle de l'écorce, important dans les premiers stades de développement. L'analyse des branches virtuelles fournies par AMAP et la comparaison avec les mesures existantes ont montré que l'excentricité chez le feuillu pourrait être un moteur très efficace, mais n'est pas utilisé pour contrebalancer la charge liée à la gravité. L'hypothèse d'un rôle d'ajustement par rapport à d'autres tropismes a été formulée. Chez le résineux, il a été mis en évidence que l'excentricité joue un faible rôle dans les niveaux de contrainte mis en jeu, mais qu'elle change sensiblement les profils de distribution des contraintes. De nouveaux profils, « en créneau », ont été observés, et mériteraient une attention particulière. Cette étude a aussi montré la lacune des données sur le sujet, et nous avons donc proposé un protocole expérimental pour évaluer les paramètres manquant. Il a permis d'évaluer de manière assez complète les variations spatio-temporelles de l'excen-

tricité dans une branche ; ce qui constitue une perspective encourageante. Cependant, si la méthode basée sur une mesure des retraits au séchage a permis d'accéder à des estimations de l'historique des déformations de maturation, de nouvelles investigations sont nécessaires pour intégrer les données au modèle.

Les résultats sur l'étude de sensibilité ont mis en évidence que la densité moyenne d'énergie stockée par le modèle résineux était en moyenne 3 à 4 fois plus faible que celle du modèle feuillu. Ceci pourrait expliquer pourquoi les ruptures semblent plus toucher le groupe feuillu. Ces derniers seraient donc, par leur mode de croissance, dans un état plus proche de la rupture que les résineux. Sur ces feuillus, les contributions des paramètres de croissance (chargement et moteurs) dans la densité d'énergie stockée sont assez homogènes. Chez le résineux, il semble que la maturation dans le bois opposé a un faible rôle biomécanique. Un résultat intéressant chez le résineux est la mise en évidence d'une zone temporaire de transition lors de la mise en place du bois de compression. Durant cette période, même si le chargement de la branche augmente, l'énergie stockée dans la section diminue. Ainsi, dans certains intervalles de chargement, une branche plus chargée qu'une autre pourrait être dans un état mécanique moins important.

La campagne expérimentale de mesures du surdimensionnement a été menée sur plus de 150 branches de 7 essences présentes dans les parcs urbains (dont 6 feuillus et 1 résineux). Les mesures, qui consistent au sciage d'une branche, depuis sa face supérieure jusqu'à l'amorce de la rupture, ont montré que les branches sont très surdimensionnées par rapport à leur poids propre. En général, plus de la moitié de la section doit être sciée avant l'amorce de la rupture. Les résultats sur ces 150 branches suggèrent un lien entre le surdimensionnement des branches et certaines de leurs caractéristiques physiques : l'élancement, l'angle d'insertion et la masse. Une variabilité inter-spécifique semble présente mais reste à confirmer. En revanche, les mesures tout au long de l'année sur une seule essence (noyer) ont mis en évidence un effet fort de la saison, qui expliquerait plus de 38% des variations du surdimensionnement ; l'été apparaissant comme la période où le surdimensionnement mécanique est nettement plus faible que les autres saisons. La modélisation de cet essai et le couplage avec des champs de précontraintes théoriques ont montré que cet essai s'apparentait en réalité plus à une mesure de la résistance à la propagation d'une fissure sous charge constante qu'à un essai de rupture. Ceci mériterait d'être confirmé par des essais complémentaires en laboratoire.

Enfin, l'amélioration du modèle par une formulation élastoplastique a permis de valider l'hypothèse selon laquelle un changement du seuil de plastification des cellules pourrait engendrer la ruine de grosses structures. Ce changement pourrait être imputé à la température, qui, si elle est assez haute, peut induire des modifications du comportement mécanique du bois. Ce cas ne concerne pas les branches moyennes, qui ont été trouvées loin de seuils limites.

Limitations et perspectives

Sur la compréhension du phénomène de casse inexpliquée

Il reste encore un travail conséquent pour pouvoir comprendre le phénomène de casse inexplicables dans son intégralité. Ce travail a posé les premiers jalons d'une démarche originale : formaliser et rassembler les connaissances empiriques et le savoir scientifique. Si l'enquête sociale a été fructueuse, le recensement des casses inexplicables n'a pas eu le succès escompté. Un groupe a bien été monté sur l'application Pl@ntNet, avec pour objectif de pouvoir recenser les casses, et les caractériser à l'aide de photos des faciès de rupture. Mais faute de communication efficace auprès de la communauté des professionnels, aucun rapport de branche cassée n'a été enregistré. Également, un objectif plus large était de construire un réseau de récolte de portions de branches cassées afin de pouvoir en étudier les caractéristiques et en particulier le bois. Une seule branche a pu être récupérée durant la thèse. La science collaborative prend du temps et nécessite une énergie qui n'a pas pu être développée ici. Elle implique de changer certaines habitudes (prendre en photo la branche, noter ses dimensions, le mettre sur un groupe, etc), et faire vivre un groupe est autrement plus difficile que de faire remplir un questionnaire. Il y a une vraie perspective de travail sur ce sujet. Malgré cela, nous avons trouvé une communauté très bienveillante et particulièrement motivée par nos travaux, soucieuse de mieux comprendre le dimensionnement des arbres ; révélant ainsi l'attente importante de la société des s vis-à-vis de celle des scientifiques.

Nos expérimentations de sciage de branches, réalisées sur quelques essences feuillues et seulement un résineux, nous ont fourni des premières pistes intéressantes qui pourraient permettre à terme de proposer des indicateurs aux gestionnaires sur des critères de détection des branches potentiellement dangereuses en milieu urbain (morphologie, essence, etc). Cependant, malgré des campagnes qui regroupent plus de 150 branches, les corrélations ne sont pas évidentes. À ce stade, il serait très intéressant de mener des campagnes complémentaires pour confirmer certains résultats. Notre protocole a été volontairement conçu de façon à rester très simple à mettre en oeuvre. Il pourrait donc être envisagé un nouveau projet de sciences participatives (en impliquant les professionnels, voire le grand public) afin de récolter une importante masse de données permettant de faire ressortir les paramètres pertinents.

Sur le modèle

Pour un modèle biomécanique 1D de mise en place des contraintes longitudinales, le modèle est complet. Il permet de prendre en compte une grande gamme de configurations, et nous ne l'avons pas utilisé dans tout le spectre des possibles. L'implémentation de la loi élastoplastique est prometteuse. Elle mériterait d'être couplée à des mesures de comportement mécanique du bois vert. Cependant, c'est un modèle 1D, qui ne traite que la contrainte longitudinale, et reste à l'échelle de la section. Une première évolution importante pourrait être la prise en considération de la géométrie totale de la branche ; à l'aide d'éléments finis par exemple. Cela permettrait de discuter de l'impact de la forme dans toute sa possible irrégularité, ce qui n'a pas du tout été traité dans ces travaux. Par ailleurs, dans le cadre de la question de la rupture, il semblerait pertinent de se préoccuper des contraintes transverses qui jouent a priori un rôle crucial dans l'initiation de fentes.

Sur l'utilisation du modèle

Même s'il paraît simple, l'usage que l'on fait du modèle constitue un vrai enjeu. La modélisation fait intervenir des paramètres physiques qui sont tous interconnectés, à différentes échelles, et cela amène à prendre du recul sur les résultats obtenus. Une des premières limitations est l'hypothèse forte du caractère homogène du module d'Young sur l'ensemble de la section. Le module d'Young a déjà été identifié comme jouant un rôle important dans le contrôle postural de troncs inclinés. Les quelques mesures réalisées sur les branches [Huang et al. (2005), Huang et al. (2010)] vont aussi en ce sens. Si dans ce premier travail, le module d'Young a été supposé homogène pour ne pas introduire une nouvelle source de variabilité que nous ne maîtrisons pas, son hétérogénéité spatiale est à envisager.

De même, les scénarios de courbure stationnaire tout au long de la vie de la branche manquent de réalisme. En effet, les branches sont connues pour montrer des courbures variables dans le temps, avec par exemple chez la plupart des essences un affaissement progressif local à l'insertion. Les données des maquettes numériques nous ont permis de remonter à l'évolution des courbures des branches au cours de leur croissance, mais les niveaux de contraintes obtenus pour satisfaire ces courbures étaient peu réalistes. Dans ce scénario stationnaire, une autre limite est d'avoir fixé constant un moteur alors que ces derniers varient très probablement au cours de la vie de la branche. Ces limitations traduisent d'une part un vrai besoin expérimental de caractérisation mécanique du bois constituant les branches, et d'autre part, le besoin de données de terrain sur l'évolution de la forme d'une branche. Ainsi, module d'Young, excentricité, déformation de maturation, AMF et densité sont des données cruciales qui permettraient d'alimenter le modèle de manière plus réaliste.

Sur le caractère thermique de la casse estivale

En introduction, trois hypothèses ont été proposées et seulement une a été en partie testée, principalement basée sur des considérations théoriques. Si avec les mesures de surdimensionnement, nous avons pu mettre en évidence un comportement mécanique particulier en été, il serait maintenant intéressant de poursuivre les investigations expérimentales pour creuser cette variabilité inter-saisons. En particulier, il pourrait être envisagé des essais de flexion sur des branches entières, à différentes périodes de l'année. Ces expérimentations pourraient être couplées avec (i) l'essai de sciage, et (ii) des mesures extensives des déterminants anatomiques et mécaniques.

Sur notre prise de position

Enfin, une des limitations la plus importante est celle de la prise de position de ce travail. Les casses inexplicables interviennent sans perturbation mécanique particulière et seul le poids propre est en jeu. Le dimensionnement mécanique des branches tel que nous l'avons abordé a donc été réduit à la réponse à la charge pondérale seulement. Or, les branches sont des structures qui supportent des sollicitations mécaniques nombreuses et fluctuantes, en particulier celles dues au vent. Si les processus d'acclimatation des branches au vent n'a pas

été spécifiquement étudié, l'hypothèse de leur dimensionnement au vent a déjà été formulée [Rodriguez et al. (2008)]. De plus, lors de nos mesures sur des arbres particulièrement exposés au vent, nous avons remarqué une ovalisation horizontale de certaines sections, qui pourrait témoigner d'une réponse aux sollicitations mécaniques du vent. Un travail fondamental de recherche sur l'acclimatation thigmomorphogénétique des branches au vent serait donc à mettre en place. Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser du monitoring des différents types de déformation que peuvent subir les branches. Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc développé des prototypes de capteurs autonomes qui sont présentés dans l'annexe D. Le but de ces capteurs était de pouvoir quantifier les sollicitations en flexion verticale (dans l'axe de la branche), horizontale (transverse à l'axe de la branche), et en torsion. Après une phase de conception, fabrication, et étalonnage importante, ces capteurs ont été installés et testés sur une branche de noyer pendant plus de 5 mois sur le site du PIAF. Ce volet expérimental de monitoring est probablement très important pour comprendre le comportement mécanique des branches et promet d'être un nouveau champ d'investigations passionnant.

Si le travail de thèse a permis de comprendre quelques traits liant le chargement mécanique dû au poids et le dimensionnement des branches, il a surtout permis d'ouvrir de nombreuses perspectives de modélisation et de travaux expérimentaux, dont certaines, déjà engagées devraient à terme apporter de nouvelles données permettant de mieux comprendre le comportement des branches dans leur environnement fluctuant. C'est un champ d'investigations immense qui s'ouvre devant les chercheurs.



Le surdimensionnement des branches : la preuve par 9 !

Bibliographie

- Alméras, T., Jullien, D., and Gril, J. (2018). *Modelling, Evaluation and Biomechanical Consequences of Growth Stress Profiles Inside Tree Stems*, pages 21–48. Springer International Publishing, Cham.
- Alméras, T. and Clair, B. (2016). Critical review on the mechanisms of maturation stress generation in trees. *Journal of The Royal Society Interface*, 13(122) :20160550.
- Alméras, T. and Fournier, M. (2009). Biomechanical design and long-term stability of trees : Morphological and wood traits involved in the balance between weight increase and the gravitropic reaction. *Journal of Theoretical Biology*, 256(3) :370–381.
- Alméras, T., Gril, J., Jullien, D., and Fournier, M. (2008). Les contraintes de croissance dans les tiges : modélisation de leur mise en place et de leur fonction biologique. *Outils et Méthodes*.
- Alméras, T., Thibaut, A., and Gril, J. (2005). Effect of circumferential heterogeneity of wood maturation strain, modulus of elasticity and radial growth on the regulation of stem orientation in trees. *Trees*, 19(4) :457–467.
- Ancelin, P., Fourcaud, T., and Lac, P. (2004). Modelling the biomechanical behaviour of growing trees at the forest stand scale. part i : Development of an incremental transfer matrix method and application to simplified tree structures. *Annals of Forest Science*, 61(3) :263–275.
- Archer, R. R. (1976). On the distribution of tree growth stresses. ii. stresses due to asymmetric growth strains. *Wood Science and Technology*, V10 :293–309.
- Archer, R. R. (1986). Growth stresses and strains in trees. *Berlin, Heidelberg, New-York :Springer Verlag, 1986. — 240 p. (Springer Series in Wood Science)*.
- Archer, R. R. and Byrnes, F. E. (1974). On the distribution of tree growth stresses – part i : An anisotropic plane strain theory. *Wood Science and Technology*, 8(3) :184–196.
- As, N., Goker, Y., and Dundar, T. (2006). Effect of knots on the physical and mechanical properties of scots pine (*pinus sylvestris* l.). *Wood research*, 51 :51–58.

- Azzalini, A. (1985). A class of distributions which includes the normal ones. *Scandinavian Journal of Statistics*, 12(2) :171–178.
- Bach, L. (1966). *Nonlinear mechanical behavior of wood in longitudinal tension*. State University of New York College of Environmental Science and Forestry.
- Badel, E., Ewers, F. W., Cochard, H., and Telewski, F. W. (2015). Acclimation of mechanical and hydraulic functions in trees : impact of the thigmomorphogenetic process. *Frontiers in Plant Science*, 6 :266.
- Baillères, H., Chanson, B., Fournier, M., Tollier, M., and Monties, B. (1995). Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'Eucalyptus. *Annales des sciences forestières*, 52(2) :157–172.
- Bao, F. C., Jiang, Z. H., Jiang, X. M., Lu, X. X., Luo, X. Q., and Zhang, S. Y. (2001). Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in china. *Wood Science and Technology*, 35(4) :363–375.
- Barczi, J.-F., Rey, H., Caraglio, Y., de Reffye, P., Barthélémy, D., Dong, Q. X., and Fourcaud, T. (2007). AmapSim : A Structural Whole-plant Simulator Based on Botanical Knowledge and Designed to Host External Functional Models. *Annals of Botany*, 101(8) :1125–1138.
- Bardet, S., Beauchêne, J., and Thibaut, B. (2003). Influence of basic density and temperature on mechanical properties perpendicular to grain of ten wood tropical species. *Annals of forest science*, 60(1) :49–59.
- Barthélémy, D., Caraglio, Y., and Sabatier, S. (2009). 4.1 crown architecture of valuable broadleaved species. *Valuable broadleaved forests in Europe*, 22 :87.
- Blackburn, G. R. A. (1997). *The growth and mechanical response of trees to wind loading*. PhD thesis, The University of Manchester.
- Bonnesoeur, V. (2016). *Acclimatation des arbres forestiers au vent : de la perception du vent à ses conséquences sur la croissance et le dimensionnement des tiges*. PhD thesis, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech).
- Boyer, N. (1967). Modification de la croissance de la tige de bryone(*bryonia dioica*) a la suite d'irritations tactiles. *C.R.Acad.Sci.Paris*, 264 :2114–2117.
- Bruederle, L. P. and Stearns, F. W. (1985). Ice storm damage to a southern wisconsin mesic forest. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, pages 167–175.
- Bui, H.B. and Dang Van, K. (1974). Trois problèmes non linéaires de l'étude mécanique de la rupture des matériaux. *Rev. Phys. Appl. (Paris)*, 9(4) :605–610.
- Burgert, I. and Jungnikl, K. (2004). Adaptive growth of gymnosperm branches- ultrastructural and micromechanical examinations. *Journal of Plant Growth Regulation*, 23(2) :76–82.

- Burk, D. (2006). *Physiologische, anatomische und chemische Aspekte der Regulation der Wasseraufnahme bei Rotbuche, Kiefer und Birke auf unterschiedlich wasserversorgten Standorten*. PhD thesis, Dissertation Georg August Universität Göttingen.
- Cannell, M. G. R. and Morgan, J. (1987). Young's modulus of sections of living branches and tree trunks. *Tree Physiology*, 3(4) :355–364.
- Caraglio, Y. (1996). Le développement architectural du merisier. *Forêt Entreprise (107)*, pages 72–80.
- Catovsky, S., Holbrook, N. M., and Bazzaz, F. A. (2002). Coupling whole-tree transpiration and canopy photosynthesis in coniferous and broad-leaved tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2) :295–309.
- Cavus, V., Sahin, S., Esteves, B., and Ayata, U. (2020). Determination of thermal conductivity properties in some wood species obtained from turkey. *Bioresources*, 14 :6709–6715.
- Chatziefstratiou, E. K., Bohrer, G., Bova, A. S., Subramanian, R., Frasson, R. P. M., Scherzer, A., Butler, B. W., and Dickinson, M. B. (2013). Firestem2d – a two-dimensional heat transfer model for simulating tree stem injury in fires. *PLOS ONE*, 8(7) :1–14.
- Clair, B., Fournier, M., Prevost, M. F., Beauchene, J., and Bardet, S. (2003). Biomechanics of buttressed trees : bending strains and stresses. *American journal of botany*, 90 :1349–56.
- Clair, B., Ghislain, B., Prunier, J., Lehnebach, R., Beauchêne, J., and Alméras, T. (2019). Mechanical contribution of secondary phloem to postural control in trees : the bark side of the force. *New Phytologist*, 221(1) :209–217.
- Clair, B., Ruelle, J., Beauchêne, J., Prévost, M.-F., and Fournier, M. (2006). Tension wood and opposite wood in 21 tropical rain forest species. 1. Occurrence and efficiency of G-layer. *IAWA Journal*, 27(3) :329–338. A-06-21.
- Cloutier, A. (2005). Anatomie et structure du bois. notes de cours, chapitre 1. Département des sciences du bois et de la forêt, Université de Laval.
- Cohen, Y., Fuchs, M., and Green, G. C. (1981). Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell & Environment*, 4(5) :391–397.
- Coudurier, T., Barthelemy, D., Chanson, B., Courdier, F., and Loup, C. (1993). Premier résultats sur la modélisation du pin maritime *Pinus pinaster* Ait. (Pinaceae). *Architecture des arbres fruitiers et forestiers*, page 306.
- Coutand, C., Dupraz, C., Jaouen, G., Ploquin, S., and Adam, B. (2008). Mechanical stimuli regulate the allocation of biomass in trees : Demonstration with young *Prunus avium* trees. *Annals of botany*, 101 :1421–32.

- Coutand, C., Fournier, M., and Moulia, B. (2007). The gravitropic response of poplar trunks : Key roles of prestressed wood regulation and the relative kinetics of cambial growth versus wood maturation. *Plant Physiology*, 144(2) :1166–1180.
- Coutand, C., Martin, L., Leblanc-Fournier, N., Decourteix, M., Julien, J.-L., and Moulia, B. (2009). Strain mechanosensing quantitatively controls diameter growth and ptazfp2 gene expression in poplar. *Plant physiology*, 151 :223–32.
- Coutand, C., Pot, G., and Badel, E. (2014). Mechanosensing is involved in the regulation of autostress levels in tension wood. *Trees*, 28.
- Dadswell, H. E. and Wardrop, A. B. (1955). The structure and properties of tension wood. *Holzforschung*, 9(4) :97–104.
- Dahle, G. and Grabosky, J. (2009). Review of literature on the function and allometric relationships of tree stems and branches. *Arboriculture and Urban Forestry*, 35.
- Dahle, G., Holt, H., Chaney, W., Whalen, T., Cassens, D., Gazo, R., and McKenzie, R. (2006). Branch strength loss implications for silver maple (*acer saccharinum*) converted from round-over to v-trim. *Arboriculture and Urban Forestry*, 32.
- Dahle, G. A. and Grabosky, J. C. (2010). Variation in modulus of elasticity (e) along acer platanoides l. (aceraceae) branches. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(3) :227–233.
- Delzon, S., Sartore, M., Granier, A., and Loustau, D. (2004). Radial profiles of sap flow with increasing tree size in maritime pine. *Tree Physiology*, 24(11) :1285–1293.
- Derby, R. W. and Gates, D. M. (1966). The temperature of tree trunks - calculated and observed. *American Journal of Botany*, 53(6Part1) :580–587.
- Detter, A. et al. (2009). *Final Report :Development of Risk Assessment Criteria for Branch Failures within the Crowns of Trees*. BioCompliance Consulting, Inc.Redmond, Washington.
- Duryea, M. L., Kampf, E., and Littell, R. C. (2007). Hurricanes and the urban forest : I. effects on southeastern united states coastal plain tree species. *Arboriculture and Urban Forestry*, 33(2) :83.
- Déjardin, A., Laurans, F., Arnaud, D., Breton, C., Pilate, G., and Leplé, J.-C. (2010). Wood formation in angiosperms. *Comptes Rendus Biologies*, 333(4) :325–334. Développement végétatif des plantes.
- Ennos, A. R. and van Casteren, A. (2010). Transverse stresses and modes of failure in tree branches and other beams. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 277(1685) :1253–1258.

- Fisher, J. B. (1978). A quantitative study of terminalia branching. *Cambridge University Press*, in *Tropical trees as living systems*. :p 285–320.
- Fisher, J. B. (1985). Induction of Reaction Wood in Terminalia (Combretaceae) : Roles of Gravity and Stress. *Annals of Botany*, 55(2) :237–248.
- Fisher, J. B. and Stevenson, J. W. (1981). Occurrence of reaction wood in branches of dicotyledons and its role in tree architecture. *Botanical Gazette*, 142(1) :82–95.
- Ford, C. R., Goranson, C. E., Mitchell, R. J., Will, R. E., and Teskey, R. O. (2004). Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow : predicting total stem flow in Pinus taeda trees. *Tree Physiology*, 24(9) :951–960.
- Fourcaud, T., Blaise, F., Lac, P., Castéra, P., and de Reffye, P. (2003). Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees. *Trees*, 17(1) :31–39.
- Fournier, M. (1989). *Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL).
- Fournier, M. (1990). L'arbre, structure en croissance dans le champ de pesanteur : contraintes de support. *Deuxième Séminaire «Architecture, structure, mécanique de l'arbre», Montpellier*.
- Fournier, M., Baillères, H., and Chanson, B. (1994). Tree biomechanics : growth, cumulative prestresses, and reorientations. *Biomimetics*, 2(3) :229–251.
- Fournier, M., Chanson, B., Guitard, D., and Thibaut, B. (1991a). Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. 1. analyse des contraintes de support. *Ann. For. Sci.*, 48(5) :513–525.
- Fournier, M., Chanson, B., Thibaut, B., and Guitard, D. (1991b). Mécanique de l'arbre sur pied : modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. 2. analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation, cas du feuillu standard. *Ann. For. Sci.*, 48(5) :527–546.
- Fournier, M., Stokes, A., Coutand, C., Fourcaud, T., and Moulia, B. (2006). Tree biomechanics and growth strategies in the context of forest functional ecology. *Ecology and biomechanics : a mechanical approach to the ecology of animals and plants*, pages 1–34.
- Fournier, M, Chanson, B, Thibaut, B, and Guitard, D (1994). Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. observations sur différentes espèces. *Ann. For. Sci.*, 51(3) :249–266.
- Furuta, Y., Aizawa, H., Yano, H, and Norimoto, M. (1997). Thermal-softening properties of water-swollen wood. iv. the effects of chemical constituents of the cell wall on the thermal-softening properties of wood. *Mokuzai Gakkaishi*.

- Färber, J., Lichtenegger, H. C., Reiterer, A., Stanzl-Tschegg, S., and Fratzl, P. (2001). Cellulose microfibril angles in a spruce branch and mechanical implications. *Journal of Materials Science*, 36(21) :5087–5092.
- Gartner, K., Nadezhdina, N., Englisch, M., Čermak, J., and Leitgeb, E. (2009). Sap flow of birch and norway spruce during the european heat and drought in summer 2003. *Forest Ecology and Management*, 258(5) :590–599.
- Gerlach, E. (1929). *Untersuchungen über die Wärmeverhältnisse der Bäume*. Jachner & Fischer.
- Ghislain, B. and Clair, B. (2017). Diversity in the organisation and lignification of tension wood fibre walls – a review. *IAWA Journal*, 38(2) :245–265.
- Gilman, E. F. (2003). Branch-to-stem diameter ratio affects strength of attachment. *Journal of Arboriculture*, 29(5) :291–294.
- Granier, A. (1985). Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 42 :81–88.
- Greenhill, A. G. (1882). - Determination of the greatest height consistent with stability that a vertical pole or mast can be made, and of the greatest height to which a tree of given proportions can grow (Hauteur maxima compatible avec la stabilité d'une tige verticale ou d'un mât. Hauteur à laquelle peut croître un arbre de proportions connues); Proc. of Camb. phil. Soc., vol. IV, Part II, 1881. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1(1) :337–338.
- Griffith, A. A. (1921). Vi. the phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 221(582-593) :163–198.
- Gril, J., Jullien, D., Bardet, S., and Yamamoto, H. (2017). Tree growth stress and related problems. *Journal of Wood Science*, 63(5) :411–432.
- Gril, J. and Thibaut, B. (1994). Tree mechanics and wood mechanics : relating hygrothermal recovery of green wood to the maturation process. *Annales des sciences forestières*, 51(3) :329–336.
- Gril, J., Thibaut, B., Berrada, E., and Martin, G. (1993). Recouvrance hygrothermique du bois vert. i. influence de la température. cas du jujubier (*ziziphus lotus* (l) lam). *Ann. For. Sci.*, 50(1) :57–70.
- Gril, J, Berrada, E, and Thibaut, B (1993). Recouvrance hygrothermique du bois vert. ii. variations dans le plan transverse chez le châtaignier et l'épicéa et modélisation de la fissuration à coeur provoquée par l'étuvage. *Ann. For. Sci.*, 50(5) :487–508.
- Guitard, D. (1987). Chapitre 4 : Approche expérimentale du comportement élastique du matériau bois. *Mécanique du bois et des composites*.

- Guitard, D. and El Amri, F. (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Ann. For. Sci.*, 44(3) :335–358.
- Gurau, L., Cionca, M., Mansfield-Williams, H., Sawyer, G., and Zeleniuc, O. (2008). Comparison of the mechanical properties of branch and stem wood for three species. *Wood and Fiber Science*, pages 647–656.
- Gérard, J., Guibal, D., Paradis, S., Vernay, M., Beauchêne, J., Brancheriau, L., Châlon, I., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D., Langbour, P., Lotte, S., Thévenon, M.-F., Méjean, C., and Thibaut, A. (2011). *Tropix 7*.
- Hallé, F., Oldeman, R. A., and Tomlinson, P. B. (1978). *Tropical trees and forests : an architectural analysis*. Springer Verlag.
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C., and Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825) :357–362.
- Hauer, R. J., Wang, W., and Dawson, J. O. (1993). Ice storm damage to urban trees. *Journal of Arboriculture*, 19 :187–187.
- Herman, J. and Usher, W. (2017). Salib : An open-source python library for sensitivity analysis. *Journal of Open Source Software*, 2(9) :97.
- Herrington, L. P. (1969). On temperature and heat flow in tree stems. *Yale School of Forestry & Environmental Studies Bulletin Series*.
- Heuret, P., Meredieu, C., Coudurier, T., Courdier, F., and Barthélémy, D. (2006). Ontogenetic trends in the morphological features of main stem annual shoots of pinus pinaster (pinaceae). *American Journal of Botany*, 93(11) :1577–1587.
- Huang, Y.-S., Chen, S.-S., Kuo-Huang, L.-L., and Lee, C.-M. (2005). Growth strain in the trunk and branches of chamaecyparis formosensis and its influence on tree form. *Tree Physiol*, 25(9) :1119–1126.
- Huang, Y.-S., Hung, L.-F., and Kuo-Huang, L.-L. (2010). Biomechanical modeling of gravitropic response of branches : roles of asymmetric periphery growth strain versus self-weight bending effect. *Trees*, 24(6) :1151–1161.
- Hüber B, S. E. (1937). Eine kompensationsmethode zur thermoelektrischen messung langsamer stoffströme. *Ber. dtsh. Bot. Ges*, 55 :514–529.
- Hughes, J. (1965). Tension wood a literature review. i. occurrence and development of tension wood. ii. the properties and use characteristics of tension wood. *Forestry Abstracts*.

- Hung, L.-F., Tsai, C.-C., Chen, S.-J., Huang, Y.-S., and Kuo-Huang, L.-L. (2016). Study of tension wood in the artificially inclined seedlings of *koelreuteria henryi dummer* and its biomechanical function of negative gravitropism. *Trees*, 30(3) :609–625.
- Hung, L.-F., Tsai, C.-C., Chen, S.-J., Huang, Y.-S., and Kuo-Huang, L.-L. (2017). Strain distribution, growth eccentricity, and tension wood distribution in the plagiotropic and orthotropic branches of *koelreuteria henryi dummer*. *Trees*, 31(1) :149–164.
- Hunter, J. (1775). Xliii. experiments on animals and vegetables, with respect to the power of producing heat. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 65 :446–458.
- Hölscher, D., Koch, O., Korn, S., and Leuschner, C. (2005). Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought. *Trees*, 19(6) :628–637.
- Höster, H.-R. and Liese, W. (1966). Über das vorkommen von reaktionsgewebe in wurzeln und Ästen der dikotyledonen. *Holzforschung*, 20(3) :80–90.
- IAWA (1964). Multilingual glossary of terms used in wood anatomy. *Verlagsanstalt Buchdruckerei Konkordia Winterthur*, page p186.
- Jaffe, M. J. (1973). Thigmomorphogenesis : The response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta*, 114(2) :143–157.
- Jiménez, M., Morales, D., Kucera, J., and Cermák, J. (1999). annual course of transpiration in a laurel forest of tenerife. estimation with *myrica faya*. *Phyton*.
- Jiménez, M., Cermák, J., Kucera, J., and Morales, D. (1996). Laurel forests in tenerife, canary islands : the annual course of sap flow in *laurus* trees and stand. *Journal of Hydrology*, 183(3) :307–321.
- Jobson, J. D. (2012). *Applied multivariate data analysis : regression and experimental design*. Springer Science & Business Media.
- Jourez, B. (1997a). Le bois de tension. 1 définition et distribution dans l'arbre. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 1(2).
- Jourez, B. (1997b). Le bois de tension. 2. evaluation quantitative, formation et rôle dans l'arbre. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 1.
- Jourez, B. and Avella-Shaw, T. (2003). Effet de la durée d'application d'un stimulus gravitationnel sur la formation de bois de tension et de bois opposé dans de jeunes pousses de peuplier (*populus euramericana* cv 'ghoy'). *Annals of Forest Science - ANN FOR SCI*, 60 :31–41.
- Jullien, D and Gril, J (1996). Mesures des déformations bloquées dans un disque de bois vert. méthode de la fermeture. *Ann. For. Sci.*, 53(5) :955–966.

- Kassambara, A. (2022). *rstatix : Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests*. R package version 0.7.1.
- Koljo, B. (1950). Einiges über die wärmephänomene der hölzer und bäume. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 69(9) :538–551.
- Kollman F, C. W. (1968). Principles of wood science and technology. *Springer-Verlag*, 1, 'Solid Wood'.
- Koman, S., Feher, S., Abraham, J., and Taschner, R. (2013). Effect of knots on the bending strength and the modulus of elasticity of wood. *Wood Research*, 58(4) :617–626.
- Kretschmann, D. E. (2010). Wood handbook, chapter 05 : mechanical properties of wood. *Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, USA*.
- Kunert, N., Schwendenmann, L., and Hölscher, D. (2010). Seasonal dynamics of tree sap flux and water use in nine species in panamanian forest plantations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3) :411–419.
- Kübler, H. (1959a). Studien über wachstumsspannungen des holzes iii. längenänderungen bei der wärmebehandlung frischen holzes. *Holz Rohst Werkst*, 17(3) :77–86.
- Kübler, H. (1959b). Studien über wachstumsspannungen des holzesi. die ursache der wachstumsspannungen und die spannungenquer zur faserrichtung (in german). *Holz Roh-Werk 17 :1–9*.
- Laboratory, F. P. (2010). *Wood handbook : wood as an engineering material*. USDA Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA., general technical report 190 edition.
- Lehnebach, R., Alméras, T., and Clair, B. (2020). How does bark contribution to postural control change during tree ontogeny? A study of six Amazonian tree species. *Journal of Experimental Botany*, 71(9) :2641–2649.
- Lenth, C. A. and Kamke, F. A. (2001). Moisture dependent softening behavior of wood. *Wood and Fiber Science*, pages 492–507.
- Lilly, S. and Sydnor, T. D. (1995). Comparison of branch failure during static loading of silver and norway maples. *Journal of Arboriculture*, 21 :302–305.
- Lindström, H., Evans, J. W., and Verrill, S. P. (1998). Influence of cambial age and growth conditions on microfibril angle in young norway spruce (*picea abies* [l.] karst.). *Holzfor-schung*, 52(6) :573–581.
- Luley, C. J., Sisinni, S., and Pleninger, A. (2002). The effect of pruning on service requests, branch failures, and priority maintenance in the city of rochester, new york, us. *Journal of Arboriculture*, 28(3) :137–143.

- Lyu, J., He, Q.-Y., Yang, J., Chen, Q.-W., Cheng, R.-R., Yan, M.-J., Yamanaka, N., and Du, S. (2020). Sap flow characteristics in growing and non-growing seasons in three tree species in the semiarid loess plateau region of china. *Trees*, 34(4) :943–955.
- Mania, P., Siuda, F., and Roszyk, E. (2020). Effect of slope grain on mechanical properties of different wood species. *Materials (Basel, Switzerland)*, 13.
- Marshall, D. C. (1958). Measurement of Sap Flow in Conifers by Heat Transport. 1. *Plant Physiology*, 33(6) :385–396.
- Meng, S. X., Lieffers, V. J., Reid, D. E. B., Rudnicki, M., Silins, U., and Jin, M. (2006). Reducing stem bending increases the height growth of tall pines. *Journal of Experimental Botany*, 57(12) :3175–3182.
- Miesbauer, J. W., Gilman, E. F., Masters, F. J., and Nitesh, S. (2014). Impact of branch reorientation on breaking stress in *liriodendron tulipifera* l. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3) :526–533.
- Moore, J. R., Gardiner, B. A., Blackburn, G. R., Brickman, A., and Maguire, D. A. (2005). An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(1) :78–83.
- Mouliá, B., Coutand, C., and Julien, J.-L. (2015). Mechanosensitive control of plant growth : bearing the load, sensing, transducing, and responding. *Frontiers in plant science*, 6 :52.
- Mouliá, B. and Fournier, M. (2009). The power and control of gravitropic movements in plants : a biomechanical and systems biology view. *Journal of Experimental Botany*, 60(2) :461–486.
- Müller, U., Gindl-Altmutter, W., Konnerth, J., Maier, G. A., and Keckes, J. (2015). Synergy of multi-scale toughening and protective mechanisms at hierarchical branch-stem interfaces. *Scientific Reports*, 5(1) :1–9.
- Müller, U., Gindl, W., and Jeronimidis, G. (2006). Biomechanics of a branch - stem junction in softwood. *Trees*, 20(5) :643–648.
- Müller, U., Gindl-Altmutter, W., and Keckes, J. (2018). How softwood tree branches are attached to stems : hierarchical extension of shigo’s stem-branch model. *Trees*, 32(4) :1113–1121.
- Nadezhdina, N., Cermak, J., and Nadezhdin, V. (1998). Heat field deformation method for sap flow measurements. In *Measuring sap flow in intact plants. Proceedings of 4th International Workshop, Židlochovice, Czech Republic, IUFRO Publ. Brno, Czech Republic : Mendel University*, pages 72–92.
- Navi, P., Rastogi, P. K., Gresse, V., and Tolou, A. (1995). Micromechanics of wood subjected to axial tension. *Wood Science and Technology*, 29(6) :411–429.

- Nicholson, J. E. (1971). A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs. *Wood Science and Technology*, 5(1) :40–48.
- Niez, B. (2018). *Acclimatation de l'arbre aux flexions répétées et conséquences sur le comportement mécanique et les propriétés hydrauliques du bois vert*. Theses, Université Clermont Auvergne.
- Niez, B., Dlouha, J., Gril, J., Ruelle, J., Toussaint, E., Moulia, B., and Badel, E. (2020). Mechanical properties of “flexure wood” : compressive stresses in living trees improve the mechanical resilience of wood and its resistance to damage. *Annals of Forest Science*, 77(1) :17.
- Niez, B., Dlouhá, J., Moulia, B., and Badel, E. (2019). Water-stressed or not, the mechanical acclimation is a priority requirement for trees. *Trees*, 33.
- Olchev, A., Cermák, J., N, N., Tatarinov, F., A, T., Ibrom, A., and Gravenhorst, G. (2002). Transpiration of a mixed forest stand : Field measurements and simulation using svat models. *Boreal Environment Research*, 4 :389–397.
- Panshin, A. J. (Alexis John), . and De Zeeuw, C. (1970). *Textbook of wood technology [by] A. J. Panshin [and] Carl de Zeeuw*. Number Accessed from [https ://nla.gov.au/nla.cat-vn376601](https://nla.gov.au/nla.cat-vn376601) in The American forestry series. McGraw-Hill, New York.
- Pataki, D. E., Oren, R., and Smith, W. K. (2000). Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought. *Ecology*, 81(9) :2557–2566.
- Pickard, W. F. and Puccia, C. J. (1972). A theory of the steady-state heat step method of measuring water flux in woody plant stems. *Mathematical Biosciences*, 14(1) :1–15.
- Plomion, C., Leprovost, G., and Stokes, A. (2001). Wood Formation in Trees. *Plant Physiology*, 127(4) :1513–1523.
- Pot, G. (2012). *Caractérisation mécanique du bois vert au cours de sa maturation et modélisation de la réaction gravitropique de jeunes peupliers*. Theses, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- R Core Team (2021). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raymond, C., Kube, P., Pinkard, L., Savage, L., and Bradley, A. (2004). Evaluation of non-destructive methods of measuring growth stress in eucalyptus globulus : relationships between strain, wood properties and stress. *Forest Ecology and Management*, 190(2) :187–200.
- Reid, S., Driller, T., and Watson, M. (2020). A two-dimensional heat transfer model for predicting freeze-thaw events in sugar maple trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 294 :108139.

- Reiterer, A., Jakob, H. F., Stanzl-Tschegg, S. E., and Fratzl, P. (1998). Spiral angle of elementary cellulose fibrils in cell walls of picea abies determined by small-angle x-ray scattering. *Wood Science and Technology*, 32(5) :335–345.
- Reynolds, E. S. (1939). Tree temperatures and thermostasy. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 26(3) :165–255.
- Rocha, M. F. V., Costa, L. R., Costa, L. J., Araújo, A. C. C. d., Soares, B. C. D., and Hein, P. R. G. (2018). Wood knots influence the modulus of elasticity and resistance to compression. *Floresta e Ambiente*, 25.
- Rodriguez, M., de Langre, E., and Moullia, B. (2008). A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization. *American Journal of Botany*, 95(12) :1523–1537.
- Roignant, J., Badel, E., Leblanc-Fournier, N., Brunel-Michac, N., Ruelle, J., Moullia, B., and Decourteix, M. (2018). Feeling stretched or compressed? the multiple mechanosensitive responses of wood formation to bending. *Annals of botany*, 121 :1151–1161.
- Rouschal, E. (1939). Die kuhlende wirkung des transpirations-stromes in baumen. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 57(2) :53–66.
- Saltelli, A. (2002). Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, 145(2) :280–297.
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., and Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181(2) :259–270.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D. J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., and Cardona, A. (2012). Fiji : an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, 9(7) :676–682.
- Scholz, F. G., Bucci, S. J., Goldstein, G., Meinzer, F. C., and Franco, A. C. (2002). Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. *Tree physiology*, 22 :603–12.
- Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4) :591–611.
- Shigo, A. L. (1985). How tree branches are attached to trunks. *Canadian Journal of Botany*, 63(8) :1391–1401.
- Siau, J. F. (1984). *Transport Processes in Wood*, volume 2. Springer Berlin, Heidelberg.
- Smiley, E. T. (2003). Does included bark reduce the strength of codominant stems? *Journal of Arboriculture*, 29(2) :104–106.

- Sobol, I. M. (1993). Sensitivity analysis for non-linear mathematical models. *Math. Modeling Comput. Exp.*, 1 :407–414.
- Steinberg, S., Bavel, C., and McFarland, M. (1989). A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114 :466–472.
- Stöhr, A. and Lösch, R. (2004). Xylem sap flow and drought stress of fraxinus excelsior saplings. *Tree Physiology*, 24(2) :169–180.
- Sujan, K. C., Yamamoto, H., Matsuo, M., Yoshida, M., Naito, K., Suzuki, Y., Yamashita, N., and Yamaji, F. M. (2016). Is hygrothermal recovery of tension wood temperature-dependent? *Wood Science and Technology*, 50(4) :759–772.
- Swanson, R. H. (1962). *An instrument for detecting sap movement in woody plants*. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station,.
- Telewski, F. W. (1989). Structure and function of flexure wood in *Abies fraseri*. *Tree Physiology*, 5(1) :113–121.
- Thibaut, B. and Gril, J. (2021). Tree growth forces and wood properties. *Peer Community Journal*, 1.
- Timell, T. (1986). *Compression wood in gymnosperms*, volume 1-3. Springer-Verlag.
- TRIBOULOT, P., JODIN, P., and PLUVINAGE, G. (1982). Mesure des facteurs d'intensité de contrainte critiques et des taux de restitution d'énergie dans le bois sur éprouvettes entaillées. *Ann. For. Sci.*, 39(1) :63–76.
- Trouy., M.-C. (2015). *Anatomie du bois. Formation, fonctions et identification*. Editions Quae.
- Tsai, C.-C., Hung, L.-F., Chien, C.-T., Chen, S.-J., Huang, Y.-S., and Kuo-Huang, L.-L. (2012). Biomechanical features of eccentric cambial growth and reaction wood formation in broadleaf tree branches. *Trees*, 26(5) :1585–1595.
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5(2) :99–114.
- Ueda Matsuo, M., Niimi, G., Sujan, K. C., Yoshida, M., and Yamamoto, H. (2016). Hygrothermal recovery of compression wood in relation to elastic growth stress and its physicochemical characteristics. *Journal of Materials Science*, 51(17) :7956–7965.
- van Casteren, A., Sellers, W. I., Thorpe, S. K. S., Coward, S., Crompton, R. H., and Ennos, A. R. (2012). Why don't branches snap? the mechanics of bending failure in three temperate angiosperm trees. *Trees*, 26(3) :789–797.

- Van Diem, T. (2017). *Modélisation du comportement au feu des structures en bois / Modelling the behaviour of timber structures under fire*. PhD thesis, Université de Lorraine.
- Van Rossum, G. and Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
- Vieweg, G. and Ziegler, H. (1960). Thermoelektrische registrierung der geschwindigkeit des transpirationsstromes. *Ber Dtsch Bot Ges*, 73 :221–226.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, Í., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., and SciPy 1.0 Contributors (2020). SciPy 1.0 : Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17 :261–272.
- Wang, J., Turner, N. C., Feng, H., Dyck, M., and He, H. (2022). Heat tracer-based sap flow methods for tree transpiration measurements : a mini review and bibliometric analysis. *Journal of Experimental Botany*, 74(3) :723–742.
- Wang, Y., Gril, J., Clair, B., Minato, K., and Sugiyama, J. (2010). Wood properties and chemical composition of the eccentric growth branch of *viburnum odoratissimum* var. *awabuki*. *Trees*, 24(3) :541–549.
- Wang, Y., Gril, J., and Sugiyama, J. (2009). Variation in xylem formation of *viburnum odoratissimum* var. *awabuki* : growth strain and related anatomical features of branches exhibiting unusual eccentric growth. *Tree Physiol*, 29(5) :707–713.
- Westing, A. H. (1965). Formation and function of compression wood in gymnosperms. *The Botanical Review*, 31(3) :381–480.
- Westing, A. H. (1968). Formation and function of compression wood in gymnosperms. ii. *The Botanical Review*, 34(1) :51–78.
- Wullschlegel, S. D., Childs, K. W., King, A. W., and Hanson, P. J. (2011). A model of heat transfer in sapwood and implications for sap flux density measurements using thermal dissipation probes†. *Tree Physiology*, 31(6) :669–679.
- Xu, P. and Liu, H. (2004). Models of microfibril elastic modulus parallel to the cell axis. *Wood Science and Technology*, 38(7) :577–577.
- Yamamoto, H. and Kojima, Y. (2002). Properties of cell wall constituents in relation to longitudinal elasticity of wood. *Wood Science and Technology*, 36(1) :55–74.

- Yamamoto, H., Yoshida, M., and Okuyama, T. (2002). Growth stress controls negative gravitropism in woody plant stems. *Planta*, 216(2) :280–292.
- Yang, J. L. and Evans, R. (2003). Prediction of moe of eucalypt wood from microfibril angle and density. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(6) :449–452.
- Yang, L., Yang, M., and Yang, G. (2019). Modeling fractures and cracks on tree branches. *Computers & Graphics*, 80 :63–72.
- Yokota T, T. H. (1962). Changes in dimension on heating green wood. *For Prod J*, 12(1) :43–45.
- Čermák, J., Deml, M., and Penka, M. (1973). A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum*, 15(3) :171–178.
- Čermák, J., Kučera, J., and Penka, M. (1976). Improvement of the method of sap flow rate determination in full-grown trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. *Biologia Plantarum*, 18(2) :105–110.

Annexe A

Enquête participative : évolutions du questionnaire

A.1 Questionnaire original, diffusé en décembre 2020

28/10/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

Public visé: communauté d'experts de l'arbre et gestionnaires d'arbres urbains

Chute de branche inexplicquée. Été 2020. Essence: Tilleul. Lieu: Wavre (source: <https://cutt.ly/HUNDZ7>)



L'objectif de ce questionnaire est de comprendre votre perception des casses « inexplicquées », comme le sont les casses dites « estivales ». Ce sont des situations de chutes où la branche tombée ne présente aucun signe de faiblesse (pas d'attaque sanitaire, pas de plaies, etc) et où les conditions météorologiques ne peuvent pas expliquer la casse (pas de vents particuliers, pas de chute importante de neige, etc). Les réponses collectées lors de ce questionnaire nous permettrons de mieux cibler les paramètres pouvant jouer sur ce phénomène complexe.

Présentation

1. Nom

<https://docs.google.com/forms/d/1C-040g54baM9dZqQbV9EcTHSEwYeAdXWhtvYnNQuBw/edit>

1/10

28/10/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

8. Selon vos estimations, quel pourcentage de branche est inexplicquée sur une année ?

Plusieurs réponses possibles.

- Moins de 10%
 Entre 10 et 25%
 Entre 25% et 50%
 Plus de 50%
 Je ne sais pas

Saison et moment de la journée

9. Selon votre expérience, les casses soudaines, brusques et inexplicquées (hors problème sanitaire, grand vent, chargement de neige, etc) de branches surviennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- Au printemps
 En été
 En automne
 En hiver
 Toute l'année

10. Pouvez-vous indiquer en quelques lignes les conditions météo du jour (très chaud/froid, matin/soir, sécheresse/humide, pluie, etc) ?

Influence de l'environnement

28/10/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

2. Prénom

3. E-mail

4. Êtes-vous ?

Une seule réponse possible.

- Gestionnaire d'arbres urbains
 Expert de l'arbre
 Autre

5. Quelle est votre profession ?

6. Si vous êtes experts, faites-vous parti d'un réseau (ONF, GECAO, SFA, ...)?

Une seule réponse possible.

- Oui
 Non

7. Si oui, quel est ce réseau ?

La casse des branches

1/10

<https://docs.google.com/forms/d/1C-040g54baM9dZqQbV9EcTHSEwYeAdXWhtvYnNQuBw/edit>

2/10

28/10/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

11. Dans le cas de casses « inexplicquées », les branches cassées appartiennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- A des arbres isolés (rue, parking, place, etc.)
 A des arbres en environnement dense (parc, etc.)
 Indifféremment
 Je ne sais pas
Autre : _____

Influence de la position dans l'arbre

12. Dans le cas de casses « inexplicquées », quel type de branche est généralement touché ?

Plusieurs réponses possibles.

- Charpentières basses
 Branches de milieu de houppier
 Branches en cime d'arbre
 Indifféremment
 Je ne sais pas
Autre : _____

13. Dans le cas de casses « inexplicquées », quel type de branche est généralement touché ?

Plusieurs réponses possibles.

- Branche maîtresse (Axe +1)
 Branche latérale, rameau (Axe +2)
 Tige codominante
 Indifféremment
 Je ne sais pas
Autre : _____

Influence de l'orientation

14. Dans le cas de casses « inexplicables », quelle est l'orientation des branches majoritairement observée ?

Plusieurs réponses possibles.

- Branches horizontales
 Branches qui tombent vers le bas
 Branches qui tombent vers le haut
 Branches presque verticales
 La casse semble indépendante de l'orientation
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de la forme

15. D'après vous, la forme de la branche est elle un facteur qui peut accentuer le risque de casses « inexplicables » ?

Plusieurs réponses possibles.

- Oui
 Non
 Je ne sais pas

16. Si oui, les branches susceptibles de casser de façon « inexplicable » sont-elles ?

Plusieurs réponses possibles.

- En arc vers le haut
 En arc vers le bas
 Droite
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de l'uniformité

17. Les branches susceptibles de casser de façon « inexplicable » ont elles ?

Plusieurs réponses possibles.

- Une forme de croissance et une structure typique de l'essence
 Une forme de croissance et une structure atypique pour l'essence
 Une présence d'angles vifs et de courbes
 Une présence de défauts et de blessures
 Je ne sais pas

Autre : _____

Localisation de la rupture

18. Dans le cas de casse « inexplicable » la rupture observée est elle plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- A l'insertion
 Pas à l'insertion mais proche (à moins d'un mètre de l'insertion)
 Plus loin dans la branche
 Indifféremment
 Je ne sais pas

Influence de l'âge

19. Les casses « inexplicables » surviennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- Chez les sujets jeunes (<5 ans)
 Chez les sujets matures (5-50 ans)
 Chez les sujets âgés (>50 ans)
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de l'architecture

20. Les casses « inexplicables » surviennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- Sur des essences avec une majorité de grandes branches horizontales
 Sur des essences avec des branches orientées vers le haut
 Sur n'importe quel type d'arbre, cela semble indépendant de l'essence
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de l'élagage

21. Certains élagages vous semble-t-il avoir rendu des branches plus sensibles à la casse ?

Plusieurs réponses possibles.

- Oui
 Non
 Je ne sais pas

22. Si oui, précisez :

23. Dans le cas de casses « inexplicables », avez-vous souvent l'occasion d'observer les branches au sol juste après leur chute ? (Estimation en %) ?

Influence de la taille

24. Pouvez-vous donner une fourchette de la plage de diamètre que présentent une majorité des branches qui cassent de « manière inexplicable » :

25. Etes-vous en mesure d'identifier sur un arbre, une branche qui risque de casser de manière soudaine ?

Plusieurs réponses possibles.

- Oui
 Non

26. Si oui, sur quels critères vous basez vous ?

Questions/suggestions sur ce questionnaire

Chute de branche inexpliquée. Été 2020. Essence: Marronnier. Lieu: Liège (source: <https://cutt.ly/2hU16A4>)



27. Si vous avez des remarques sur ce questionnaire, n'hésitez pas à nous en faire part ci dessous :

Si vous avez des photos, des dossiers, ou quoi que ce soit sur le sujet, n'hésitez pas à nous les faire parvenir à l'adresse suivante: arnoul.van-rooij@inrae.fr

Ce contenu n'est ni rédigé, ni cautionné par Google.

A.2 Questionnaire mis à jour, diffusé en janvier 2022

03/11/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

Public visé: communauté d'experts de l'arbre et gestionnaires d'arbres urbains

Chute de branche inexplicable. Été 2020. Essence: Tilleul. Lieu: Wavre (source: <https://cutt.ly/HUNDZ7>)



L'objectif de ce questionnaire est de comprendre votre perception des casses « inexplicables », comme le sont les casses dites « estivales ». Ce sont des situations de chutes où la branche tombée ne présente aucun signe de faiblesse (pas d'attaque sanitaire, pas de plaies, etc) et où les conditions météorologiques ne peuvent pas expliquer la casse (pas de vents particuliers, pas de chute importante de neige, etc). Les réponses collectées lors de ce questionnaire nous permettront de mieux cibler les paramètres pouvant jouer sur ce phénomène complexe.

Présentation

1. Nom

https://docs.google.com/forms/d/1VEdfZd24v08P1HrGIP85jy5T6_hme4w8LqWONMZBBI/edit

1/11

https://docs.google.com/forms/d/1VEdfZd24v08P1HrGIP85jy5T6_hme4w8LqWONMZBBI/edit

2/11

03/11/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

8. Si oui, quel est ce réseau ?

La casse des branches

9. Selon vos estimations, quel pourcentage de branche est inexplicable sur une année ?

Plusieurs réponses possibles.

- Moins de 10%
 Entre 10 et 25%
 Entre 25% et 50%
 Plus de 50%
 Je ne sais pas

Saison et moment de la journée

10. Selon votre expérience, les casses soudaines, brusques et inexplicables (hors problème sanitaire, grand vent, chargement de neige, etc) de branches surviennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- Au printemps
 En été
 En automne
 En hiver
 Toute l'année

https://docs.google.com/forms/d/1VEdfZd24v08P1HrGIP85jy5T6_hme4w8LqWONMZBBI/edit

3/11

https://docs.google.com/forms/d/1VEdfZd24v08P1HrGIP85jy5T6_hme4w8LqWONMZBBI/edit

4/11

03/11/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

2. Prénom

3. E-mail

4. Etes vous ?

Une seule réponse possible.

- Gestionnaire d'arbres urbains
 Expert de l'arbre
 Arboriste
 Technicien
 Autre

5. Quelle est votre profession ?

6. Travaillez vous dans le secteur privé ou public ?

Une seule réponse possible.

- Privé
 Public
 Autre : _____

7. Si vous êtes experts, faites vous parti d'un réseau (ONF, GECAO, SFA, ...) ?

Une seule réponse possible.

- Oui
 Non

03/11/2021

Questionnaire d'enquête sur la sensibilité à la casse des branches

11. Les casses inexplicables surviennent plutôt

Plusieurs réponses possibles.

- Le matin
 L'après midi
 En soirée
 La nuit
 Je ne sais pas
Autre : _____

12. Les conditions météo au moment de la casse sont selon vous:

Plusieurs réponses possibles.

- Sécheresse
 Chaleur
 Vent
 Pluie
 Neige
 Je ne sais pas
Autre : _____

Influence de l'environnement

13. Dans le cas de casses « inexplicables », les branches cassées appartiennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- A des arbres isolés (rue, parking, place, etc.)
 A des arbres en environnement dense (parc, etc.)
 Indifféremment
 Je ne sais pas
Autre : _____

Influence de la position dans l'arbre

14. Dans le cas de casses « inexplicables », quel type de branche est généralement touché ?

Plusieurs réponses possibles.

- Charpentières basses
 Branches de milieu de houppier
 Branches en cime d'arbre
 Indifféremment
 Je ne sais pas

Autre : _____

15. Dans le cas de casses « inexplicables », quel type de branche est généralement touché ?

Plusieurs réponses possibles.

- Branche maîtresse (Axe +1)
 Branche latérale, rameau (Axe +2)
 Tige codominante
 Indifféremment
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de l'orientation

16. Dans le cas de casses « inexplicables », quelle est l'orientation des branches majoritairement observée ?

Plusieurs réponses possibles.

- Branches horizontales
 Branches qui tombent vers le bas
 Branches qui tombent vers le haut
 Branches presque verticales
 La casse semble indépendante de l'orientation
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de la forme

https://docs.google.com/forms/d/1VEdfZd24v08P1HrGIPt85jv5T6_hme4w8LqwONMZBBI/edit

5/11

17. D'après vous, la forme de la branche est elle un facteur qui peut accentuer le risque de casses « inexplicables » ?

Plusieurs réponses possibles.

- Oui
 Non
 Je ne sais pas

18. Si oui, les branches susceptibles de casser de façon « inexplicable » sont-elles ?

Plusieurs réponses possibles.

- En arc vers le haut
 En arc vers le bas
 Droite
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de l'uniformité

19. Les branches susceptibles de casser de façon « inexplicable » ont-elles ?

Plusieurs réponses possibles.

- Une forme de croissance et une structure typique de l'essence
 Une forme de croissance et une structure atypique pour l'essence
 Une présence d'angles vifs et de courbes
 Une présence de défauts et de blessures
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de la taille

6/11

20. Le diamètre des branches qui cassent de manière inexplicable se situe :

Plusieurs réponses possibles.

- Entre 0 et 10 cm
 Entre 10 et 25 cm
 Entre 25 et 40 cm
 Au delà de 40 cm
 Je ne sais pas

Autre : _____

Localisation de la rupture

21. Dans le cas de casse « inexplicable » la rupture observée est elle plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- A l'insertion
 Pas à l'insertion mais proche (à moins d'un mètre de l'insertion)
 Plus loin dans la branche
 Indifféremment
 Je ne sais pas

Influence de l'âge

22. Les casses « inexplicables » surviennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- Chez les sujets jeunes (<5 ans)
 Chez les sujets matures (5-50 ans)
 Chez les sujets âgés (>50 ans)
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de l'architecture

23. Les casses « inexplicables » surviennent plutôt :

Plusieurs réponses possibles.

- Sur des essences avec une majorité de grandes branches horizontales
 Sur des essences avec des branches orientées vers le haut
 Sur n'importe quel type d'arbre, cela semble indépendant de l'essence
 Je ne sais pas

Autre : _____

Influence de l'élagage

24. Certains élagages vous semble-t-il avoir rendu des branches plus sensibles à la casse ?

Plusieurs réponses possibles.

- Oui
 Non
 Je ne sais pas

25. Si oui, précisez :

26. Dans le cas de casses « inexplicables », avez-vous souvent l'occasion d'observer les branches au sol juste après leur chute ? (Estimation en %) ?

Plusieurs réponses possibles.

- Inférieur à 25%
 Entre 25 et 75%
 Supérieur à 75%
 Je ne sais pas

Autre : _____

27. Etes-vous en mesure d'identifier sur un arbre, une branche qui risque de casser de manière soudaine ?

Plusieurs réponses possibles.

- Oui
- Non

28. Si oui, sur quels critères vous basez vous ?

Questions/suggestions sur ce questionnaires

Chute de branche inexpliquée. Été 2020. Essence: Marronnier. Lieu: Liège (source: <https://cutt.ly/2hUj6A4>)



29. Si vous avez des remarques sur ce questionnaire, n'hésitez pas à nous en faire part ci dessous :

Si vous avez des photos, des dossiers, ou quoi que ce soit sur le sujet, n'hésitez pas à nous les faire parvenir à l'adresse suivante: arnoul.van-rooij@inrae.fr

Annexe B

Mesure du retrait au séchage : résultats annexes.

B.1 Échantillonnage des barreaux prélevés dans les tronçons : sections réelles et jumelles théoriques .

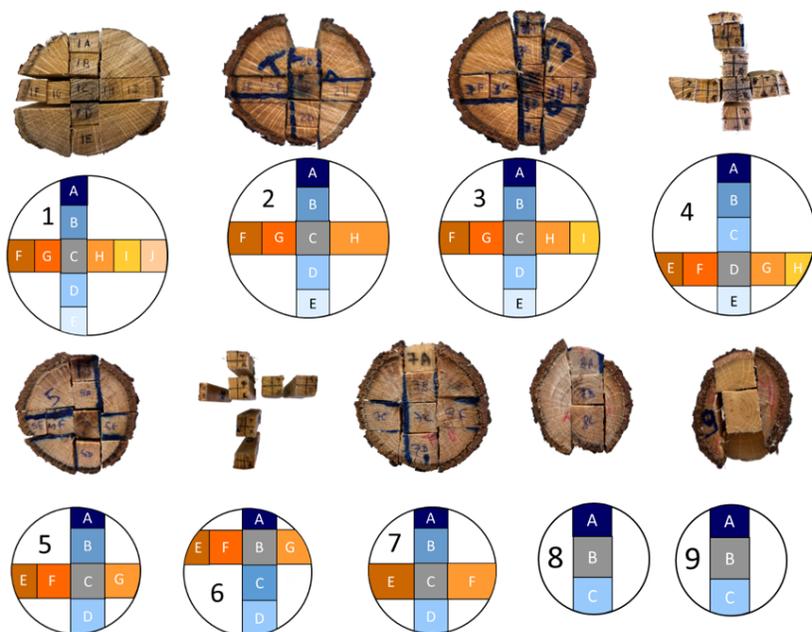
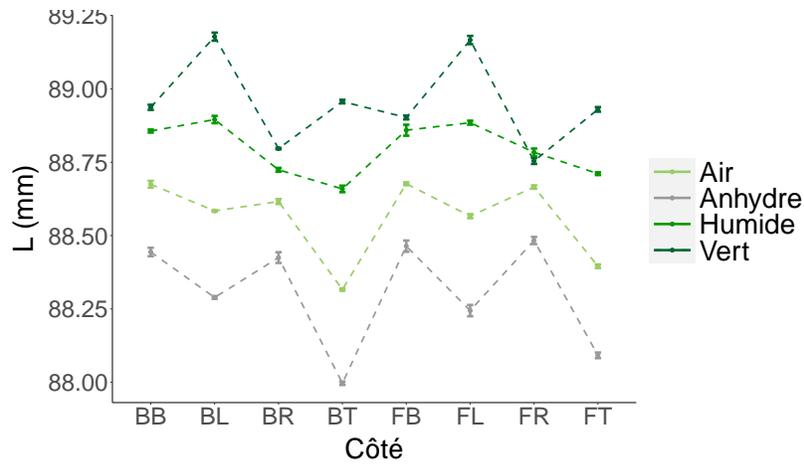
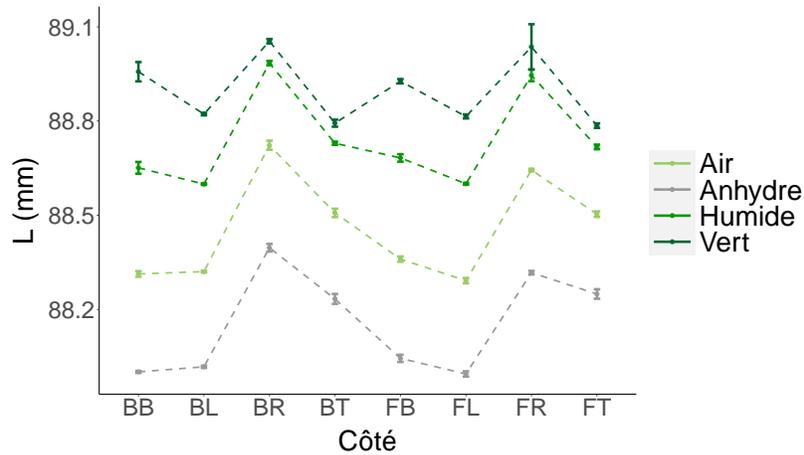


FIGURE B.1 – Échantillonnage. Présentation des sections (et leur jumelle théorique) des 9 barreaux prélevés dans chaque tronçon. L'échantillonnage n'est pas homogène, dépendant principalement des dimensions de la section.

B.2 Caractérisation de l'incertitude liée à la méthode de mesure



(a) Échantillon 5B



(b) Échantillon 7C

FIGURE B.2 – Caractérisation de l'incertitude liée à la méthode de mesure. Pour chaque côté et pour chaque état, 5 mesures ont été réalisées et la distribution des résultats est indiquée sous forme de barre d'erreur. Les 2 échantillons, 5B et 7C, ont été choisis au hasard. Pour chacune des représentations, l'incertitude liée à la mesure est très faible devant celle liée au retrait entre deux états.

B.3 Résultats des mesures de retrait longitudinal pour chacune des sections.

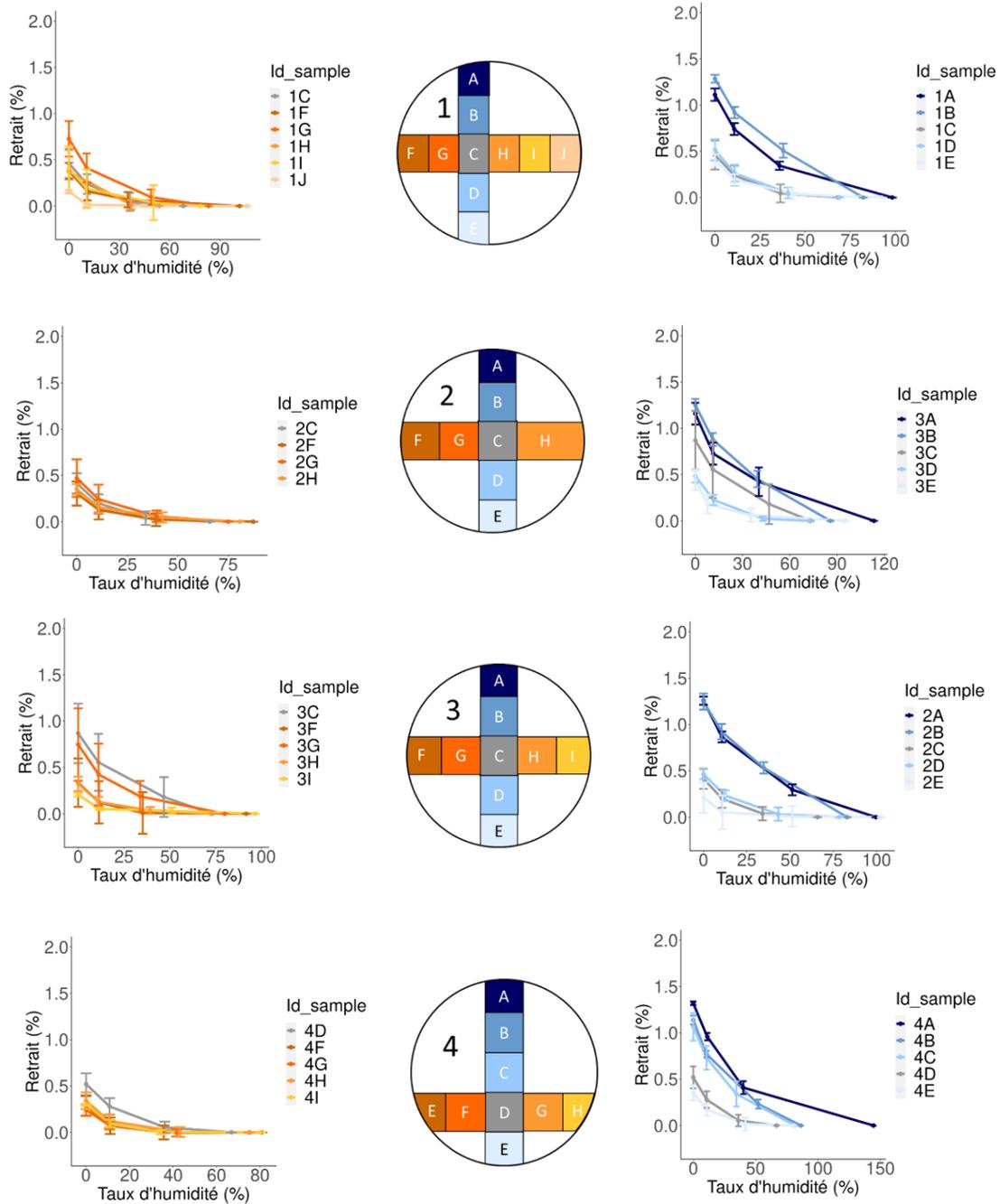


FIGURE B.3 – Retraits longitudinaux. En orange, les valeurs sont données suivant le diamètre horizontal. En bleu, les retraits suivant l'axe vertical. Partie 1/2.

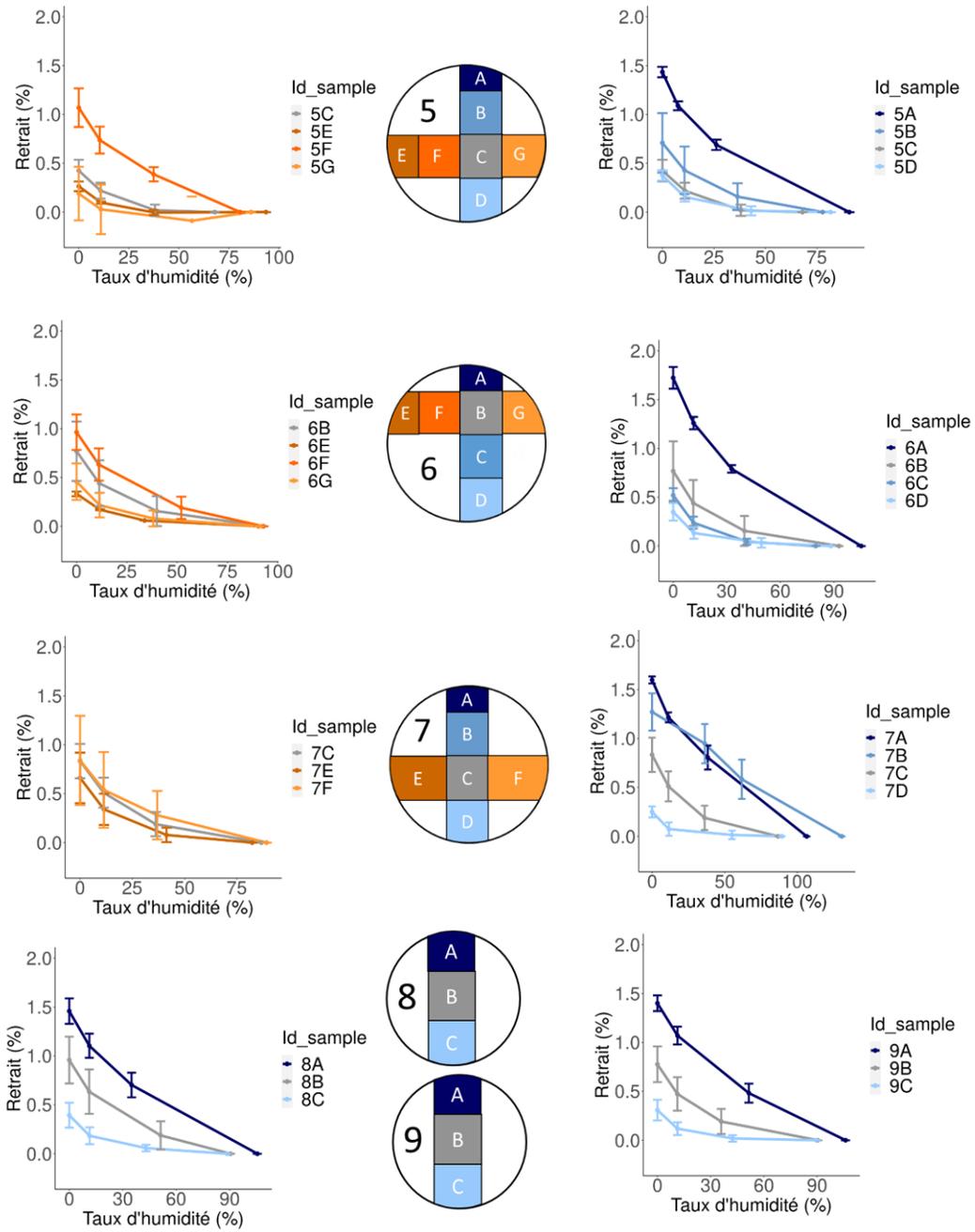


FIGURE B.4 – *Retraits longitudinaux. En orange, les valeurs sont données suivant le diamètre horizontal. En bleu, les retraits suivant l'axe vertical. Partie 2/2.*

Annexe C

Calcul des caractéristiques géométriques d'un cône avec défilement linéaire

Soit un tronçon de cône circulaire de longueur L . Soit L_0 la longueur totale de la pyramide dont il est issu. Soit L_g la distance entre la base du cône et la position du centre de masse, R_i le rayon à la base du cône, R_f celui à son extrémité. L'ensemble des paramètres est représenté dans la figure C.1. Soit $\xi = R_f/R_i$ le défilement et $\chi = L_g/L$ la fraction de la position du centre de masse sur la longueur totale. Dans cette annexe, la loi $\chi = f(\xi)$ est calculée.

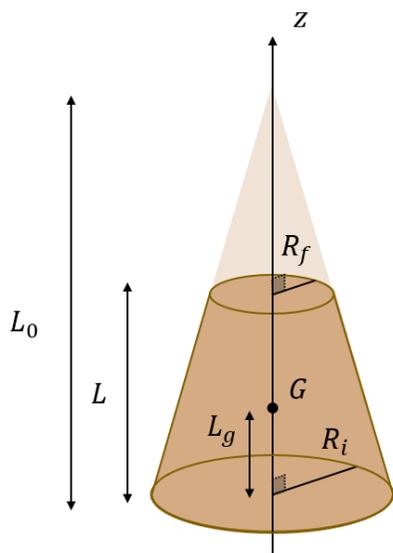


FIGURE C.1 – Schématisation d'un tronçon de cône circulaire, et des données du problème.

Dans un premier temps, le rayon du tronçon $r(z)$ à l'abscisse z est calculé en fonction des données du problème.

Soit les triangles formés par la hauteur, la génératrice et le rayon du cône, pour trois différentes hauteurs L_0 , L et z . Une première application du théorème de Thalès entre les triangles de hauteur L_0 et L donne :

$$\frac{L_0 - L}{R_f} = \frac{L_0}{R_i}$$

Soit encore

$$L_0 = \frac{L}{1 - \xi} \quad (\text{C.1})$$

Une deuxième application de ce théorème entre les triangles de hauteurs L_0 et z conduit à la relation :

$$\frac{L_0 - z}{r(z)} = \frac{L_0}{R_i}$$

Soit encore

$$r(z) = R_i \left(1 - \frac{z}{L_0}\right) \quad (\text{C.2})$$

Une combinaison des équations C.1 et C.2 donne alors l'expression de $r(z)$:

$$r(z) = R_i \left(1 - \frac{z(1-\xi)}{L}\right) \quad (\text{C.3})$$

Le calcul du volume du cône V est alors effectué :

$$\begin{aligned} V &= \int dV = \int_0^{2\pi} \int_0^{r(z)} \int_0^{l(z)} r(z) dr d\theta dz = \pi \int_0^L r^2(z) dz \\ &= \pi \frac{R_i^2}{L^2} \int_0^L L^2 - 2zL(1-\xi) + \frac{z^2}{L^2}(1-\xi)^2 dz \\ &= \pi \frac{R_i^2}{L^2} \left[L^3 - L^3(1-\xi) + \frac{1}{3}L^3(1-2\xi+\xi^2) \right] \end{aligned}$$

On en déduit :

$$V = \frac{\pi}{3} R_i^2 L (1 + \xi + \xi^2) \quad (\text{C.4})$$

Le calcul de la position du centre de masse donne alors :

$$\begin{aligned} L_g &= \frac{1}{V} \int z dV = \frac{\pi}{V} \int_0^L z r^2(z) dz \\ &= \frac{\pi}{V} \frac{R_i^2}{L^2} \int_0^L L^2 z + 2z^2 L(1-\xi) + z^3(1-\xi)^2 dz \\ &= \frac{\pi}{V} \frac{R_i^2}{L^2} \left[\frac{L^4}{2} - \frac{2L^4}{3}(1-\xi) + \frac{L^4}{4}(1-\xi)^2 \right] \\ &= \frac{\pi}{12} \frac{R_i^2 L^2}{V} [1 + 2\xi + 3\xi^2] \end{aligned}$$

Par combinaison avec C.4, on obtient :

$$L_g = \frac{L}{4} \left(\frac{1 + 2\xi + 3\xi^2}{1 + \xi + \xi^2} \right) \quad (\text{C.5})$$

Soit encore la loi :

$$\chi = f(\xi), \quad \text{avec} \quad f(\xi) = \frac{1}{4} \left(\frac{1 + 2\xi + 3\xi^2}{1 + \xi + \xi^2} \right) \quad (\text{C.6})$$

Annexe D

Caractériser le mouvement des branches au vent : expérimentations préliminaires

Le travail présenté s'est concentré sur le dimensionnement des branches en réponse à leur poids propre (mouvement de flexion verticale). Cependant, la branche est en permanence soumise à un environnement fluctuant, et le vent, aussi faible soit il, fait parti de leur quotidien. Dans cette partie, nous présentons deux capteurs conçus et développés pendant la thèse, et dont l'objectif est de caractériser les fluctuations des déformations subies par la branche dans son quotidien. Trois mouvements sont caractérisés : la flexion verticale, la flexion horizontale et la torsion. Pour chacun de ces trois modes, le principe de fonctionnement du capteur est le même : convertir les mouvements de la branche (en flexion ou torsion) en déformations de flexion d'un clinquant en acier équipé de jauges.

D.1 Présentation des capteurs

D.1.1 Capteur de flexion

Pour le capteur de flexion, nous nous sommes basés sur un modèle déjà exploité dans la littérature [Blackburn (1997); Moore et al. (2005); Bonnesoeur (2016)], en particulier sur le dernier modèle en date : celui présenté dans les travaux de Bonnesoeur (2016). Nous avons adapté ce modèle aux branches, en simplifiant la conception et en proposant une nouvelle démarche de dimensionnement. Le capteur tel que nous le proposons est composé d'un corps rigide et d'un clinquant flexible. Comme le clinquant doit montrer une faible rigidité de flexion, nous avons choisi d'utiliser des clinquants en acier de faible épaisseur. Le reste du capteur sera fait dans un polymère dont la rigidité est produite par son épaisseur et dont la composition est adaptée aux expositions longues durées en extérieur : le PolyOxyMéthylène (ou POM). Un schéma du capteur est représenté dans la figure D.1a. Lorsque la branche fléchit, elle provoque une elongation de fibres de bois périphériques entre 2 vis vissées dans

le bois (points A et B sur la figure D.1b). Cela entraîne la flexion du clinquant équipé de jauges. Cette situation est représentée dans la figure D.1b.

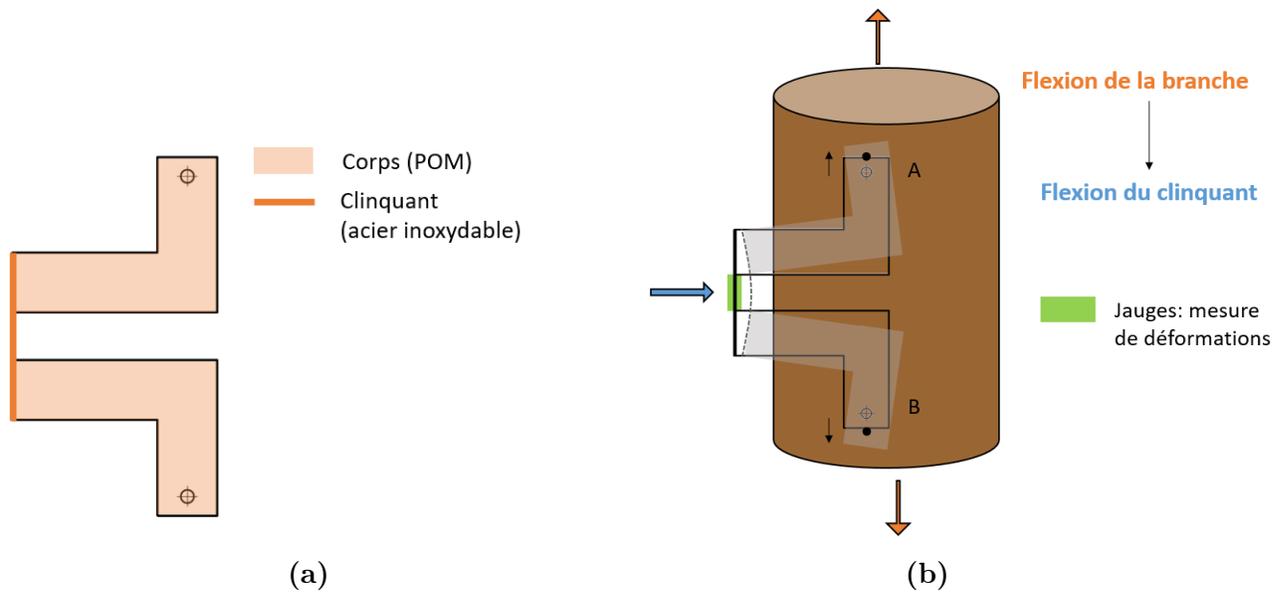


FIGURE D.1 – Capteur de flexion. a) Dessin de conception du capteur; b) principe de fonctionnement du capteur : la flexion de la branche dans l’axe entraîne une élongation des fibres de bois entre les vis (points A et B) vissées dans le bois, laquelle provoque la flexion du clinquant en acier équipé de jauges.

D.1.2 Capteur de torsion

Le capteur, imaginé et conçu pour l’expérimentation, est représenté dans la figure D.2a. Ce capteur est fixé en 2 points dans le bois via un corps rigide sur l’axe porteur, au niveau des points D et E (figure D.2b). Au point C, le clinquant est précontraint en flexion par une pointe fixée dans la branche. Ainsi tout mouvement de torsion de la branche entraîne un déplacement latéral du point C, mettant en flexion le clinquant.

D.2 Dimensionnement, conception et étalonnage

La forme des capteurs a été notamment choisie pour son adéquation avec le cadre analytique de la RDM. Ceci à permis de théoriquement obtenir la déformation au niveau des jauges en fonction des déplacements des points provoqués par les mouvements de la branche. Sur la base d’une étude RDM, les dimensions des capteurs ont été choisies, de sorte à satisfaire trois critères de dimensionnement : (i) une déformation maximale au niveau des jauges de 1500 μdef (critère de tenue en fatigue des jauges choisies pour leur longévité et leur tenue

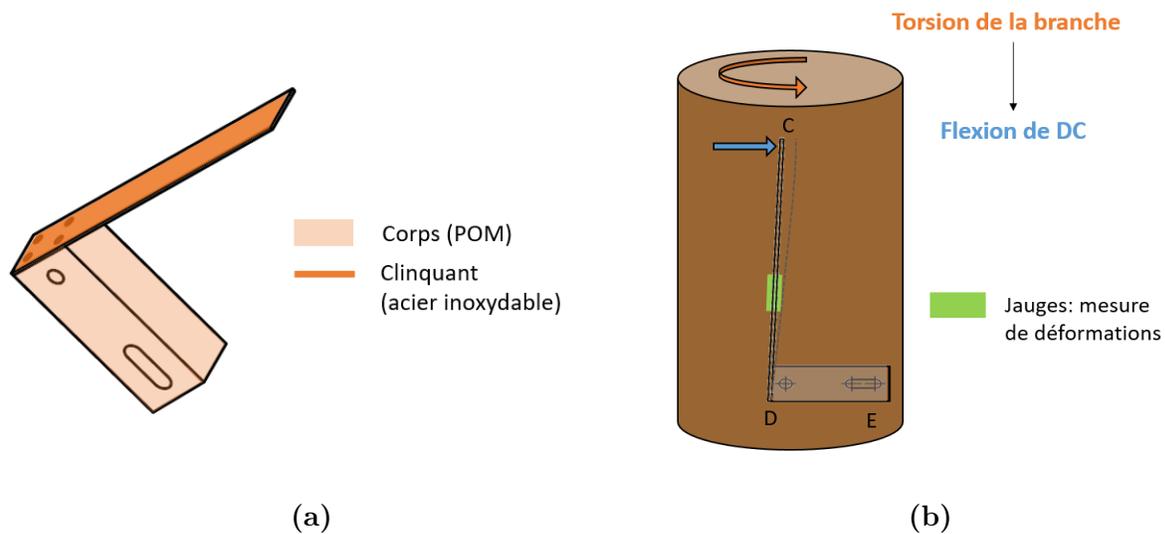


FIGURE D.2 – *Capteur de torsion. a) Dessin de conception du capteur; b) Principe de fonctionnement du capteur : la torsion de la branche entraîne un déplacement latéral du point C, lequel provoque la flexion du clinquant en acier équipé de jauges.*

en condition extérieures), (ii) pas d'endommagement de la liaison capteur/branche, (iii) pas de rigidification de la tige sur laquelle est fixé le capteur. Par soucis de concision, ce dimensionnement n'est pas présenté ici.

Les capteurs ont été usinés à l'aide de techniciens et ingénieurs du département de Génie Civil de l'Institut Pascal (UCA). Les pièces en POM ont été usinées par découpe jet d'eau (figure D.3a), puis les surfaces de contact ont été reprises à la fraiseuse (figure D.3b). Les clinquants ont été usinés à la découpe mécanique. Les jauges et leur pont ont été réalisés et collés sur les clinquants avant assemblage des capteurs (figures D.3c et D.3d). Les ponts sont des ponts complets, avec deux jauges actives et deux jauges passives de compensation. Un capteur complet avant étalonnage est présenté dans la figure D.3e. Au total, 8 capteurs de flexion et 8 capteurs de torsion (de différentes dimensions) ont été conçus, et sont illustrés dans la figure D.3f.

Dans un second temps, les capteurs ont été étalonnés. Le principe de notre étalonnage est le même pour chacun des capteurs. Il consiste à imposer un déplacement (dans une gamme que nous pensions initialement sensiblement similaire à celle imposée par les mouvements de la branche, nous verrons que ce n'est pas le cas) et de mesurer les déformations des jauges correspondantes. L'appareil de mesure des déformations est le « Vishay Measurements P-3500 Portable Strain Indicator ». Une photo de chacun des montages est proposée dans la figure D.4. On y distingue l'appareil de mesure de déformation, ainsi que chacun des dispositifs d'application du déplacement. Pour calibrer les mouvements de flexion, un banc de traction-compression a été utilisé. Le déplacement Δv est imposé et contrôlé au niveau

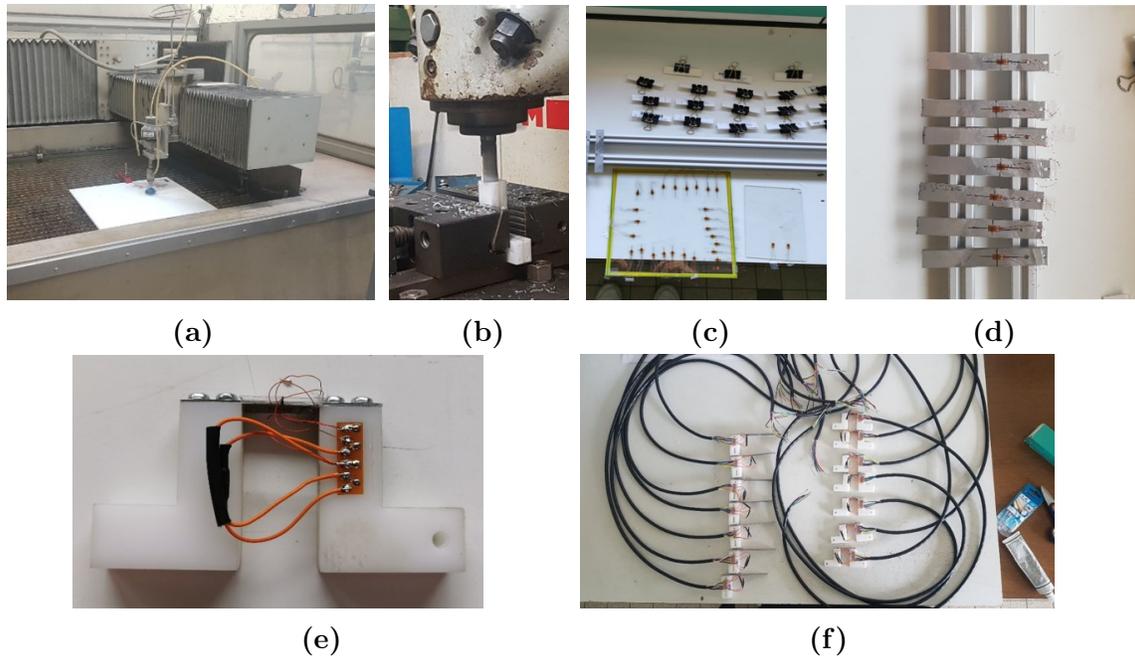


FIGURE D.3 – Différentes étapes dans la fabrication des capteurs de déformations. a) Découpe par jet d'eau des corps en POM; b) Reprise des surfaces à la fraiseuse, c) Préparation des jauges; d) Collage des jauges sur les clinquants; e) Capteur assemblé, sur lequel on distingue le pont de mesure et le clinquant équipé de jauges; f) Représentation de l'ensemble des capteurs avant étalonnage.

des trous A et B (représentés sur la figure D.1b).

Afin de mimer au mieux les déformations de la branche, nous pensions que les axes sur lesquels le mouvement est imposé devaient être libres dans leur trou. Nous avons donc choisi donc des tiges légèrement inférieures au diamètres des trous. De plus, pour minimiser le glissement des mors de la machine sur les axes, il peut être envisagé d'augmenter la surface de contact mors/axe. Nous avons alors rajouté des écrous aux extrémités de chaque axe. La figure D.4a propose quelques photos du montage.

Pour la calibration de la torsion, un montage expérimental spécifique au capteur a été développé : il est constitué d'une plaque de bois, sur laquelle des trous supports des différents capteurs ont été faits. Les déplacements sont imposés à l'aide d'une vis micrométrique, fixée dans un support imprimé en 3D, qui lui permet de glisser dans l'axe du clinquant, de sorte à pouvoir tester différents points de sollicitations cet axe. La figure D.4b montre quelques photos du montage.

Après avoir conçu les capteurs, des cartes numériques d'acquisition et d'envoi des données ont été réalisés. La conception des cartes a été réalisée par G. Godi (Institut Pascal). Elles sont composées d'un module analogique numérique (rouge sur la figure D.6) et d'un module WIFI d'envoi des données (bleu sur la figure D.6). L'ensemble des cartes a ensuite été soudé par nos soins. Enfin, les capteurs ont été installés sur une branche de noyer de août à décembre

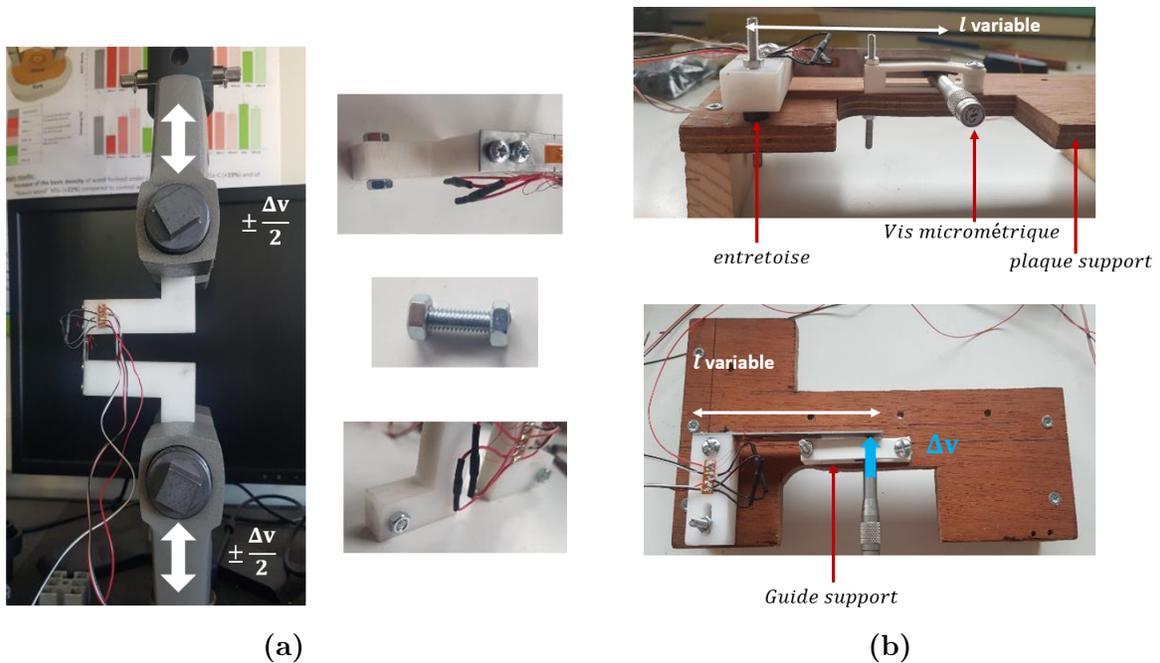


FIGURE D.4 – Banc d'étalonnage des deux types de capteurs : a) capteur de flexion : le banc est une machine de traction-compression. La jonction entre la machine et le capteur est assurée à l'aide d'une vis de diamètre légèrement plus petite que les trous du capteur (pour permettre les rotations); b) capteur de flexion, le banc est spécialement conçu pour ce capteur. Il est composé d'une vis micrométrique qui impose le déplacement, et qui peut glisser dans un guide, pour tester différents points d'appuis.



FIGURE D.5 – Représentation des capteurs positionnés sur la branche étudiée. Les capteurs sont disposés circonférentiellement sur deux sections de la branche.

2021. Deux sections de la branche d'environ 20 cm de diamètre et distantes d'environ 1.5m ont été instrumentées.

Les capteurs ont été disposés circonférentiellement, en alternant capteur de flexion/capteur de torsion, de sorte à ce que les capteurs du même type soient en regard l'un de l'autre. Quelques illustrations du dispositif sont proposées dans la figure D.5. La phase de fabrication, étalonnage et mise en place des capteurs a représenté un travail conséquent, et a été assisté par un stagiaire de l'IUT mesure physique de l'UCA, C. Meunier (stage de 3 mois).

D.3 Premiers résultats, limites et perspectives.

Durant les 5 mois de monitoring, les capteurs ont enregistré les déformations des branches à une fréquence $f = 20$ Hz. Cette fréquence a été choisie relativement élevée, de sorte à capter les pics de déformations provoquées par le vent [Bonnesoeur (2016)]. Mise à part quelques sauts de mesures, la majorité des capteurs a pu enregistrer les données sur cette durée sans perte de donnée. L'analyse qui suit concerne un seul capteur de flexion (positionné pour caractériser la flexion verticale), mais peut facilement être transposée à l'ensemble des capteurs de flexion. Le cas des capteurs de torsion sera discuté ultérieurement. Dans ce court exemple, nous allons nous intéresser aux données du mois d'octobre 2021. Une station météo située à proximité du noyer instrumenté nous a permis d'avoir la norme de la vitesse du vent V_{vent} dans le secteur. L'évolution de cette vitesse en fonction du temps est illustrée dans la figure D.7. Il faut noter cependant que ce noyer était, pour des raisons de facilité d'alimentation électrique et de transfert de données sans fil, situé à une vingtaine de mètres du bâtiment du laboratoire PIAF, lequel perturbe bien sur l' champ de vitesse du vent.

Les fichiers de données étant relativement importants, deux zones de deux jours ont été isolées ; l'une très peu ventée (en bleu sur la figure D.7, le 15-16 octobre 2021), et l'autre « très ventée » (relativement aux mesures sur le mois d'octobre, en rouge sur la figure D.7 : le 20 et 21 octobre 2021). Sur ces deux jeux de données, une analyse fréquentielle a été effectuée, dans l'objectif de déterminer la plage de fréquence dans laquelle sont contenus les mouvements de la branche étudiée.

L'évolution des déformations de la branche sur ces deux zones est donnée dans la figure D.8. Sur les deux signaux, des variations cyclique jour/nuit sont observées, qui correspondent sûrement au cycle hydrique de l'arbre. Sur le signal brut, les fluctuations du vent sont clairement visibles, surtout dans les hautes fréquences. Également, on mesure une forte valeur

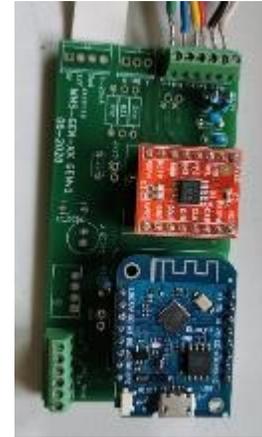


FIGURE D.6 – *Module électronique d'acquisition et de transmission des données associé aux capteurs.*

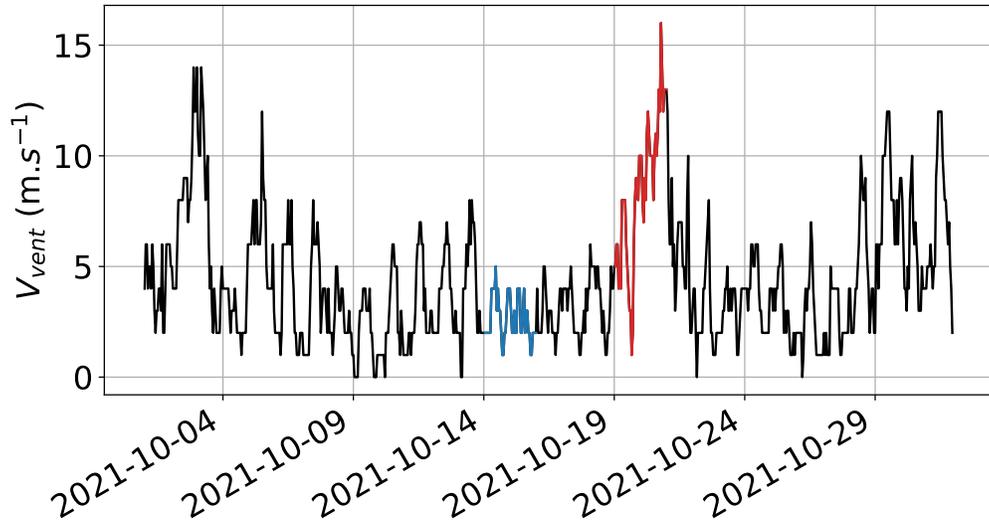


FIGURE D.7 – Évolution de la vitesse du vent dans le secteur d'expérimentation, sur le mois d'octobre 2021. Deux zones sont isolées, suivant le vent qui les caractérise : bleu représente un faible vent ; rouge représente un fort vent.

moyenne, due à une précontrainte un peu élevée du capteur lors de la mise en place sur la branche. Nous reparlerons de cette forte valeur ultérieurement.

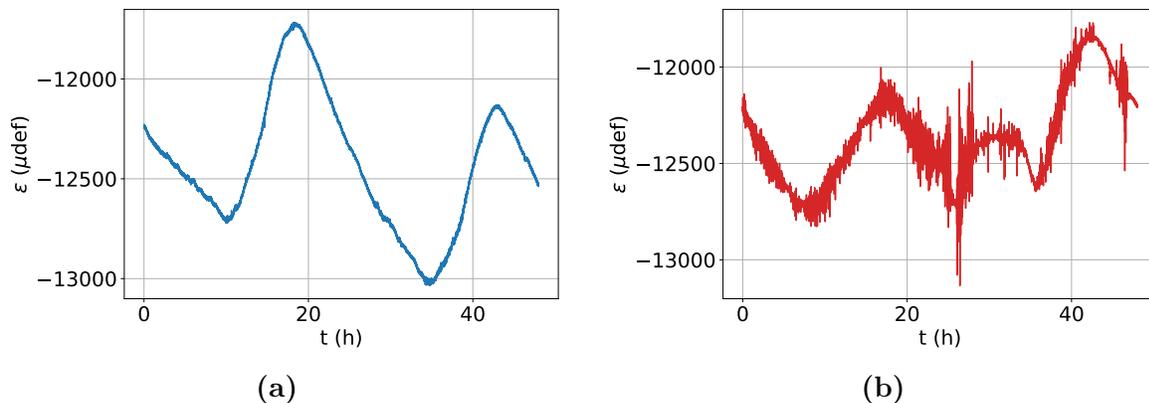


FIGURE D.8 – Évolution de la déformation des jauges en fonction du temps, pendant la période peu ventée (bleu) et la période ventée (rouge).

Avant toute analyse fréquentielle, un premier filtrage basse fréquence a été appliqué au signal (avec une période de coupure qui approche la semaine), pour s'affranchir de la valeur moyenne. Dans un second temps, le signal est filtré à une période de coupure $T_0 = 1$ heure. Deux signaux distincts sont alors récupérés. Le premier représente les variations jour/nuit. Le second représente les déformations engendrées (pour la plupart) par le vent. Dans chacune des situations, les deux signaux sont représentés (figure D.9) : les sous figures (a) et (c)

montrent le signal basse fréquence, (b) et (d) le signal haute fréquence.

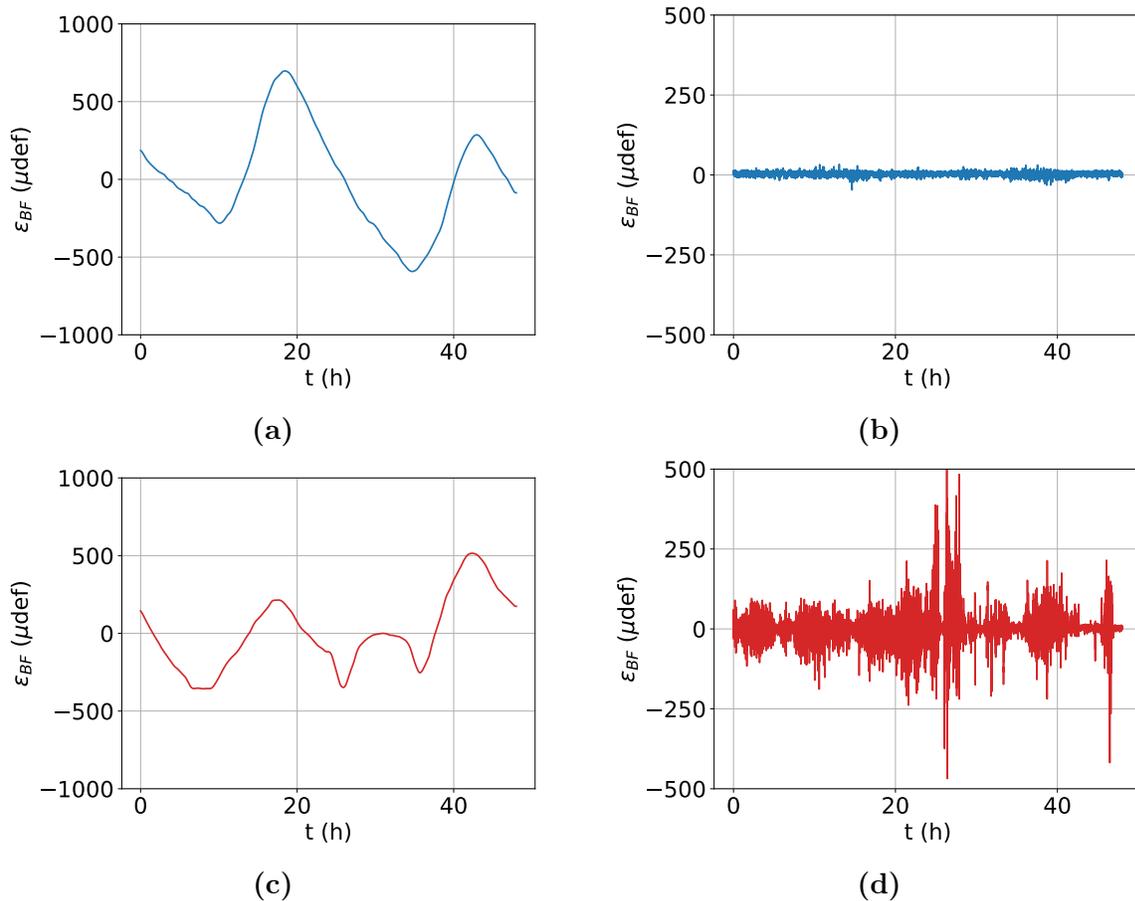


FIGURE D.9 – Évolution de la déformation des jauges en fonction du temps, pendant la période peu ventée (bleu) et la période ventée (rouge). (a) et (c) : signal BF ; (b) et (d) : signal HF.

Enfin, l'analyse fréquentielle est effectuée sur le signal haute fréquence. Les résultats sont présentés dans la figure D.10. Si le vent semble augmenter les amplitudes des signaux, le contenu fréquentiel reste relativement similaire dans les situations étudiées. Dans les deux cas, il semble y avoir une information fréquentielle importante entre 0.3 et 0.4 Hz, ainsi qu'une composante basse fréquence (0.01 Hz). Les mouvements autour de la fréquence caractéristique $f = 0,4$ Hz peuvent représenter un mode de mouvement proche de la fréquence propre de la branche. Le pic en basse fréquence pourrait traduire un balancement régulier de l'ordre de grandeur de la minute. Également, le contenu fréquentiel au dessus de $f \approx 1$ Hz semble négligeable. Ceci veut dire que les phénomènes qui ont un temps caractéristique inférieur à la seconde ne sont pas représentés dans l'échantillonnage. La procédure reste à réitérer pour d'autres échantillons, afin de confirmer ces conclusions. Si cette analyse se confirme, il suffirait d'échantillonner à 2Hz (en prenant une petite marge) pour avoir accès à l'ensemble des déformations de la branche. Ce résultat préliminaire est déjà important, car

il simplifie beaucoup les problématiques de gestion de fichiers très volumineux.

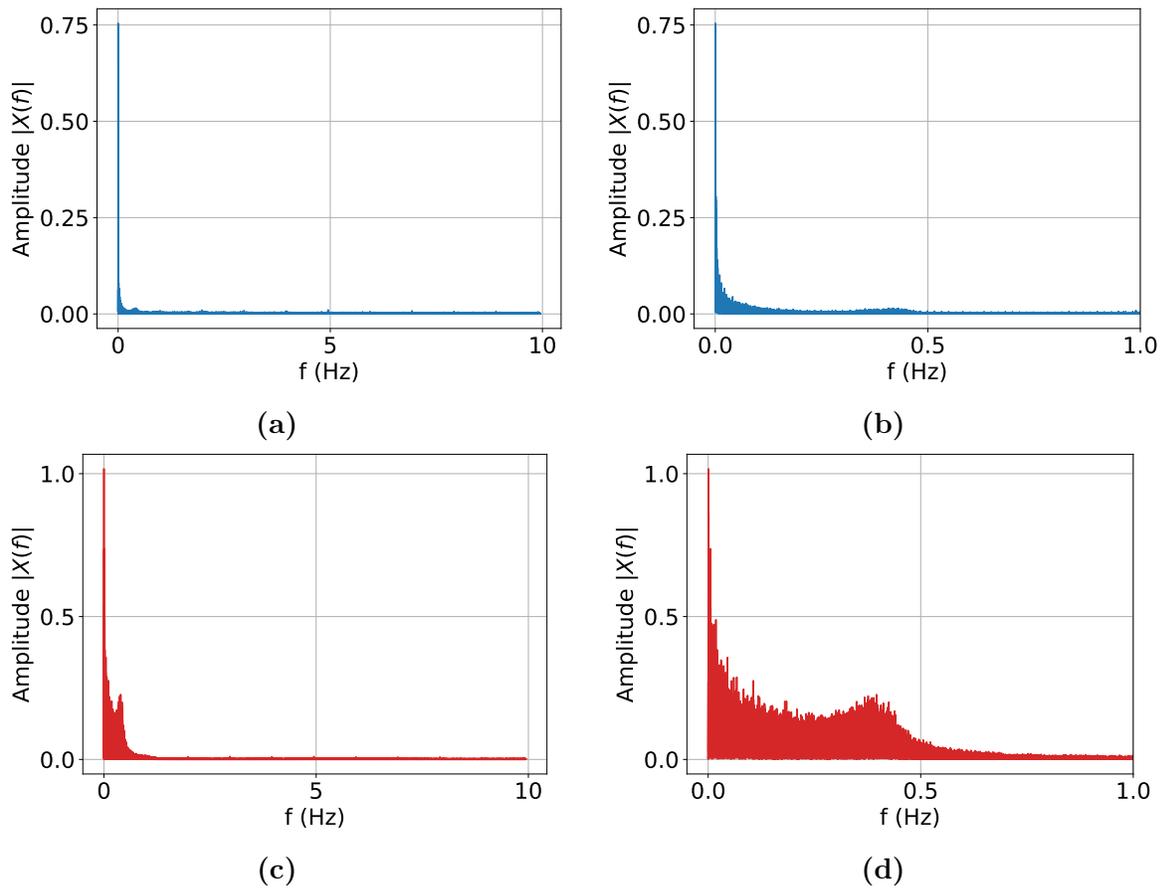


FIGURE D.10 – Analyse fréquentielle du signal, pendant la période peu ventée (bleu) et la période ventée (rouge). Deux pics sont identifiés : un en basse fréquence ($f= 0.01$ Hz) et un autour de $f=0.4$ Hz. Le deuxième pourrait représenter la fréquence propre de la branche. Les graphes (a) et (c) représentent l’analyse sur l’ensemble du spectre fréquentiel ; les graphes (b) et (d) sont un zoom sur la plage $[0,1]$ Hz.

Ce travail fréquentiel permet de sous échantillonner les données et de visualiser les déformations sur de plus grandes plages de temps. Les signaux sont dans un premier temps filtrés à l’aide d’un filtre passe haut de fréquence de coupure $f_c = 2$ Hz, puis, les variations cycliques sont découplées des autres variations par un filtre avec une fréquence de coupure $f = 1/3600$ Hz ($T=1h$). Cette procédure est appliquée sur les données du mois d’octobre 2021, qui sont représentées dans la figure D.11. La sous figure (a) représente les variations journalières, la (b) les variations hautes fréquences. Les périodes ventées sont clairement identifiables, et à mettre en relation avec la figure D.7.

Ces résultats prometteurs ouvrent des perspectives d’analyse intéressantes comme par exemple travailler sur les occurrences de déformations enregistrés notamment, et les mettre en relation avec la croissance secondaire de la tige (identifiable en regardant les variations BF sur

les 5 mois) afin d'étudier les relations entre stimulation mécanique et croissance secondaire (thigmomorphogénèse). Cependant, d'importantes limites sont encore présentes. La forte valeur moyenne est bien plus élevée que la gamme des valeurs testés lors de l'étalonnage. Cela s'explique par le fait que lors de la mise en place des capteurs, nous avons du visser ces derniers totalement pour ne pas qu'ils tombent. Les conditions d'étalonnage (avec une rotation libre au niveau des vis) ne sont alors plus valable. Ainsi, si l'information fréquentielle des données est réaliste, la valeur nominale des déformation est ici questionnable. Un nouvel échantillonnage in-situ a été tenté et est en cours d'analyse. Également, les données issues des capteurs de torsion sont difficiles à analyser, notamment à cause d'un phénomène de couplage torsion/flexion : lorsque l'axe fléchit, la distance entre le vis C et D est modifiée, ce qui modifie l'angle CDE, provoquant ainsi une flexion du clinquant du capteur de torsion. Il y a donc tout un travail de traitement de découplage des modes de sollicitations, qui n'a pas ici été réalisé.

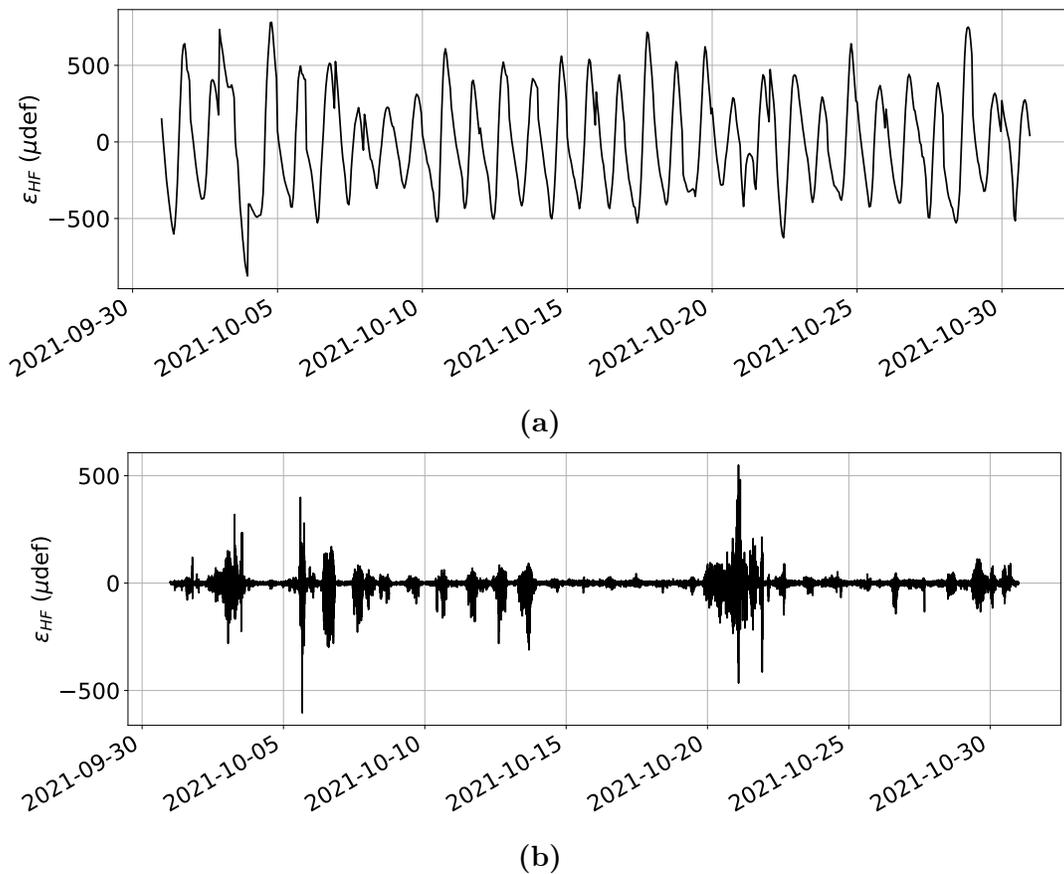


FIGURE D.11 – Données de déformations sur le mois d'octobre 2021, filtrées en basse fréquence avec une fréquence de coupure $f_c = 2$ Hz. Découpage du signal autour de la fréquence de coupure $f = 1/3600$ HZ ($T=1h$) : (a) sollicitations BF, correspondant aux variations journalières de la tige (cycle jour/nuit lié au phénomène d'évapotranspiration) ; b) variations HF, correspondantes aux sollicitations du vent (en adéquation avec la figure D.7).

D.4 Conclusion

Cette phase exploratoire de travail sur les modes de mouvements des branches est prometteuse, bien que beaucoup de travail reste encore à accomplir. Une avancée sur l'information fréquentielle du signal a été faite, et suggère qu'enregistrer à une fréquence $f = 2$ Hz pourrait être suffisant pour récupérer l'essentiel du contenu fréquentiel. Cela permettra d'enregistrer sur des plus longues durées et simplifiera l'analyse. Cependant, un gros travail d'étalonnage *in situ* est à effectuer pour caractériser la flexion, et un travail de traitement est aussi nécessaire afin de découplage des modes (flexion / torsion) et caractériser la torsion. Nous avons ici réalisé à quel point ce monitoring était une opération extrêmement complexe, liant des problèmes de durabilité du matériel en extérieur, d'enregistrement et de transfert de données à haute fréquence, d'installation et de tenue des capteurs sur un organe en croissance, etc. Dans le futur, il pourrait être plus simple d'essayer de s'affranchir de ce type de capteurs et d'instrumenter la branche avec des accéléromètres, qui permettraient d'avoir accès à la position dans l'espace de différents points de la branche.