



HAL
open science

**Modélisation multi-échelles du comportement
hygro-mécanique et étude de la stabilité dimensionnelle
de structures composites lamellées collées aboutées en
Pinus pinaster (Ait.)**

Romain Chevalier

► **To cite this version:**

Romain Chevalier. Modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique et étude de la stabilité dimensionnelle de structures composites lamellées collées aboutées en Pinus pinaster (Ait.). Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2024. Français. NNT : 2024BORD0057 . tel-04695839

HAL Id: tel-04695839

<https://theses.hal.science/tel-04695839v1>

Submitted on 12 Sep 2024

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 PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SPI - Sciences Physiques et de l'Ingénieur
SPÉCIALITE MÉCANIQUE

Par Romain CHEVALIER

**Modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique
et étude de la stabilité dimensionnelle de structures composites
lamellées collées aboutées en Pinus pinaster (Ait.)**

Sous la direction de : Anita CATAPANO
Co-directeur : Régis POMMIER

Soutenue le : 09/04/2024

Membres du Jury :

Mme. CATAPANO, Anita - Professeur des Universités - ENSEIRB - MATMECA, Bordeaux INP
Mr. POMMIER, Régis - Chargé de Recherche - Université de Bordeaux
Mr. DUBOIS, Frédéric - Professeur des Universités - Université de Limoges
Mr. CASTANIE, Bruno - Professeur des Universités - INSA Toulouse
Mr. GUILLAUMAT, Laurent - Professeur des Universités - ENSAM Angers
Mr. MONTEMURRO, Marco - Professeur des Universités - ENSAM Bordeaux

Directrice de Thèse
Co-directeur de Thèse
Rapporteur
Rapporteur
Président du Jury
Examineur

Membre Invité :

Mr. CASTETS, Laurent - Responsable R&D - Gascogne Bois

Invité

Remerciements

Ce manuscrit marque la fin de cette aventure que représente une thèse de doctorat. Ce parcours, jalonné de défis et de moments de doute, n'aurait pas été possible sans le soutien inestimable de nombreuses personnes que je tiens à remercier ici.

Je tiens, avant toute chose, à exprimer mon immense respect et reconnaissance envers ma directrice de thèse, Mme. Anita CATAPANO, pour son accompagnement tout au long de mon stage de recherche et de la thèse. Ces qualités extraordinaires tant sur le plan personnel que professionnel représentent le meilleur exemple de chercheur que j'ai pu observer. J'adresse également mes plus sincères remerciements à mon co-directeur de thèse, M. Régis POMMIER, dont la gentillesse et la passion pour le domaine du bois resteront inégalables. Je souhaite, au même titre, exprimer ma gratitude pour mon encadrant de thèse I2M, M. Marco MONTEMURRO, dont la rigueur et l'aura scientifique laissent une impression durable sur tous ceux qu'il rencontre. J'apporte mes remerciements à mon encadrant Gascogne Bois, M. Laurent CASTETS, pour ses conseils avisés et sa jovialité.

Je voudrais remercier chaleureusement toutes les équipes de l'entreprise Gascogne Bois pour leur confiance et leur soutien technique et financier. Un merci tout particulier à Yannick pour son aide précieuse. Mes remerciements vont également à M. Laurent GUILLAUMAT pour avoir accepté de présider mon jury de thèse, ainsi qu'à M. Bruno CASTANIE et M. Frédérick DUBOIS pour leurs évaluations constructives de mon manuscrit.

Je dédie cette section aux remerciements de mes collègues et amis, dont le soutien a été crucial pour la réussite de cette thèse. Merci à tous mes amis du laboratoire I2M (Bruno, Chloé, Mathilde, Henri, Sonia, Carlos, Thomas, Alexandre, Horly, Pierre, Julie, Vincent, Luc, Morgane, Maxime, Simon) pour les discussions scientifiques et les moments de convivialité. À mes amis proches et de longue date, en particulier Maxence, Quentin, Marion, Eva, David, Léo, Sami, Elliot, je vous remercie pour votre amitié et votre soutien indéfectible. Je tiens également à remercier tous mes amis du groupe E200, notamment Camille, Salomé, Mathilde, Ewann, Charlie, Jean, Marthe, Rémy et Pierre, pour leur joie de vivre et leur camaraderie.

Un remerciement particulier à la pandémie de COVID-19, qui, malgré ses défis, m'a offert une année supplémentaire pour peaufiner ce travail et m'a forcé à approfondir mes recherches bibliographiques.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille pour leur soutien tout au long de ce parcours. À mon grand-père, ma mère et mon père, merci de m'avoir transmis le goût du bois et de la science et de m'avoir encouragé à mener cette aventure à son terme.

Deux pierres, un coup.

Émile Chevalier

Table des matières

Introduction	1
1 Le Pinus pinaster (Ait.)	5
1.1 Informations générales sur les populations de <i>Pinus pinaster</i> (Ait.)	5
1.1.1 Taxonomie	5
1.1.2 Historique de l'essence	6
1.1.3 Population actuelle de <i>Pinus pinaster</i> (Ait.)	7
1.2 Xylogologie	8
1.2.1 Variabilité et structure du bois	8
1.2.2 Anatomie du <i>Pinus pinaster</i> (Ait.)	9
1.2.3 Mécanismes d'influence de la croissance du bois	13
1.2.4 Propriétés physiologiques	14
1.3 Propriétés géométriques	17
1.3.1 Hauteur et diamètre	17
1.3.2 Cernes d'accroissement et largeur de cernes	17
1.3.3 Angle de fil	20
1.3.4 Angle conique	20
1.4 Propriétés physiques : Densité	20
1.4.1 Densité intra-cerne	23
1.4.2 Densité inter-cernes	25
1.5 Propriétés hygriques du <i>Pinus pinaster</i> (Ait.)	26
1.5.1 Modèle de transfert d'humidité et propriétés hygriques	26
1.6 Propriétés mécaniques du <i>Pinus pinaster</i> (Ait.)	32
1.6.1 Propriétés élastiques	32
1.6.2 Propriétés de résistance	37
1.7 Conclusions	40
2 Modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique de lamelles en Pinus pinaster (Ait.)	43
2.1 Définition des échelles de modélisation	44
2.2 Génération de grumes « synthétiques » de <i>Pinus pinaster</i> (Ait.)	45
2.2.1 Hypothèses à la base de la modélisation de grumes de bois	45
2.3 Modélisation à l'échelle microscopique - Propriétés physiques et géométriques des cernes	46
2.3.1 Description de la variabilité intra-arbre	46
2.3.2 Largeurs de cernes d'accroissement	47
2.3.3 Âge des grumes modélisées	47
2.3.4 Proportion de bois final	48
2.3.5 Densités moyennes de bois initial et de bois final	48

2.3.6	Propriétés élastiques à l'échelle microscopique	49
2.3.7	Propriétés hygriques à l'échelle microscopique	51
2.4	Détermination des propriétés hygro-élastiques à l'échelle mésoscopique	53
2.4.1	Description de la géométrie du VER	55
2.4.2	Modèle éléments finis	56
2.4.3	Méthode d'homogénéisation numérique	58
2.5	Résultats numériques tenant compte de la variabilité	61
2.5.1	Méthode de Monte Carlo	61
2.5.2	Analyse de convergence	61
2.5.3	Résultats numériques des propriétés élastiques	62
2.5.4	Résultats numériques des propriétés d'hygro-expansion	67
2.5.5	Estimation de la variabilité des propriétés d'hygro-expansion	67
2.6	Détermination des propriétés hygro-élastiques à l'échelle macroscopique locale	70
2.6.1	Formalisme mathématique des NURBS	71
2.6.2	Modélisation de la grume via des fonctions « Non-uniform rational basis-spline » (NURBS)	72
2.6.3	Propriétés des lamelles à l'échelle macroscopique locale	73
2.7	Conclusions	75
3	Conception de lamellés collés aboutés en Pinus pinaster (Ait.)	79
3.1	Séquences d'empilement Quasi-Triviaux	81
3.2	Présentation des configurations de lamellés collés aboutés choisies	82
3.3	Conception des empilements expérimentaux	86
3.4	Procédé expérimental de la mesure de stabilité dimensionnelle	89
3.4.1	Fabrication des LCAs et présentation de l'expérience	89
3.4.2	Matériel, logiciels et installation expérimentale	91
3.4.3	Mesure expérimentale des déplacements	94
3.4.4	Évaluation de la stabilité dimensionnelle	99
3.5	Conclusions	103
4	Résultats et comparaisons des mesures de stabilité dimensionnelle	105
4.1	Présentation des empilements de l'intégralité des LCAs	105
4.2	Présentation de la stratégie de comparaisons des groupes de LCAs	105
4.3	Comparaison du groupe GA avec le groupe GT	108
4.4	Résultats de la comparaison du groupe GE3 avec le groupe GA	110
4.5	Résultats de la comparaison du groupe GE5 avec le groupe GA	118
4.6	Comparaison de l'empilement GE5-4 avec les LCAs du groupe GT	135
4.7	Conclusions sur la stabilité dimensionnelle des LCAs	142
	Conclusion générale et perspectives	149
A	Annexe - Présentation des essais d'analyses modale et harmonique expérimentales de plaques minces de Pinus pinaster (Ait.)	155

Acronymes

BC	Bois de Compression
BN	Bois Normal
CIN	Corrélation d'Images Numériques
CLP	Conditions Limites Périodiques
CP	Control Points
D	Dosse
DBH	Diameter Breast Height
EF	Éléments Finis
EMC	Equilibrium Moisture Content
FD	Fausse-Dosse
FQ	Faux-Quartier
FW	Final Wood
FWP	Final Wood Proportion
GA	Groupe Aboutage
GB	Gascogne Bois
GE3	Groupe d'Empilements 3 plis
GE5	Groupe d'Empilements 5 plis
GS	Groupes saturés
GT	Groupe Tampon
IADF	Inter-Annual Density Fluctuation
IF	Infra-Densité
IW	Initial Wood
LCA	Lamellé Collé Abouté
MC	Moisture Content
MFA	Micro-Fibril Angle
MOR	Modulus of Rupture
NURBS	Non Uniform Rational Basis B-Splines
PSF	Point de Saturation des Fibres
Q	Quartier
QT	Quasi-Triviaux
R-V	Reuss-Voigt
RW	Ring Width
TP	Target Points
UNV	Universal File Format
VER	Volume Equivalent Représentatif

Introduction

Depuis les années 1950, les matériaux composites rencontrent une forte augmentation de leurs utilisations dans de multiples domaines industriels [1] tels que l'aéronautique et l'aérospatiale [2], l'industrie navale [3], l'automobile [4], le nucléaire [5], les énergies renouvelables (spécialement éolienne [6] et solaire [7]), l'ingénierie biomédicale [8] et le domaine du génie civil [9]. Dans le secteur de la construction, un intérêt croissant est porté au développement de bio-composites [10] ainsi qu'à la revivification de techniques de construction à partir de matériaux naturels (terre crue, pierre, brique) et en particulier le bois [11] pour ses bénéfices dans la course à l'atténuation des effets du changement climatique [12]. En effet, le bois est un matériau composite, naturel et renouvelable qui est fortement recommandé par le rapport spécial du GIEC « Global Warming of 1.5° C » [13] comme solution pour remplacer les matériaux traditionnels (béton, acier) [14] et réduire la consommation globale d'énergie du secteur. De plus, le sixième rapport d'évaluation du GIEC « Mitigation of Climate Change » [15] appuie sur l'amélioration de l'usage des produits en bois pour diminuer les émissions nettes de gaz à effet de serre et diminuer l'empreinte carbone du secteur de la construction par l'utilisation notamment de bois brut, de bois lamellé croisé ou de bois lamellé collé abouté (LCA). Les LCAs sont des structures composites fabriquées à partir du collage et de l'aboutage de multiples lamelles de bois qui permettent une flexibilité de dimensions et de formes importante. Le procédé de fabrication est développé dès le XII^{ème} au Japon puis s'est élargi au domaine de la construction au XVI^{ème} en France avec l'ajout de renforts métalliques avant d'être définitivement conceptualisé sous la forme contemporaine des LCAs au début du XX^{ème} en Allemagne [16]. Le procédé de fabrication général des LCAs est présenté schématiquement en Fig. 1.

La région Nouvelle-Aquitaine située dans le Sud-Ouest de la France représente 17% de la forêt nationale avec 3 millions d'hectares de forêt, selon les données de l'ONF¹, et représente la plus grande étendue de forêt en France métropolitaine. De par sa grande disparité d'essences et de peuplements, la région représente un acteur majeur de l'industrie de la menuiserie et construction en bois et spécifiquement de la production de LCAs. En effet, le total du volume de sciages de la région représente 23.2% du volume français (1 925.8 milliers de m³) et 25.4% de l'ensemble de sciages des conifères dont approximativement 29% est concentré dans la région des Landes sur le sciage de l'essence de Pin maritime [17]. De fait, l'industrie du bois du Sud-Ouest de la France est particulièrement reliée à cette essence de résineux endémique du Sud-Ouest de l'Europe, le Pin maritime - *Pinus pinaster* (Ait.), en raison de sa vaste présence dans toute la région (entre 75% et 84% de la superficie forestière totale dans deux départements - la Gironde et les Landes [18]).

Dans le département des Landes, l'entreprise Gascogne Bois (GB)² est une entreprise spécialisée dans la gestion durable et l'exploitation des forêts des Landes de Gascogne, l'extraction de composés chimiques et la transformation du bois destiné aux industries papetière et de la menuiserie. L'entreprise propose des produits de menuiseries comme des fenêtres bois-aluminium fabriquées à partir de carrelats de menuiseries et réalisés en LCAs. Dans un contexte d'innovation et d'amélioration de gammes de qualité, l'entreprise GB désire dorénavant produire des fenêtres dont le cadre est constitué exclusivement en *Pinus pinaster* (Ait.).

Toutefois, plusieurs problématiques rentrent en considération avant de concrétiser ce projet. En effet, le bois est un matériau hygroscopique qui se met en équilibre thermo-hygrique avec son

1. <https://www.onf.fr>

2. <https://www.gascognebois.com>

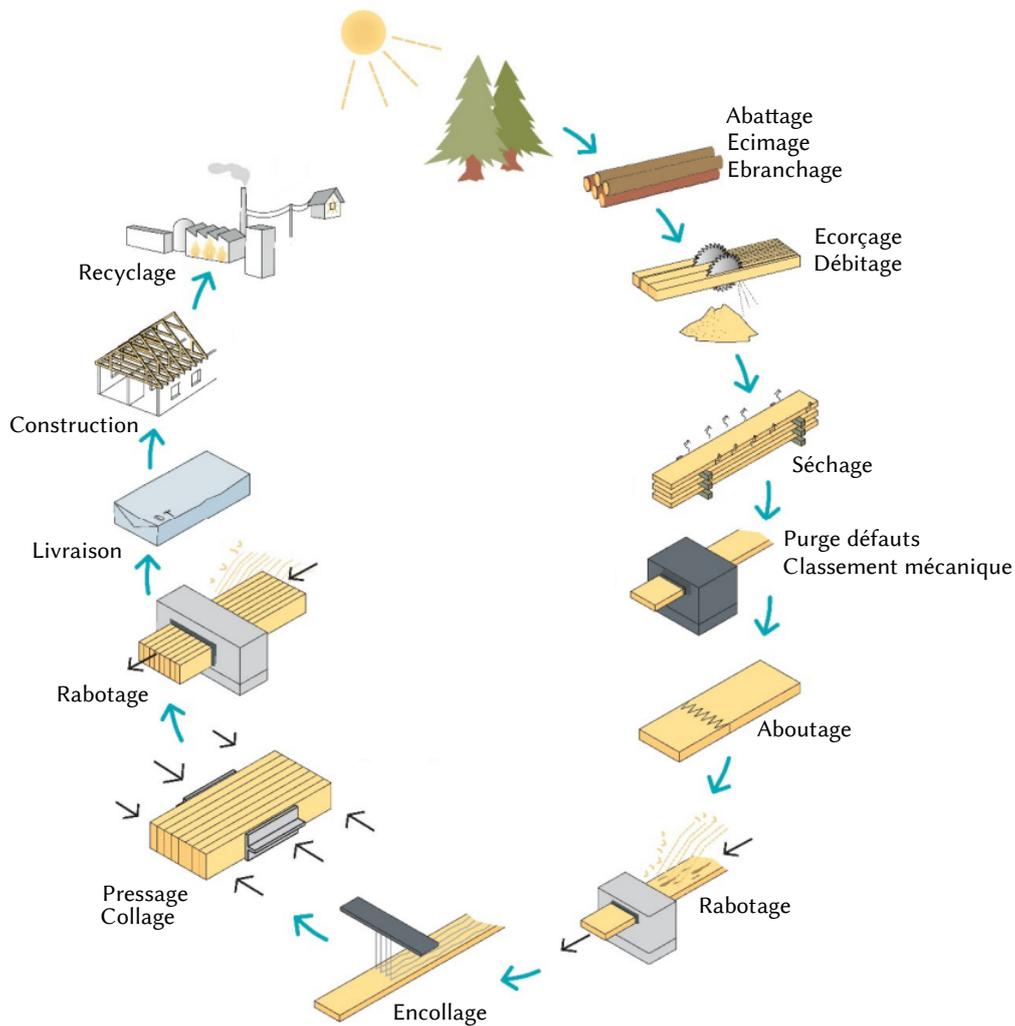


FIGURE 1 – Représentation schématique du procédé de fabrication de LCAs (adaptée de Manuel du Bois Lamellé [16]).

milieu extérieur. Ainsi, des modifications de l'ambiance climatique (température et humidité relative) peuvent entraîner des déformations des produits en bois et notamment des LCAs. De plus, le bois est un composite hétérogène et anisotrope défini à plusieurs échelles dont les propriétés varient fortement inter-arbres et intra-arbre. Cette disparité résulte dans la production de lamelles de bois de propriétés fortement hétérogène qui impactent le comportement des LCAs résultants. En outre, le comportement hygro-mécanique du bois est également dépendant de l'essence concernée. Ormarsson et Cown [19] ont montré des différences de comportement entre des lamelles de bois prélevées aux mêmes positions relatives de grumes entre deux essences de résineux : *Picea abies* et *Pinus radiata*. Au niveau européen, le marché de la fenêtre bois et des LCAs est contrôlé principalement par la concurrence issue d'autres pays d'Europe de l'Ouest et du Nord (Allemagne, Autriche, Suède, Finlande, Danemark et Norvège) qui reposent sur deux essences différentes (l'Épicéa commun - *Picea abies* et le Pin sylvestre - *Pinus sylvestris*) dont le comportement hygro-mécanique des produits bois est bien plus étudié et maîtrisé [20, 21, 22, 23, 24]. Contrairement aux essences précédentes, l'instabilité dimensionnelle des LCAs en *Pinus pinaster* (*Ait.*) semble plus importante lors de l'entreposage et la durée de vie des LCAs où ils sont soumis à des conditions climatiques variables.

L'objectif global de cette thèse, qui s'inscrit dans le cadre du projet K-Frame porté par le groupe GB et la Chaire E2WP (Eco Engineering Wood Products) de l'Université de Bordeaux, est de contribuer à l'étude et à l'amélioration de la stabilité dimensionnelle des carrelots de menuiseries en LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) en post-production soumis à des déformations hygro-mécaniques. Cette thèse CIFRE regroupe deux partenaires : l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) - UMR CNRS 5295 et l'entreprise GB.

Plusieurs études se sont concentrées sur les déformations d'assemblages de lamelles de bois. Ormarsson *et al.* [25], Eriksson *et al.* [26] et Eriksson *et al.* [27] ont observé numériquement et expérimentalement l'influence de la typologie des avivés et de leur position dans les grumes sur leurs déformations et une amélioration de la stabilité dimensionnelle pour des assemblages collés de plusieurs produits en bois. Nguyen [28] a réalisé des simulations numériques de variations dimensionnelles de plusieurs configurations de bilames en *Apies alba* grâce à un modèle hygro-viscoélastique. Dans le cas du *Pinus pinaster* (Ait.), Clouet [29] a étudié l'influence de plusieurs séquences d'empilements sur le comportement hygro-mécanique de LCAs aboutés à l'état vert lors du séchage.

Plusieurs problèmes surviennent lors de la prédiction et de l'optimisation de la stabilité dimensionnelle de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) soumis à des variations climatiques. Premièrement, le manque ou la disparité des informations dans la littérature scientifique concernant les propriétés physiques, hygriques et mécaniques de l'essence *Pinus pinaster* (Ait.) empêchent d'obtenir des résultats précis et obligent une grande majorité des études scientifiques à se rabattre sur les propriétés classiques des essences de résineux, notamment aux modèles de propriétés élastiques générales de Guitard [30], tout en négligeant la variabilité des propriétés inter-arbres et intra-arbre.

Deuxièmement, la modélisation de la stabilité dimensionnelle de LCAs nécessite une connaissance précise du comportement hygro-mécanique des lamelles en fonction de leurs typologies (dosse, quartier, etc.) et donc de leur position relative dans les grumes. Le bois est un composite naturel formé par l'accumulation de cernes d'accroissement générés par l'action du cambium dont l'activité est influencée par différents paramètres (conditions climatiques, génétique, sylviculture, etc.). Ainsi, les lamelles de bois sont constituées de l'alternance de plusieurs cernes de propriétés hétérogènes et variables (inter-cernes et intra-cerne). Une modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique est ainsi nécessaire pour obtenir des résultats précis sur le comportement des lamelles de bois et par conséquent celui des LCAs.

Finalement, la conception de LCAs qui permet d'assurer leur stabilité dimensionnelle reste un verrou scientifique majeur dans le domaine du bois qui nécessite l'étude de l'influence des paramètres de conception, c'est-à-dire l'aboutage, la disparité et la variabilité des comportements des lamelles et les séquences d'empilement des LCAs.

Ce travail de thèse se concentre sur la résolution des problématiques évoquées ci-dessus afin de proposer une première contribution au développement d'une méthodologie générale de conception destinée à l'amélioration de la stabilité dimensionnelle de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) soumis à des variations climatiques. Dans cette optique, le travail de thèse est organisée afin de répondre aux objectifs partiels suivants.

Le premier objectif partiel de la thèse consiste à regrouper et classifier les propriétés de l'essence de *Pinus pinaster* (Ait.) correspondant à la provenance des Landes de Gascogne à partir d'une littérature scientifique cohérente avec la problématique générale de la thèse. Le deuxième objectif partiel de la thèse comprend la modélisation multi-échelles du comportement des LCAs à partir des propriétés du *Pinus pinaster* (Ait.) en prenant en considération la variabilité, l'hétérogénéité et l'anisotropie du bois. Enfin, le dernier objectif partiel consiste à réaliser une conception des LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) pour améliorer leur stabilité dimensionnelle aux variations climatiques en proposant des nouvelles configurations de produits LCAs en travaillant sur les paramètres

de conception, et notamment les séquences d'empilement, et de comparer les résultats à ceux de l'entreprise GB pour des LCAs « classiques ».

Le plan de la thèse est fourni ci-dessous. Le Chapitre 1 présente un état de l'art sur la structure et les propriétés physiques, hygriques et mécaniques du *Pinus pinaster* (Ait.) pour rassembler les connaissances nécessaires à l'obtention de résultats précis et adaptés à cette essence. Le Chapitre 2 est consacré à la modélisation numérique multi-échelles du comportement hygro-mécanique de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) de l'échelle intra-cerne à celle des lamelles constitutantes. Dans le Chapitre 3, des configurations de LCAs sont soumises à des conditions thermo-hygriques variables pour estimer leur stabilité dimensionnelle aux variations climatiques. La conception de ces configurations repose sur des travaux sur les séquences d'empilement de stratifiées hétérogènes et anisotropes [31, 32, 33]. Les méthodes présentées dans ces études permettent de proposer des séquences d'empilement théoriques reposant sur des hypothèses simplificatrices qui seront testées expérimentalement pour tester leur validité sur un matériau composite 3D naturel, hétérogène et anisotrope mais également variable comme le bois. Un processus de mesures expérimentales qui permet la mesure des déplacements et ainsi de la stabilité dimensionnelle de LCAs est également présenté. Le procédé repose sur l'utilisation de méthodes de stéréo-corrélations d'images numériques. Dans le Chapitre 4, les résultats des mesures de déplacements et donc de stabilité dimensionnelle sont présentés. Les résultats sont présentés et comparés entre groupes de LCAs de même configuration pour permettre d'étudier l'influence des différents paramètres de conception sur les déplacements des LCAs. Enfin, cette thèse s'achève par quelques conclusions générales et les perspectives de ce travail.

Le *Pinus pinaster* (Ait.)

Le premier chapitre de ce manuscrit consiste en une étude bibliographique concentrée sur l'essence de *Pinus pinaster* (Ait.). L'objectif est de regrouper et classer les informations sur le *Pinus pinaster* (Ait.) afin de constituer une liste exhaustive des propriétés nécessaires à l'étude des produits de bois fabriqués dans cette essence utilisée par l'entreprise GB et s'éloigner des propriétés générales des résineux. En effet, le regroupement d'informations sur cette essence locale et particulièrement des propriétés physiologiques, géométriques, physiques, hygriques et mécaniques s'avère essentiel et obligatoire pour modéliser fidèlement la structure et le comportement de produits bois extraits de spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) en tenant compte de leur hétérogénéité et de leur variabilité inter-arbres et intra-arbre. Premièrement, le chapitre introduit la taxonomie de l'essence ainsi qu'un historique des populations et spécialement en Europe du Sud-Ouest pour rassembler des données adaptées aux populations de *Pinus pinaster* (Ait.) correspondant à la provenance des Landes de Gascogne. Deuxièmement, le chapitre présente les caractéristiques propres de la structure et de la xylologie du *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction des multiples paramètres de croissance pour favoriser le développement d'un modèle paramétrique géométrique de la structure multi-échelles de cette essence. Finalement, le chapitre introduit certaines propriétés hygriques et mécaniques nécessaires au développement d'un modèle de comportement adapté au *Pinus pinaster* (Ait.).

1.1 Informations générales sur les populations de *Pinus pinaster* (Ait.)

1.1.1 Taxonomie

Pinus pinaster (Ait.) (illustré en Fig. 1.1) est un conifère de la division *Pinophyta* du genre *Pinus*. Cette espèce a été légitimement référencée pour la première fois par W. Aiton en 1789 dans le *Horthus Kewensis* [34]. Bien que son nom exact soit *Pinus pinaster* (Ait.), cette essence est parfois désignée à tort (*nomen illegitimum*) comme *Pinus Pinaster Soland* ou *Pinus maritima* et est communément appelée Pin maritime. Il existe deux sous-espèces principales qui se distinguent par leur situation géographique. La première est *Pinus pinaster ssp. pinaster*, communément appelée *Pinus mesogeensis* ou pin mésogéen, et la seconde est *Pinus pinaster ssp. atlantica*, également connue sous le nom de pin atlantique [35]. D'une côté, le pin mésogéen est principalement présent sur les rives occidentales de la mer Méditerranée à travers plusieurs provenances comme l'Espagne, le Sud et le Sud-Est de la France, le Nord-Ouest de l'Italie, la Corse, la Sardaigne [36] et le Maghreb. D'autre part, le pin atlantique est présent dans la péninsule ibérique (en particulier au Portugal et en Galice) et dans le Sud-Ouest de la France (en particulier dans les Landes de Gascogne) [37, 38].

1. <https://www.gettyimages.fr>

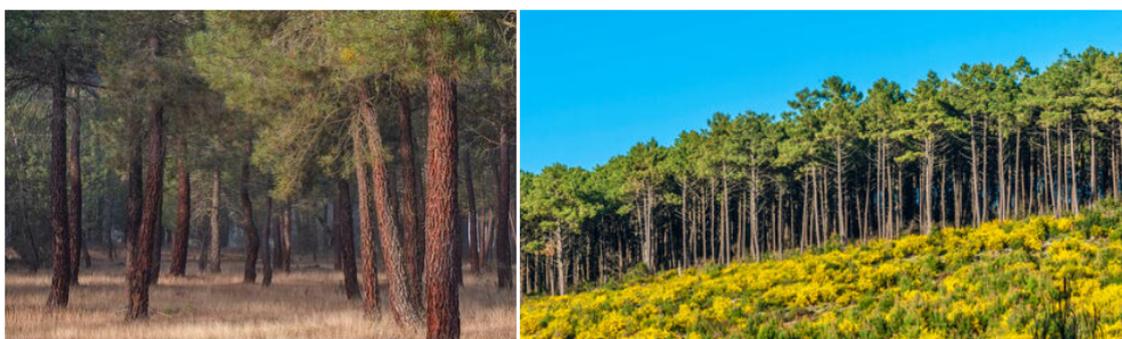


FIGURE 1.1 – *Pinus pinaster* Aiton 1789 extraite de la base d'images en ligne gettyimages ¹.

1.1.2 Historique de l'essence

Pinus pinaster (Ait.) est une espèce endémique du Sud-Ouest de l'Europe dont des traces archéologiques ont été découvertes dans le Sud de la France datant du Paléolithique [39]. Des études anthracologiques ont permis d'évaluer la présence d'individus durant la fin de la Préhistoire et la Protohistoire dans le Nord-Ouest du Portugal [40] et dans le Nord-Est du Portugal datant du Mésolithique [41]. Vers la fin de l'Âge de Fer (du V^{ème} au I^{er} siècle avant J.-C.), l'essence est encore très répandue dans le nord du Portugal [42] et également dans le Sud-Ouest de la péninsule Ibérique [43] pour son rôle de matériau principal de construction des colonies. Ces observations ont permis d'avancer la théorie que cette espèce est autochtone de ces régions dès le début de l'Holocène où elle survécut sous forme de peuplements mono-spécifiques ou mixtes notamment en collaboration avec le Chêne - *Quercus* omni-présent dans ces régions. Enfin, la plantation de forêts artificielles dans le centre de l'Espagne en *Pinus pinaster* (Ait.) à la même époque pour l'exploitation du bois ou de la résine a été montrée comme sensiblement peu probable [44].

La dynamique forestière est fortement influencée par plusieurs événements, appelés perturbations, qui entraînent des modifications des écosystèmes forestiers, appelées successions écologiques [45]. Ces perturbations peuvent être d'origines naturelles et climatiques (incendie, tempête, glissement de terrain, activité volcanique, insectes, champignons), animales (pâturage) ou anthropiques (guerre, pollution, cultures arboricoles) et ont considérablement modifiés la configuration des forêts comprenant l'essence *Pinus pinaster* (Ait.) de l'Antiquité au début du Moyen Âge dans la péninsule Ibérique [46]. Plusieurs alternances de périodes humides et arides (comme la période humide Ibéro-romaine en Espagne [47]) ou des catastrophes naturelles (incendies) ont modifié la végétation locale du Sud-Ouest de l'Europe. Néanmoins, les modifications les plus importantes furent provoquées par les activités humaines depuis la fin de l'Âge de Fer, en particulier pendant l'Empire Romain (I^{er} avant J.-C. au V^{ème} siècle après J.-C.) et le Royaume Wisigoth (V^{ème} au VIII^{ème} siècle après J.-C.). En effet, de vastes campagnes de déforestation ont été provoquées par le développement de l'agriculture et du pastoralisme, la construction de villages et de routes ou la sylviculture d'autres espèces arboricoles exploitables (châtaignier, olivier). Les caractères et avantages reproductifs liés au feu (Pyrophilie) expliquent la prolifération de *Pinus pinaster* (Ait.) pendant la deuxième partie du Moyen Âge (VII^{ème} au XV^{ème} siècle après J.-C.) marquée par une intensification du régime des feux [48].

Le commencement de l'Époque Moderne (XV^{ème} au XVI^{ème} siècle) est marqué par un fort taux de déforestation, notamment de *Pinus pinaster* (Ait.) dans le Sud-Ouest de l'Europe de part la forte demande en bois des domaines de la construction navale et du génie civil, la demande accrue en charbon de bois et l'augmentation de son niveau d'exportation avec une culmination autour du début de l'Époque Contemporaine (XVIII^{ème} au XIX^{ème} siècle). Depuis, des législations ont été

actées, notamment en France, pour protéger les domaines forestiers. De larges campagnes de reforestations ont permis la prolifération de *Pinus pinaster* (Ait.) par sa capacité de croissance dans des sols pauvres et peu fertiles (sable, sol acide, silice, grès, granite) en particulier dans les domaines montagneux ou comme agent de stabilisation des dunes littorales. Dans les Landes de Gascogne, son implémentation initiale avait pour but la réhabilitation des sols pour des activités agricoles postérieures. Cependant, l'exploitation commerciale dans un second temps des essences de pin commença à participer activement à l'économie rurale. Un grand nombre de produits comme le bois de chauffage, le charbon de bois, le goudron de pin, la résine, la gomme, la térébenthine ou la colophane ont été utilisés dans de multiples industries et peuvent être extraits de la production et de l'exploitation de l'essence de *Pinus pinaster* (Ait.) expliquant ainsi son expansion sur le territoire français [49].

Depuis la fin de la Seconde guerre mondiale, l'industrie de *Pinus pinaster* (Ait.) s'est transformée de l'extraction de composés chimiques vers la production de bois d'œuvre et de papier dans le Sud-Ouest de la France [50] avec une période de rotation d'environ 40 ans. Dans les Landes de Gascogne, le volume produit annuellement reste important (1.424 millions m^3 en 2019) malgré une forte diminution provoquée par les conséquences des dégâts des tempêtes et incendies (2.148 millions m^3 en 2013) [51].

De nos jours, l'industrie forestière locale se répartit entre production de bois destiné à l'industrie papetière, production de bois pour l'emballage, ameublement, construction et enfin production de granulés ou résidus destinés au chauffage. Des granges en pin, vestiges du système agricole agropastoral du XIX^{ème} siècle, aux immeubles d'habitation, maisons et gymnases, plusieurs applications de construction sont visibles qui témoignent de l'utilisation de *Pinus pinaster* (Ait.) au fil des âges [18].

Dans les pays hors de l'Europe, l'essence *Pinus pinaster* (Ait.) fit son apparition à la fin du XVII^{ème} siècle dans de nombreux pays de l'hémisphère Sud, comme illustré en Fig. 1.2. De nombreux pays comme l'Uruguay (en 1890), l'Argentine, le Chili, l'Afrique du Sud (en 1690), l'Australie (en 1920) [52] et la Nouvelle-Zélande [53] manquant d'espèces de résineux à croissance rapide dans des environnements difficiles ont pris la décision d'introduire le *Pinus pinaster* (Ait.) sur leurs territoires infertiles ou sableux. Dès lors, l'essence a été classifiée comme espèce envahissante notamment en Afrique du Sud, en Australie et en Nouvelle-Zélande [54].

1.1.3 Population actuelle de *Pinus pinaster* (Ait.)

La superficie mondiale couverte par *Pinus pinaster* (Ait.) est d'environ 4.4 millions d'hectares, dont 4.2 millions sont situés dans les pays d'où le *Pinus pinaster* (Ait.) est originaire, comme le montre la Fig. 1.2. Cette essence représente 51% de la surface forestière totale en Aquitaine, 23% au Portugal [57] et 23% en Galice [18]. Cependant, des catastrophes naturelles récentes ont causé d'importants dommages à la population locale de *Pinus pinaster* (Ait.) dans le Sud-Ouest de la France avec deux tempêtes, respectivement Lothar et Martin en 1999 (24 millions m^3) et Klaus en 2009 (37 millions m^3) [50] et les feux de forêt des dernières années et surtout de 2022 (30790 hectares selon les données de l'EFFIS²). De nombreuses autres menaces affectent l'espèce *Pinus pinaster* (Ait.) comme les attaques d'insectes xylophages (*Dioryctria sylvestrella*, *Rhyacionia buoliana*, *Thaumetopoea pityocampa*) [35], les attaques fongiques, la compétition inter-individus [58] et la sécheresse [59, 60]. De plus, le rapport spécial du GIEC [13] (p. 220) appuie sur un potentiel dépérissement forestier dû au changement climatique de par l'augmentation de l'intensité des tempêtes, des incendies ou des attaques d'insectes ravageurs. Des études ont montré l'importance des peuplements mixtes par rapport aux peuplements mono-spécifiques impliquant *Pinus pinaster*

2. <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>

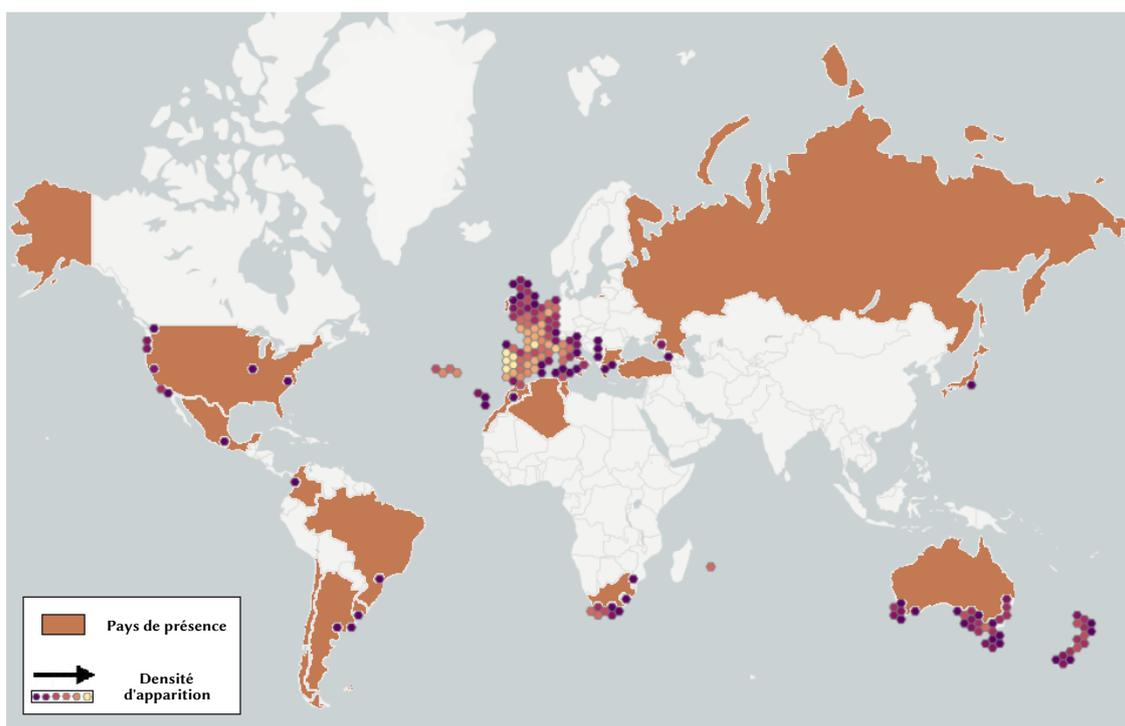


FIGURE 1.2 – Distribution mondiale des populations de *Pinus pinaster* (Ait.), adaptée des données de Farjon [55] et de CABI [56] (Commonwealth Agricultural Bureau International).

(Ait.) sur la résilience des forêts à la sécheresse et plus généralement aux impacts du changement climatique à travers l'Europe [61, 62]. Néanmoins, le phénomène de changement climatique pourrait entraîner une extension des zones favorables à la croissance du *Pinus Pinaster* (Ait.) dans la péninsule Ibérique par rapport à d'autres espèces [63], en conséquence de l'évolution originelle de l'espèce dans un environnement pré-méditerranéen de type tropical [64] combiné à une meilleure performance au feu en comparaison d'autres essences de résineux (*Pinus nigra* et *Pinus pinea*) dans la région [65].

1.2 Xylologie

1.2.1 Variabilité et structure du bois

Un tronc d'arbre est composé de plusieurs parties qui sont, de l'intérieur vers l'extérieur : la moelle, le duramen, l'aubier, le cambium, le liber et le périderme, comme l'illustre la Fig. 1.3.

Le bois est un composite naturel hautement hétérogène et anisotrope dont la constitution résulte de l'accumulation de couches par l'activité cambiale responsable de la croissance diamétrale des arbres. Un système de coordonnées cylindrique local est utilisé pour décrire les propriétés du bois qui est défini par trois plans de symétrie orthogonale, comme le montre la Fig. 1.4 : le plan transversal *RT*, le plan longitudinal radial *LR* et le plan longitudinal tangentiel *LT* [67]. On distingue trois directions préférentielles : la direction longitudinale *L*, la direction radiale *R* correspondant à la direction de croissance diamétrale et la direction tangentielle *T* aux cernes d'accroissement.

La division du cambium est principalement influencée par des conditions externes telles que les caractéristiques du biotope, les interactions avec la biocénose, l'environnement climatique,

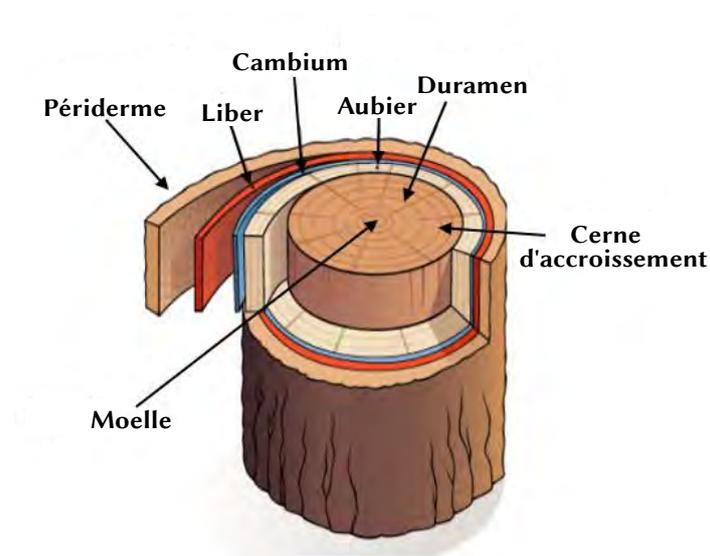


FIGURE 1.3 – Représentation schématique d'une grume de bois, adaptée de Yahyaoui [66].

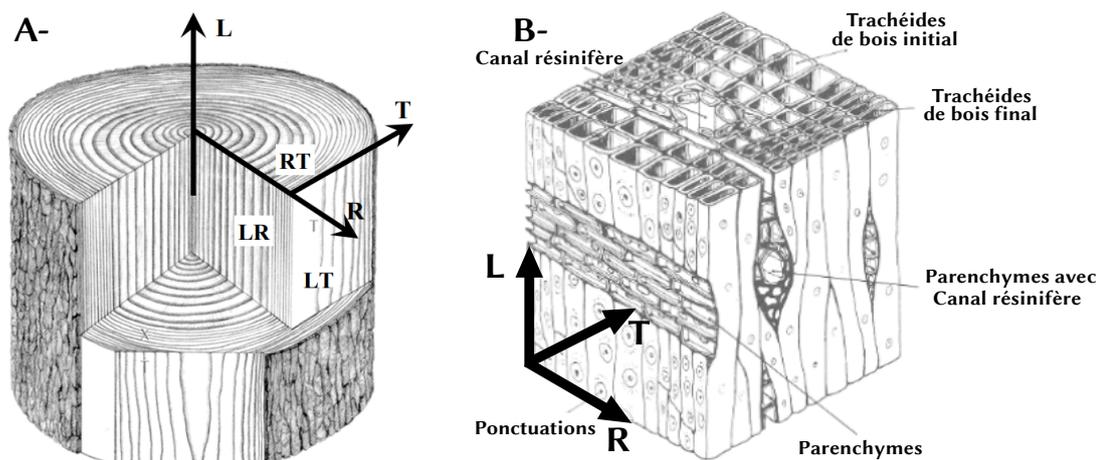


FIGURE 1.4 – A- Système de coordonnées cylindrique local des grumes de bois, adaptée de Grazide [67] B- Anatomie du bois de résineux, adaptée de Guitard [30].

la sylviculture, la hauteur et le vieillissement des arbres, qui affectent la capacité de division du cambium et la variabilité des propriétés du bois à différents niveaux : entre les espèces, entre les provenances, inter-arbres, intra-arbre, inter-cernes de croissance et intra-cerne de croissance.

1.2.2 Anatomie du *Pinus pinaster* (Ait.)

A l'échelle microscopique, le bois est composé de trachéides qui sont des éléments longitudinaux constituant 90% des cellules des résineux, comme le montre la Fig 1.5. Elles sont formées de cellules organisées en différentes couches. Les parois cellulaires sont des composites fibreux naturels composés de microfibrilles de cellulose (46.37 %) dans une matrice d'hémicellulose (24.21 %) et de lignine (28.99 %) avec des substances supplémentaires dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) [68]. Dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), il n'existe pratiquement aucune information sur la géo-

métrie des couches, à l'exception de la deuxième sous-couche de la paroi cellulaire secondaire.

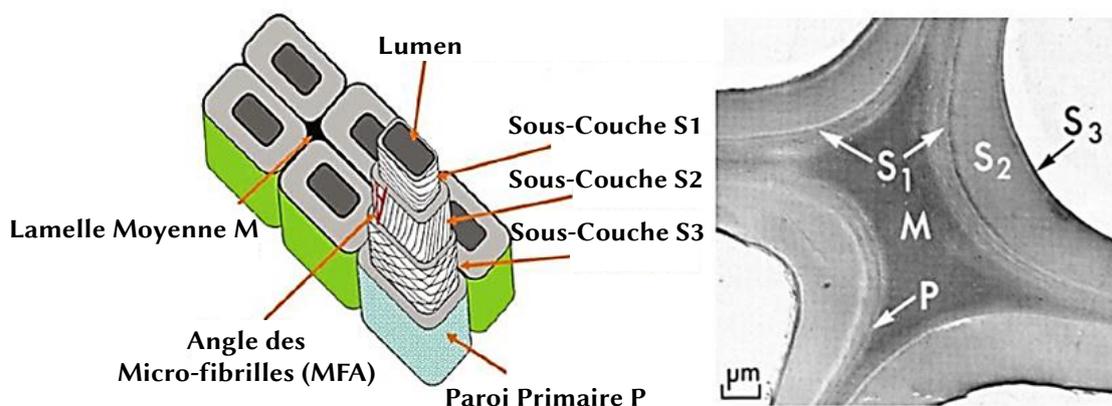


FIGURE 1.5 – Micro-structure des cellules des trachéides de bois, adaptée de Nguyen [69].

La sous-couche S2 représente une part importante de la couche secondaire (75%-85% de l'épaisseur finale) et présente une organisation de microfibrilles en lamelles parallèles et inclinées par rapport à l'axe de la cellule ($10^\circ - 30^\circ$ et peut atteindre environ 40° dans le bois de réaction et dans le bois juvénile dans le cas du *Pinus pinaster* (Ait.) [70]. L'orientation de cette sous-couche secondaire, définie par l'angle des microfibrilles (Microfibril Angle - MFA), et son importance en termes de masse totale et d'épaisseur sont responsables du comportement mécanique de la paroi cellulaire du bois. La littérature est limitée dans le cas du *Pinus pinaster* (Ait.) en ce qui concerne le MFA, en particulier en fonction de la distance à la moelle. Brémaud *et al.* [71] ont trouvé des valeurs pour le *Pinus pinaster* (Ait.) (moyenne avec deux autres espèces de résineux) de 22.4° à 6.9cm de la moelle (correspondant à un âge cambial de 8 ans), tandis que Lundqvist *et al.* [70] ont fourni l'évolution du MFA pour quelques échantillons de *Pinus pinaster* (Ait.) avec le numéro de cerne, comme illustré dans la Fig. 1.6. Pour d'autres espèces de résineux, Donaldson [72] a fourni des données sur le MFA du cerne moyen pour l'essence de *Pinus radiata* allant de 9° à 55° et Auty *et al.* [73] ont trouvé des valeurs allant de 5° à 35° pour le MFA dans le cas de *Pinus sylvestris*.

La fabrication additive des cellules des trachéides résultantes de l'activité cambiale est responsable de la croissance diamétrale de l'arbre. Les géométries des trachéides sont définies par plusieurs paramètres tels que le nombre de cellules, la largeur du lumen ou la largeur radiale-tangentielle des fibres, la largeur radiale et tangentielle de la paroi cellulaire (largeur totale des couches constitutives) et la longueur des trachéides. Les valeurs typiques de ces paramètres anatomiques dans le cas du *Pinus pinaster* (Ait.) sont référencées dans le Tab. 1.1 L'anatomie des cellules de *Pinus pinaster* (Ait.) est particulièrement dépendante des conditions climatiques affectant l'activité cambiale et peut subir d'importantes modifications au cours d'une saison de croissance annuelle, comme l'illustre la Fig. 1.7.

Les trachéides de *Pinus pinaster* (Ait.) sont principalement divisées en trois types différents, à savoir le bois initial avec un diamètre du lumen important et une largeur de paroi cellulaire fine, le bois final avec un lumen plus étroit et une paroi cellulaire plus épaisse, et les zones de fluctuation de densité inter-annuelle (Intra-Annual Density Fluctuation - IADF) qui correspondent à l'apparition de cellules de type bois initial dans la zone de bois final, un phénomène qui peut être expliqué comme un mécanisme de défense contre les périodes de sécheresse [74].

Plusieurs études portent sur l'influence de l'environnement climatique (rayonnement solaire, température, disponibilité de l'eau et évapotranspiration) et des caractéristiques du biotope (alti-

TABLE 1.1 – Propriétés anatomiques moyennes pour l'essence de *Pinus pinaster* (Ait.) issues de plusieurs références.

Références	Provenance	Nb d'échantillons	Âge Cambial Max [années]	Hauteur de Prélèvement [m]	Nb de cellules par cerne	Diamètre du Lumen [μm]	Épaisseur des Fibres [μm]	Épaisseur de la paroi cellulaire [μm]	Longueur des Fibres [mm]
[74]	Bordeaux, France	/	24-35	1.3	40-70	5-50	/	3-9	/
[75]	Tocha, Portugal	10	/	/	20-60	5-45	/	3-9	/
[70]	/	2	16-30	/	/	/	25-35	1-6	/
[76]	Tocha, Portugal	33	/	1.3	24-30	/	/	3.5-7	/
[77]	Toscane, Italie	/	/	1.3	/	/	/	2-8	/
[78]	Tronquats, France	960	14	/	/	/	42.5	/	1988
[68]	Aquitaine, France	186	15	/	/	/	27.43	/	1990

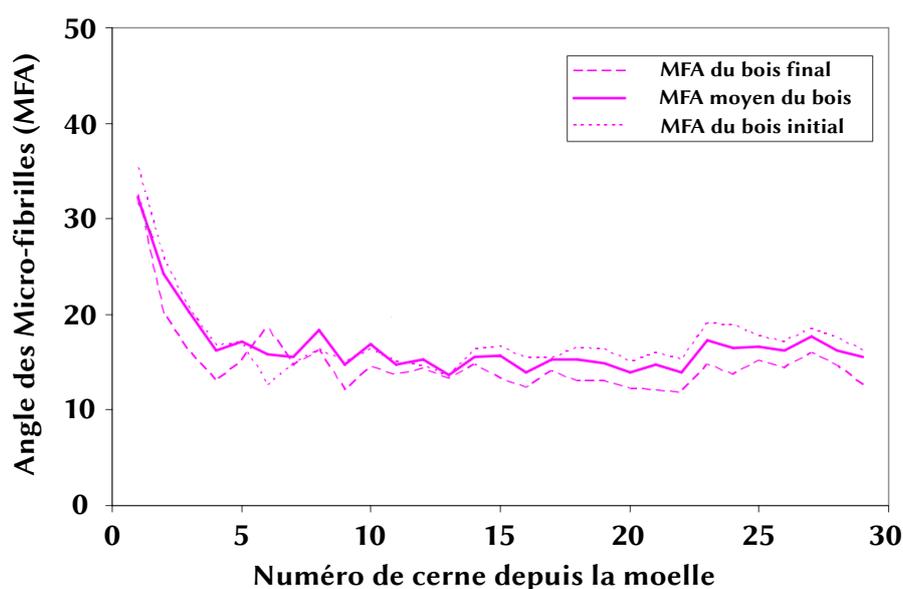


FIGURE 1.6 – Exemple d'évolution de MFA en fonction du numéro de cerne depuis la moelle d'un spécimen de 30 ans d'âge échantillon de *Pinus pinaster* (Ait.), adaptée de Lundqvist *et al.* [70].

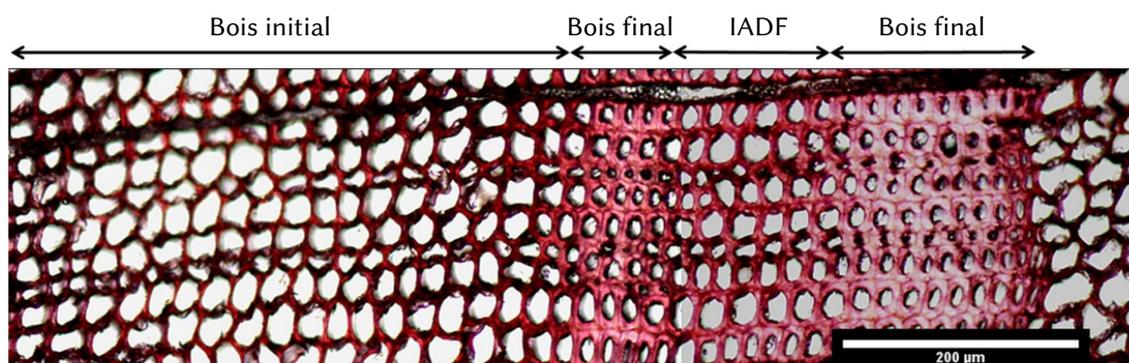


FIGURE 1.7 – Images au microscope optique montrant la différenciation anatomique des cellules du *Pinus pinaster* (Ait.) dans un cerne d'accroissement complet [74] avec les différentes parties de bois initial, de bois final et de fluctuation inter-annuelle de densité (IADF).

tude, propriétés du sol) sur l'anatomie de l'espèce *Pinus pinaster* (Ait.). Bogino et Bravo [64] ont montré que la variance totale de la croissance radiale des échantillons de *Pinus pinaster* (Ait.) de la péninsule Ibérique était liée à l'environnement climatique et en particulier aux précipitations et à la température et ont trouvé une bonne corrélation entre la croissance radiale, la température et l'altitude. Carvalho *et al.* [75] ont établi un lien entre la variabilité du diamètre du lumen et l'épaisseur de la paroi cellulaire, d'une part, et la teneur en eau du sol et la température, d'autre part. Ballesteros *et al.* [79] ont étudié la modification de l'anatomie cellulaire de *Pinus pinaster* Ait. après des blessures provoquées par des crues soudaines. Vergarechea [80] a étudié la modification des paramètres anatomiques des cellules de *Pinus pinaster* (Ait.) avec une modification gravitropique induisant l'apparition de bois de compression.

Dans le cas des IADFs, Wilkinson *et al.* [74] ont trouvé une forte corrélation entre l'apparition des IADFs dans le bois final et les événements de précipitations suivant une sécheresse estivale. Campelo *et al.* [81] et Vieira *et al.* [82] ont respectivement constaté une fréquence accrue d'apparition des IADFs dans les spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) de plus grand diamètre et dans les

jeunes arbres.

En outre, Nabais *et al.* [83] ont observé une forte influence en fonction de l'essence concernée sur l'apparition des IADFs en étudiant les différences entre deux bois résineux, à savoir *Pinus nigra* et *Pinus pinaster* (Ait.). L'influence de l'environnement climatique sur l'anatomie et la réponse à la croissance varie distinctement selon les espèces de résineux. Hernández-Alonso *et al.* [84] ont montré que le *Pinus pinaster* (Ait.) est l'espèce la plus affectée par la température par rapport aux essences de *Pinus nigra* et *Pinus sylvestris* beaucoup plus affectées par la disponibilité de l'eau. Häusser *et al.* [85] ont constaté que la température d'initiation de la croissance était plus froide pour le *Pinus nigra* que pour le *Pinus pinaster* (Ait.), qui peut provoquer un décalage d'un mois dans la période d'initiation de croissance. Enfin, Olivar *et al.* [86] ont étudié les différences dans l'historique des précipitations sur la réponse de croissance et les facteurs de croissance adaptatifs entre le *Pinus pinaster* (Ait.), plus impacté par l'hiver et le printemps précédant la saison de croissance, et le *Pinus sylvestris*, impacté principalement par les précipitations estivales.

1.2.3 Mécanismes d'influence de la croissance du bois

La présence de facteurs hétérogènes dans l'environnement de croissance entraîne des courbures et des réorientations de la tige (également appelée tropisme) du tronc, c'est-à-dire des modifications de la forme et de la taille de la section transversale et de l'excentricité de la moelle. Les tropismes sont principalement divisés en : phototropisme, gravitropisme et thigmotropisme (réorientation due à une contrainte de contact externe) [87]. Les individus de *Pinus pinaster* (Ait.) situés dans les Landes sur les dunes littorales sont particulièrement influencés par des vents dominants forts (anémotropisme) [88].

En ce qui concerne l'anémotropisme, Polge et Illy [89] ont analysé l'inclinaison des troncs de la population de *Pinus pinaster* (Ait.) des Landes de Gascogne en fonction des directions préférentielles du vent d'Ouest en Est. Berthier [90] a mis en évidence plusieurs phénomènes résultants des effets statiques du vent tels que l'inclinaison de la tige, le déséquilibre de la couronne, l'excentricité de la moelle, la non-circularité des sections, les contraintes préexistantes sur le système racinaire des arbres et la présence de bois de réaction, comme le montre la Fig. 1.8. Enfin, Berthier [90] a présenté l'action de la turbulence des vents sur la forme géométrique des troncs avec la réduction de la longueur des tiges, des sections avec du méplat (non-circularité du tronc) et une excentricité des moelles.

La génétique a également une influence importante sur la croissance. Plusieurs études sur les modifications génétiques de *Pinus pinaster* (Ait.) ont été menées pour améliorer la croissance et la rectitude des tiges de *Pinus pinaster* (Ait.) considérées comme « mauvaises » [88] pour l'industrie du bois en raison de leur excentricité [91]. Les caractéristiques génétiques de *Pinus pinaster* (Ait.) et la possibilité d'une sélection génétique ont été étudiées pour la première fois entre 1930 et 1950 [92]. Un vaste programme de sélection a ensuite été mis en œuvre depuis 1960 afin d'améliorer génétiquement les propriétés de cette espèce, avec deux objectifs principaux : obtenir un gain génétique en termes de croissance et de rectitude des tiges et préserver la diversité des populations de sélection [93]. Pour le premier objectif, une amélioration comprise entre 15% et 30% a été mesurée depuis la première génération sélectionnée jusqu'à la population du début des années 2000 [94], tandis que le second objectif a été moins étudié malgré son importance majeure [91].

Enfin, la sylviculture a un impact substantiel sur la croissance des arbres. En effet, des variables telles que la densité de population, les régimes des éclaircies et les durées de rotation forestière exploitent les mécanismes de tropismes susmentionnés et influencent la croissance et les propriétés des arbres à des fins esthétiques ou économiques [95, 88, 67]. La durée de rotation actuellement utilisée pour la sylviculture *Pinus pinaster* (Ait.) est considérée comme courte et se situe entre 20 et 40 ans [50].



FIGURE 1.8 – Impact des sollicitations du vent sur l'inclinaison des troncs et la forme des sections transversales d'arbres de *Pinus pinaster* (Ait.) plantés dans des régions de dunes côtières, adaptée de Berthier [90].

1.2.4 Propriétés physiologiques

Bois adulte et bois juvénile

Le bois formé au cours des premières années d'activité cambiale présente des propriétés spécifiques. La collection de ces cernes d'accroissement particuliers relativement proches de la moelle est appelée bois juvénile. On considère que le bois juvénile se forme à proximité du houppier vivant. Il se caractérise par la proximité de branches vivantes au cours de sa formation, dont la production d'hormones pour le fonctionnement du méristème primaire influence le mécanisme de division cambiale.

L'analyse des propriétés du bois permet d'établir une limite d'âge entre le bois juvénile et le bois adulte situé loin de la moelle. Cette limite peut varier en fonction de la hauteur de l'arbre [96], de la densité des cernes et de la longueur des fibres. Moreau [50] a proposé une méthode d'identification de la limite bois juvénile - bois adulte qui utilise des techniques de délimitation réalisées avec succès sur d'autres essences de résineux comme le Sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) ou le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Cette méthode est basée sur des régressions linéaires des mesures de densité du bois final des cernes d'accroissement. Cette méthode peut être utilisée dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) en raison de la limite abrupte entre le bois juvénile et le bois adulte [97]. La limite habituelle trouvée est d'environ 12 ans pour le *Pinus pinaster* (Ait.) (9 ans dans l'étude de Moreau [50]), comme l'illustre schématiquement la Fig. 1.9.

Aubier et Duramen

Le bois de cœur ou duramen est issu de la duraminisation de l'aubier, un phénomène physiologique qui transforme les cellules vivantes de l'aubier en cellules mortes du bois de cœur [98]. Le duramen se caractérise par un changement de couleur par rapport à l'aubier qui, dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), prend une coloration « rouge foncé », comme l'illustre la Fig. 1.10. Une hypothèse est avancée pour justifier la formation du bois de cœur dans un rôle de soutien mécanique de l'arbre. Néanmoins, dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), Berthier *et al.* [99] n'ont montré aucune différence fondamentale entre le module d'élasticité longitudinal de l'aubier et du duramen. Une autre hypothèse semble lier la formation du duramen à la consommation énergétique générale de l'arbre. Le duramen étant composé de cellules mortes, sa formation pourrait optimiser la surface effective de transport de l'aubier pour ajuster l'apport d'énergie en fonction de la demande en sève des feuilles [98]. Ce phénomène a été expliqué par la théorie « Pipe Model » [100, 101], qui a été démontrée pour le *Pinus pinaster* (Ait.) par Berthier *et al.* [99].

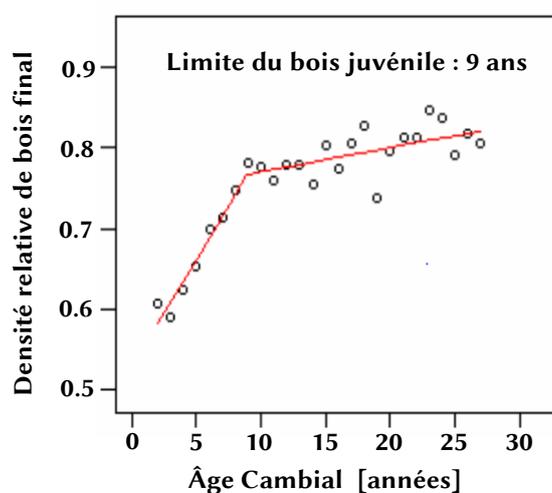


FIGURE 1.9 – Identification de la limite du bois juvénile par une méthode d'intersection reposant sur des régressions linéaires des densités relatives de bois final en fonction de l'âge cambial pour le *Pinus pinaster* (Ait.), adaptée de Moreau [50].



FIGURE 1.10 – Illustration du duramen de *Pinus pinaster* (Ait.) caractérisé par une coloration "rouge foncé" [50].

Le pourcentage de surface du bois de cœur (par rapport à la surface totale) dans le plan transversal varie dans la direction longitudinale de l'arbre. Taylor *et al.* [98] ont décrit le profil général de surface du bois de cœur dans la direction longitudinale de l'arbre comme un cône irrégulier. Ce profil conique ne se retrouve pas dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) [99]. En effet, Pinto *et al.* [102], Knapic et Pereira [103] et Moreau [50] ont trouvé un pourcentage de surface de bois de cœur croissant jusqu'à une hauteur de 3 m à 6 m suivi d'une diminution constante. Knapic *et al.* [104] ont évalué cette hauteur de transition comme étant située à 35% de la hauteur totale pour 20 arbres de *Pinus pinaster* (Ait.). La conductivité de l'eau plus faible à la base de l'arbre pour cette espèce pourrait expliquer ce profil particulier. En effet, la duraminisation ralentirait pour compenser cette perte de conduction [105].

La variabilité du bois de cœur dans le plan transversal existe également. Knapic *et al.* [104] ont trouvé une forme quasi-circulaire de la surface du bois de cœur jusqu'à une hauteur moyenne de 10 m chez certains individus de *Pinus pinaster* (Ait.). La variation du pourcentage ou de la forme du duramen peut être due à l'excentricité de la moelle, au méplat (forme elliptique du

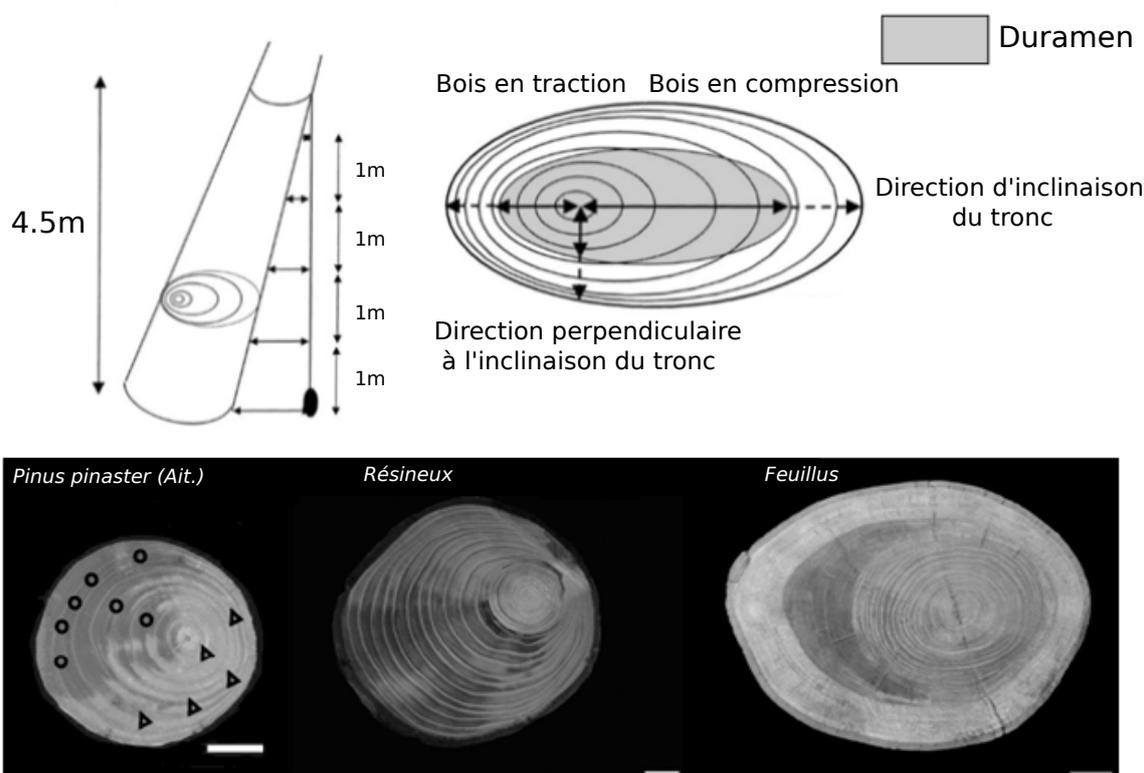


FIGURE 1.11 – Formation du *Duramen* par l'inclinaison des troncs, adaptée de Stokes et Berthier [106] et section transversale de *Pinus pinaster* (Ait.) contenant du bois de compression en comparaison des sections de résineux et de feuillus, adaptée de Brémaud *et al.* [71].

tronc), à l'influence du houppier ou à la présence de bois de réaction (bois de compression pour les résineux) résultant de sollicitations extérieures (vent, neige). Pour les arbres dont le tronc est incliné, le nombre de cernes de duramen est plus important du côté de la compression [106, 99], comme représenté schématiquement dans la Fig. 1.11. Les mécanismes de la formation accrue de bois de cœur induite par la présence de bois de compression sont encore inconnus [107].

Bois de réaction

La réorientation de la tige est assurée par la formation de bois de réaction dont les propriétés sont différentes de celles du bois normal (BN) [108]. Chez les résineux, le bois de réaction est également appelé bois de compression (BC) et se manifeste dans la région du bois soumise à de la compression (par exemple, sous le vent), comme l'illustre la Fig. 1.11(b). Dans le BC, la transition entre le bois initial et le bois final est progressive pour les espèces où cette transition est généralement abrupte, ce qui est le cas pour *Pinus pinaster* (Ait.) [89]. Radi et Castéra [95] ont présenté la distribution de BC dans deux troncs de *Pinus pinaster* (Ait.) qui montrent une réorientation conséquente induite par une rectification basale (sol incliné) ou une réorientation par phototropisme. Le taux moyen de BC chez les deux individus est respectivement de 3.89% et 5.97% malgré une inclinaison basale plus importante dans le premier cas. Dans la filière française industrielle de *Pinus pinaster* (Ait.), la présence du BC est négligée en raison de la difficulté d'identification de sa localisation.

1.3 Propriétés géométriques

1.3.1 Hauteur et diamètre

L'espèce *Pinus pinaster* (Ait.) est un résineux à croissance rapide qui atteint une hauteur d'environ 23m à 26m pour un diamètre à hauteur de poitrine (Diameter Breast Height - DBH) compris entre 415mm et 470mm et un âge d'arbre compris entre 35 et 48 ans [109, 110] en comparaison avec les essences de résineux industriels les plus populaires en Europe, à savoir *Picea abies*, qui atteignent une hauteur d'environ 18m à 24m pour un diamètre à hauteur de poitrine compris entre 150mm et 300mm et un âge d'arbre compris entre 36 et 43 ans (en Lituanie) [111] et une espèce localement apparentée, c'est-à-dire *Picea nigra*, qui atteignent une hauteur d'environ 15m à 27m pour un DBH compris entre 200mm et 400mm et un âge de l'arbre compris entre 58 et 93 ans (au Portugal) [112]. Les valeurs typiques de l'accroissement en hauteur, de la hauteur de l'arbre et du diamètre à hauteur de poitrine pour le *Pinus pinaster* (Ait.) sont indiquées dans le Tab. 1.2.

La croissance radiale et l'accroissement en hauteur sont deux paramètres géométriques largement influencés par l'environnement climatique, en particulier les précipitations et les températures historiques (durée, saison d'occurrence). L'impact de la sécheresse est plus important sur l'accroissement en hauteur et la croissance radiale basale que sur la croissance radiale de la partie supérieure de la tige [115]. L'accroissement annuel en hauteur est compris entre [20, 180]cm pour 10 échantillons d'arbres dominants de *Pinus pinaster* (Ait.) provenant de Soria en Espagne dans l'étude de Rubio-Cuadrado *et al.* [115] et [30, 120]cm pour 62 échantillons d'arbres dominants de *Pinus pinaster* (Ait.) âgés de 8, 22 et 48 ans provenant de Bordeaux en France dans l'étude de Hernández-Alonso *et al.* [110]. Chez les arbres dominants de *Pinus pinaster* (Ait.), où l'influence de la compétition pour les ressources est minime, l'accroissement en hauteur augmente rapidement dans les premiers âges d'un arbre jusqu'à environ 10 ans, suivi d'un déclin constant avec l'âge ontogénétique, comme l'illustre la Fig. 1.12.

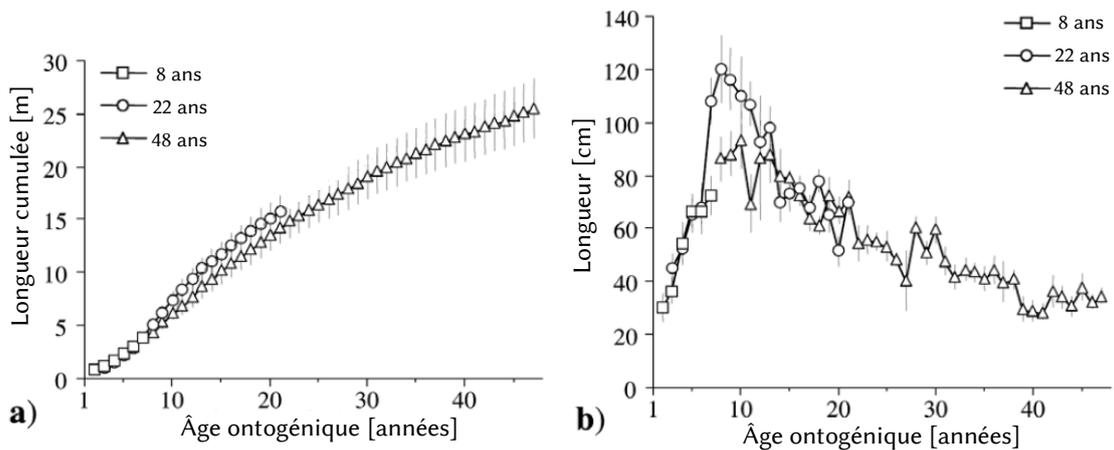


FIGURE 1.12 – a) Longueur cumulée de la tige et b) Augmentation de la longueur de la tige par an pour 32, 20 et 10 échantillons d'arbres âgés respectivement de 8, 22 et 48 ans *Pinus pinaster* (Ait.), en fonction de l'âge ontogénétique, adaptée de Hernández-Alonso *et al.* [110].

1.3.2 Cernes d'accroissement et largeur de cernes

Un cerne d'accroissement résulte de l'activité cambiale, représente la croissance diamétrale de l'arbre au cours d'une année et est composé généralement de deux parties principales, le bois

TABLE 1.2 – Valeurs de références pour les hauteurs et diamètres de spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) issues de plusieurs références.

Références	Provenance	Type d'échantillon	Nb d'échantillons	Âge Cambial Max [années]	Écart-type des âges	Hauteur d'arbre [m]	Écart-type des hauteurs	Diamètre à hauteur de poitrine (DBH) [mm]	Écart-type des diamètres
[109]	Gangara Australe	Arbres dominants	4	10,25	0,5	9,90	0,4	136,2	13
[109]	Gangara Australe	Arbres dominants	4	16	0	16,05	0,4	241,6	7
[109]	Gangara Australe	Arbres dominants	4	35,75	0,5	23,32	0,8	416,6	31
[109]	Gangara Australe	Arbres dominants	4	37,5	0,3	23,28	0,3	465,3	26
[110]	Bordeaux France	Arbres dominants	32	8	/	4,7	/	73	/
[110]	Bordeaux France	Arbres dominants	20	22	/	16,6	/	253	/
[110]	Bordeaux France	Arbres dominants	10	48	/	25,5	/	470	/
[109]	Pinjar Australe	Arbres dominants	4	8	0	8,64	0,4	147,8	3
[109]	Pinjar Australe	Arbres dominants	4	20,25	0,3	17,05	0,5	310,4	6
[109]	Pinjar Australe	Arbres dominants	4	30,25	0,3	19,75	0,4	411,1	22
[113]	Asturias and Galice Espagne	/	14339	20,3	8,3	11,7	3,8	181	68
[114]	Portugal	/	1698	5	/	1,6	1,0	/	/
[114]	Portugal	/	1234	10	/	4,7	1,5	/	/
[114]	Portugal	/	1217	15	/	7,8	1,7	/	/
[114]	Portugal	/	1186	20	/	10,7	1,9	/	/
[114]	Portugal	/	1090	25	/	13,2	1,9	/	/
[114]	Portugal	/	941	30	/	15,4	2,0	/	/
[114]	Portugal	/	695	35	/	17,1	2,0	/	/
[114]	Portugal	/	395	40	/	18,9	2,0	/	/
[114]	Portugal	/	235	45	/	20,5	2,2	/	/
[114]	Portugal	/	157	50	/	21,8	2,6	/	/
[114]	Portugal	/	128	55	/	23,1	2,9	/	/
[114]	Portugal	/	89	60	/	24,0	2,8	/	/
[114]	Portugal	/	25	65	/	24,0	1,7	/	/
[114]	Portugal	/	4	70	/	24,9	0,1	/	/
[115]	Espagne	Arbres dominants	10	/	/	17,7	0,9	484	18

initial (Initial Wood, IW) et le bois final (Final Wood, FW). Cette différenciation provient des écarts entre la demande et la disponibilité de l'eau au cours des saisons de croissance. Chaque cerne d'accroissement annuel reflète les conditions de croissance de la saison de croissance correspondante.

La largeur des cernes d'accroissement est un paramètre géométrique qui représente une source de variabilité [88] et qui est influencée par de multiples facteurs comme la sylviculture, la génétique, les conditions climatiques ou la présence de BC [81]. À l'exception des espèces d'arbres poussant dans des environnements difficiles, la largeur des cernes n'est pas une constante. En effet, la largeur de cernes diminue dans le sens diamétral, de la moelle vers l'écorce, à une hauteur donnée, avec une diminution prononcée dans le bois juvénile. Il existe une exception pour les premiers cernes en raison des difficultés de croissance (concurrence, aléas climatiques) rencontrées dans les premiers âges de l'arbre [88]. Dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), Anjos *et al.* [116] ont trouvé une augmentation de la largeur dans les premiers cernes (jusqu'aux cernes 5 à 9) et ensuite une diminution régulière pour un échantillon de huit pins âgés de 83 ans. Cette tendance peut également être observée pour les mesures d'échantillons tirées respectivement des travaux de Gaspar *et al.* [117] et de Nicholls *et al.* [118] comme l'illustrent les Fig. 1.13 et Fig. 1.14.

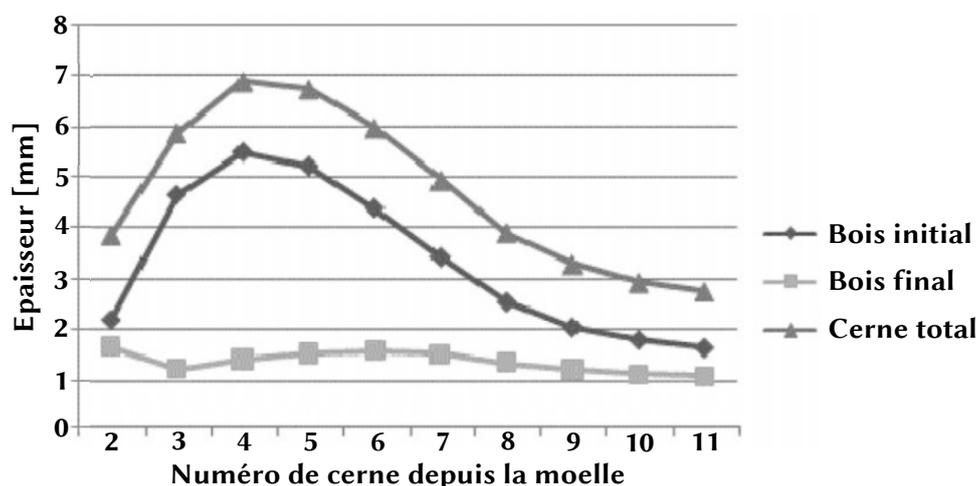


FIGURE 1.13 – Valeurs inter-cernes pour le bois initial, le bois final et la largeur totale des cernes en fonction du numéro de cerne pour les 12 premiers cernes d'un arbre portugais de *Pinus pinaster* (Ait.) [117].

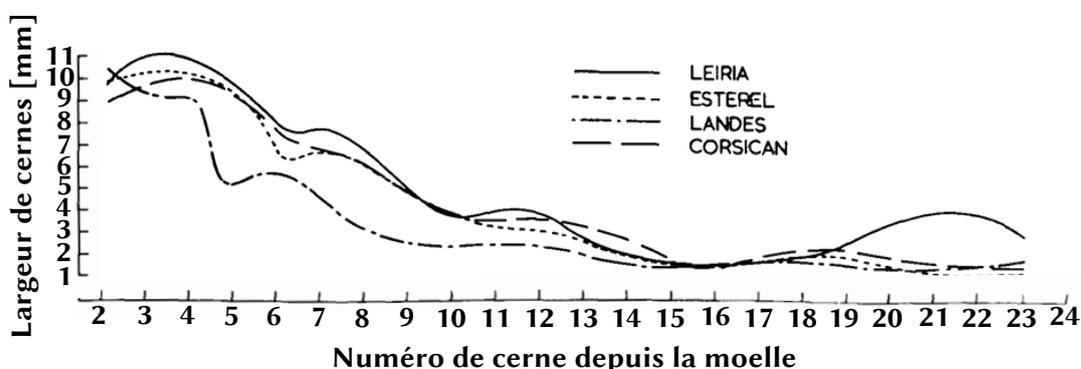


FIGURE 1.14 – Valeurs inter-cernes de la largeur totale des cernes en fonction du nombre de cernes pour les 23 premiers cernes des spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) originaire de plusieurs provenances [118].

Dans la direction longitudinale, la proportion de IW semble augmenter de par la proximité du houppier vivant et par la présence accrue de bois juvénile [88]. Les valeurs expérimentales tirées de la littérature scientifique sur la largeur des cernes pour le *Pinus pinaster* (Ait.) sont indiquées dans le Tab. 1.3.

1.3.3 Angle de fil

L'angle de fil est défini comme l'angle entre la direction de la fibre de bois (trachéides) et la direction longitudinale dans le plan *LT*. L'angle de fil du bois est principalement défini par l'angle « biologique », qui correspond à une croissance en spirale ou en enroulement du fil du bois autour de la génératrice verticale de l'arbre. L'angle « biologique » varie considérablement à l'intérieur de l'arbre. De la moelle vers l'écorce chez les résineux, l'angle de fil est proche de zéro dans les premiers cernes, puis augmente fortement (environ 5°) entre les 5^{ème} et 10^{ème} cernes avant de diminuer progressivement et de se stabiliser à une valeur moyenne de 2° [88]. Une annulation de l'angle peut généralement se produire vers 40-70 ans. Dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), l'angle de fil peut atteindre 8° autour des premiers cernes avant de diminuer progressivement avec l'âge du cambium, comme l'illustrent les Figs.1.15 et 1.16. Keller *et al.* [122] ont observé une forte variabilité intra-arbre de l'angle de fil (entre -1.8° et +10.4° avec un coefficient de variation de 88%) en utilisant un traceur radioactif pour faciliter les mesures sur deux individus de *Pinus pinaster* (Ait.).

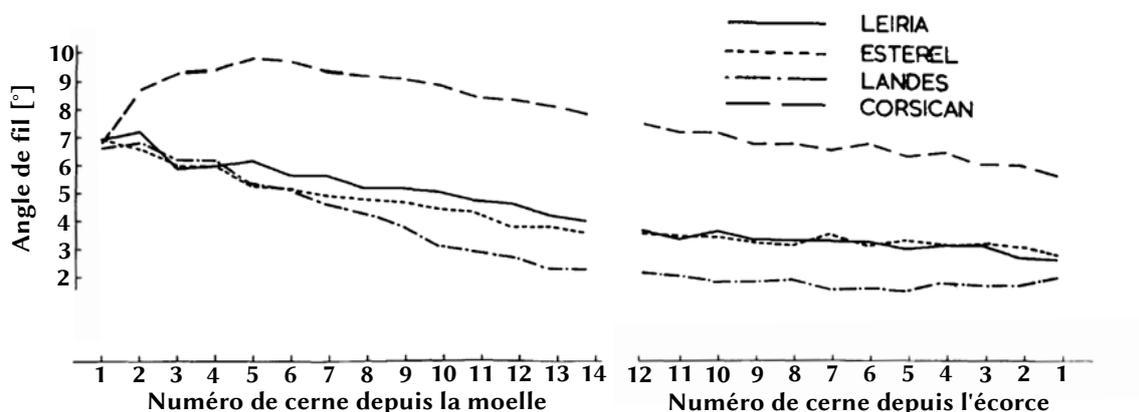


FIGURE 1.15 – Valeurs inter-cernes de l'angle du fil de bois en fonction du nombre de cernes pour les 27 premiers cernes de spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) [123] issus de plusieurs provenances.

1.3.4 Angle conique

L'angle de conicité est l'angle entre la direction des fibres du bois et la direction longitudinale dans le plan *LR*. Il apparaît au cours de la formation de l'arbre. Le bois situé dans la partie inférieure est plus vieux que celui situé dans la partie supérieure de l'arbre. Ainsi, le diamètre de l'arbre diminue avec la direction longitudinale et l'angle de conicité apparaît.

1.4 Propriétés physiques : Densité

Trois définitions sont utilisées pour décrire la densité du bois :

TABLE 1.3 – Largeur de cernes de *Pinus pinaster* (Ait.) (ssp. *Atlantica*) extraites de plusieurs références.

Références	Provenance	Nb d'échantillons	Âge Cambial Max [années]	Hauteur de Prélèvement [m]	Valeur moyenne [mm]	Ecart-Type [mm]	Plage de valeurs [mm]	Valeur Limite [mm]
Burgers [119]	Occitanie, France	4	/	/	5.5	/	2-13	/
Louzada [120]	Portugal	/	70	/	4.8	/	/	2.2
Louzada [121]	Bragado, Portugal	180	6	1.3	7.34	1.12	4.50-10.80	/
Louzada [121]	Bragado, Portugal	180	10	1.3	5.86	0.83	3.50-8.80	/
Louzada [121]	Bragado, Portugal	180	13	1.3	5.13	0.73	3.10-7.80	/
Nicholls <i>et al.</i> [118]	Landes, France	10	24	1.04-1.94	/	/	2-10	2
Gaspar <i>et al.</i> [117]	Leiria, Portugal	552	17	2	4.224	0.901	2.5-8.6	2.5

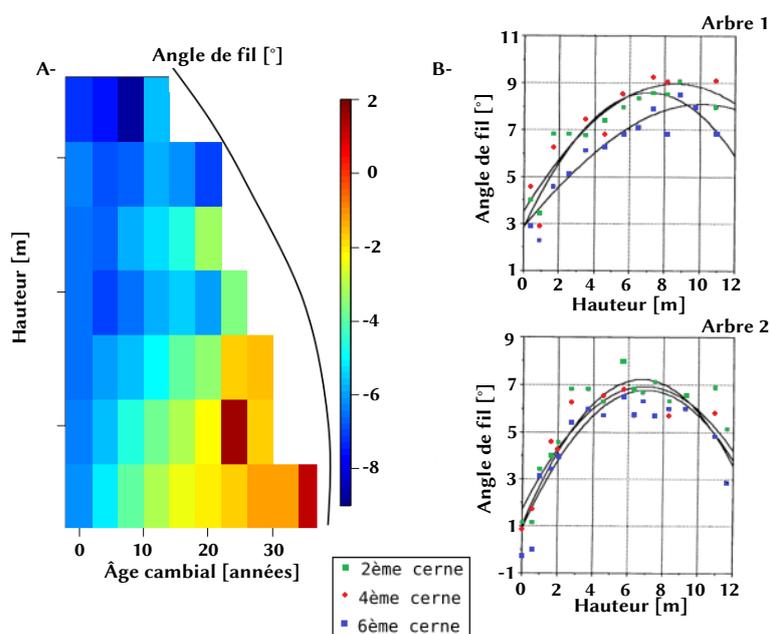


FIGURE 1.16 – Influence de la hauteur sur l’angle de fil pour *Pinus pinaster* (Ait.) obtenue depuis les travaux de A- Moreau [50] (les valeurs devraient être lues avec leur signe opposé) avec un inclinomètre et B- Radi et Castéra [95] sur deux individus en mesurant la direction de propagation des fissures lors de test de fendage.

- La densité absolue correspond à la densité du bois anhydre (agglomérat de bois et panneaux de particules), dont la densité relative par rapport à l’eau est de 1.53, indépendamment de l’essence.
- La densité à l’état sec à l’air ρ est définie comme le rapport de la masse au volume du bois conditionné à un taux d’humidité de 12%, comme présenté dans Jodin [88]. Cette définition est la plus courante dans presque toutes les références et sera utilisée tout au long de ce manuscrit. Elle sera utilisée sous la forme de la densité relative W_d qui est le rapport de cette densité particulière à la densité de l’eau.
- L’infra-densité du bois (IF) est décrite par le rapport entre la masse anhydre et le volume saturé (volume vert) de l’échantillon [124] (par rapport à la densité de l’eau).

Le passage de l’infra-densité à la densité relative se fait en deux étapes :

1. Grâce à l’abaque illustré Fig. 1.17, il est possible de trouver la densité relative spécifique G_H du bois à un taux d’humidité H donné (masse anhydre sur le volume au taux d’humidité choisi - par rapport à la masse volumique de l’eau). La relation entre G_H et H se lit comme suit :

$$G_H = \frac{IF}{1 - 0.265IF\left(1 - \frac{H}{PSF}\right)}, \quad (1.1)$$

où PSF est le Point de Saturation des Fibres et égal à environ 30% pour *Pinus pinaster* (Ait.) [119].

2. Grâce à l’équation 1.2, il est possible de trouver la densité relative du bois à l’état sec à l’air W_d à partir de la densité $G_{12\%}$ à $H = 12\%$ d’humidité :

$$W_d = G_{12\%}(1 + 0.12). \quad (1.2)$$

La densité du bois est un paramètre physique important en raison de son influence sur les propriétés mécaniques, de sa facilité de mesure et de son utilisation comme critère de qualité du bois [91].

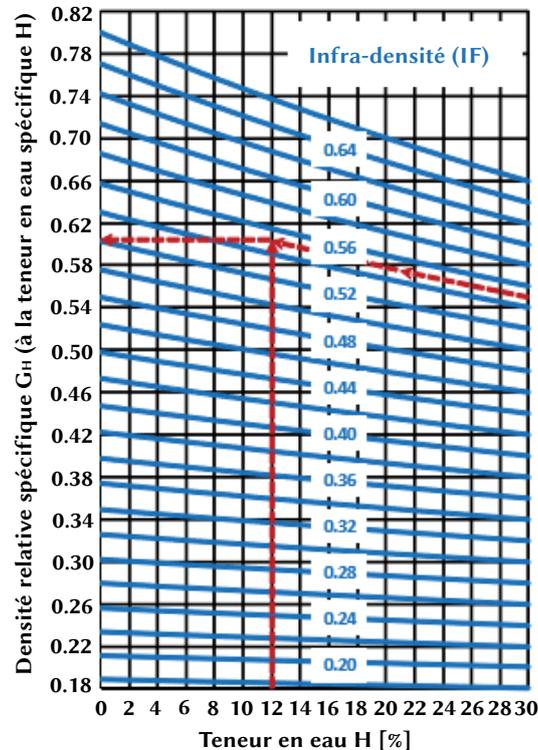


FIGURE 1.17 – Abaque donnant la relation entre la densité relative spécifique, le taux d’humidité et l’infra-densité [124].

1.4.1 Densité intra-cerne

Un cerne est constitué par une partie de IW de faible densité relative et une partie de FW de forte densité relative. Pour les résineux, comme *Pinus pinaster* (Ait.), le rapport entre la densité de FW et la densité de IW se situe dans l’intervalle [2, 4] [119]. Le profil de densité commun pour un cerne composé de IW et FW dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) est illustré Fig. 1.18.

Cette structure de bois IW-FW est une source essentielle de variabilité de la densité au niveau microscopique [126]. Cette différenciation est produite par un changement dans l’équilibre entre l’offre et la demande d’eau au cours de la saison de croissance et est donc profondément liée aux conditions climatiques [105, 127]. La proportion de bois final (Final Wood Proportion, FWP) dans un cerne de *Pinus pinaster* (Ait.) est très variable et dépend de plusieurs paramètres, comme les conditions climatiques, le bois de réaction et l’âge du cerne, voir Fig. 1.19. Les valeurs typiques de la densité intra-cerne et de FWP pour le *Pinus pinaster* (Ait.) sont indiquées dans le Tab. 1.4. La plupart des études réalisées par Sánchez-Vargas *et al.* [128], Gaspar *et al.* [117], Louzada [121] et Moreau [50] obtiennent des valeurs de densité en utilisant une analyse micro-densitométrique sur des images de radiographie selon la méthode présentée dans Polge [129, 130] (échantillons conditionnés à 12% de teneur en eau). Quant à Wilkinson *et al.* [74], les densités sont calculées à partir de données anatomiques sur les parois des cellules.

En outre, des conditions climatiques particulières (succession de précipitations après une sécheresse sévère) peuvent déclencher une réactivation de l’activité cambiale et des phénomènes

TABLE 1.4 – Densité relative intra-cerne pour le *Pinus Pinaster ssp. atlantica* pour le bois initial et le bois final. Densité relative moyenne (W_d) ; Bois initial (IW) ; Bois final (FW) ; Densité relative de IW (W_d) ; Densité relative de FW (FW_d) ; Ecart-type de IW (ξ (IW_d)) ; Ecart-type de FW (ξ (FW_d)) ; Proportion de bois final (FWP) ; Ecart-type pour FWP (ξ (FWP)).

Références	Provenance	Nb d'échantillons	Plage de valeurs W_d	Âge Cambial Max [années]	FW _d	ξ (FW _d)	IW _d	ξ (IW _d)	FWP [%]	ξ (FWP)
Sánchez-Vargas <i>et al.</i> [128]	Gironde, France	/	0.3-0.9	/	/	/	/	/	/	/
Gaspar <i>et al.</i> [117]	Leiria, Portugal	552	0.207-0.917	17	0.618	0.034	0.386	0.026	38.2	16.93
Louzada [121]	Bragado, Portugal	180	0.215-0.889	6	0.651	0.033	0.397	0.029	21.4	6.700
Louzada [121]	Bragado, Portugal	180	0.228-0.933	10	0.684	0.036	0.404	0.031	24.1	6.000
Louzada [121]	Bragado, Portugal	180	0.240-0.921	13	0.687	0.035	0.411	0.031	25.9	6.100
Wilkinson <i>et al.</i> [74]	Gironde, France	/	0.2-1.2	29-41	/	/	/	/	/	/

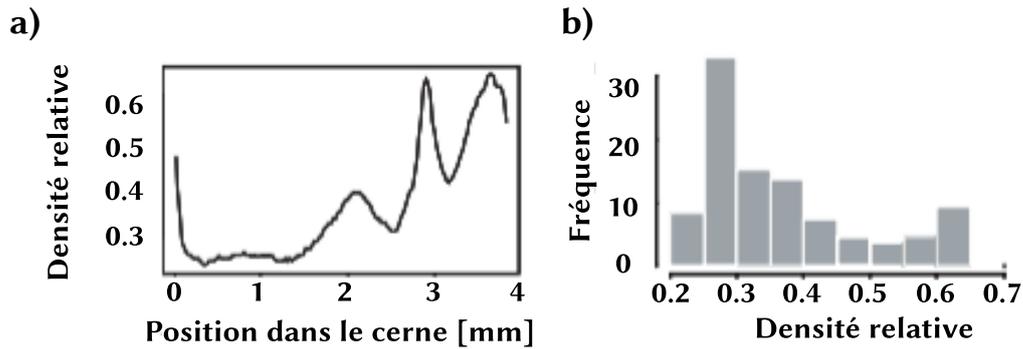


FIGURE 1.18 – a) Évolution de la densité relative intra-cerne en fonction de la position dans le cerne étudié [mm] et b) fréquences d'apparition des densités relatives dans un cerne dans le cas du *Pinus pinaster* (Ait.) [125].

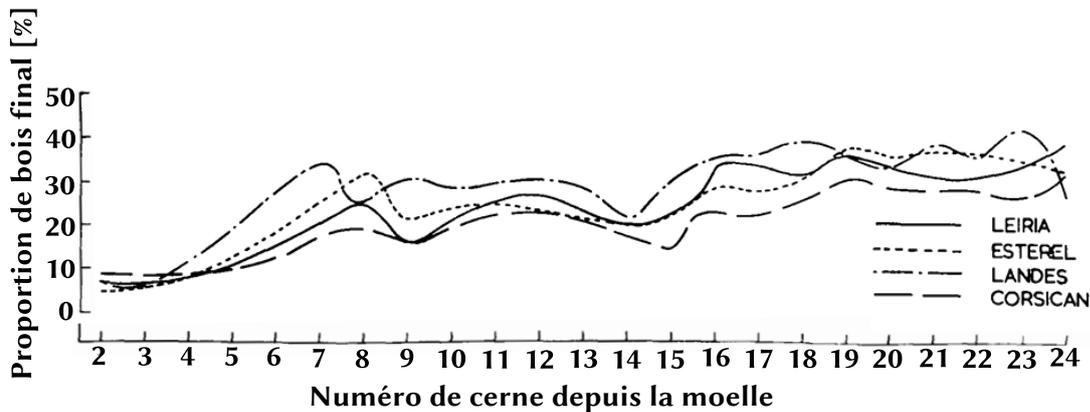


FIGURE 1.19 – Évolution du pourcentage de bois final en fonction du numéro de cerne pour des spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) issus de plusieurs provenances, adaptée de Nicholls *et al.* [118].

uniques tels que l'apparition de pics de densité supplémentaires dans le FW [131]. Ce phénomène, appelé « faux-cerne », est assez fréquent dans le bois juvénile de *Pinus pinaster* (Ait.) plus affecté par les conditions climatiques, comme le montre la Fig. 1.20.

1.4.2 Densité inter-cernes

Les variations de la densité inter-cernes, bien que plus faibles que les variations de la densité intra-cerne, sont significatives chez les résineux (20-25% de variation moyenne). Trois études, Gaspar *et al.* [117], Nicholls *et al.* [118] et Nicholls [123] fournissent des données sur les densités inter-cernes pour le *Pinus pinaster* (Ait.). Gaspar *et al.* [117] ont trouvé expérimentalement une diminution de la densité relative moyenne dans les deux premiers cernes suivie d'une augmentation générale jusqu'au 11^{ème} cerne pour 552 échantillons, voir Fig. 1.21. Cette observation correspond à l'effet de la présence de bois juvénile et donc de l'influence de l'âge cambial. Dans la zone de bois adulte, la densité relative moyenne tend vers une valeur asymptotique. Nicholls *et al.* [118] ont trouvé une valeur limite de densité de 0.55 atteinte dans la zone de bois adulte, comme l'illustre la Fig. 1.22. Une corrélation peut également être établie entre la densité relative du bois final et la largeur des cernes. À un âge cambial donné, la densité relative du bois final diminue au

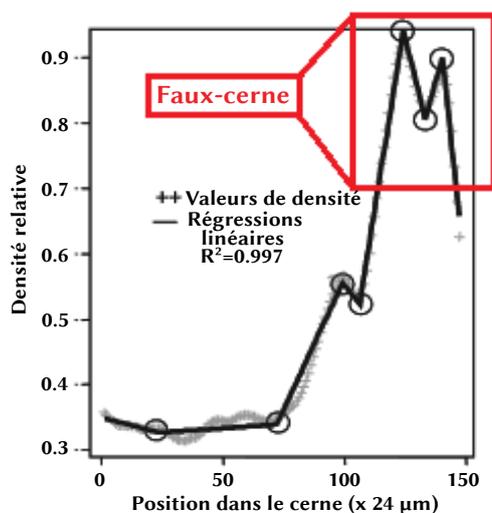


FIGURE 1.20 – Mise en évidence du phénomène de faux cerne ou IADF chez le *Pinus pinaster* (Ait.) grâce à l’étude de la densité intra-cerne en fonction de la position dans le cerne, adaptée de Sánchez-Vargas *et al.* [128].

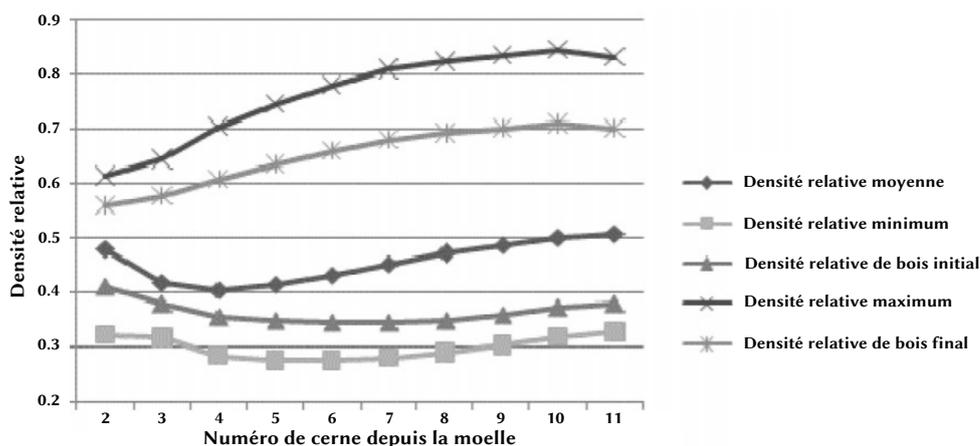


FIGURE 1.21 – Évolution des densités relatives moyennes inter-cernes en fonction du nombre de cernes pour 552 spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) originaires de Leiria-Portugal, adaptée de Gaspar *et al.* [117].

fur et à mesure que la largeur du cerne augmente, comme illustré en Fig. 1.23.

1.5 Propriétés hygriques du *Pinus pinaster* (Ait.)

1.5.1 Modèle de transfert d’humidité et propriétés hygriques

Teneur en eau

Le bois est un matériau hygroscopique naturel dans lequel l’eau existe sous différentes formes : l’eau combinée, l’eau liée et l’eau libre. La teneur en eau (H) correspond à la quantité d’eau présente dans le bois. Elle est définie comme le rapport entre la masse d’eau présente dans l’échan-

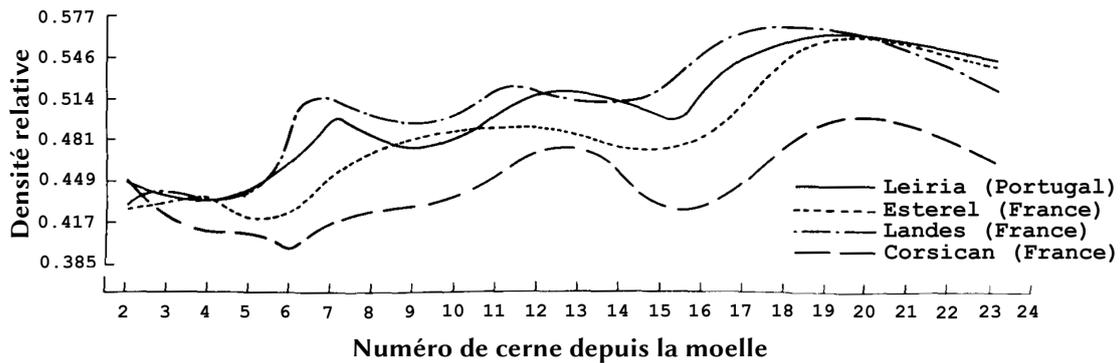


FIGURE 1.22 – Évolution des densités relatives moyennes inter-cernes en fonction du nombre de cernes pour les 23 premiers cernes de spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) originaires de plusieurs provenances, adaptée de Nicholls *et al.* [118].

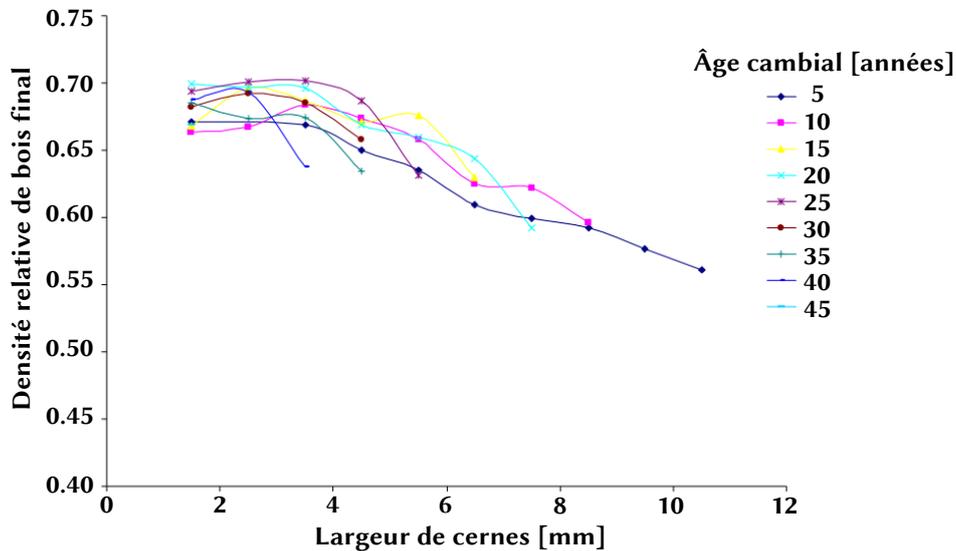


FIGURE 1.23 – Évolution de la densité relative du bois final en fonction de la largeur du cerne et de l'âge cambial obtenue expérimentalement pour des spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.), adaptée de Moreau [50].

tillon de bois et la masse anhydre du bois. Lorsque les cellules du bois sont dépourvues d'eau libre et d'eau liée, et qu'il ne reste que de l'eau combinée, le bois est qualifié d'anhydre. La masse anhydre est obtenue lorsque le bois a été séché à 103°C jusqu'à ce que la différence de masse entre deux mesures successives effectuées à deux heures d'intervalle soit inférieure à 0.1%, conformément à la norme française AFNOR NF EN 13183-1 [132]. La teneur en eau ne doit pas être confondue avec l'humidité relative h qui est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau et la pression de vapeur d'eau d'équilibre à la même température. Elle mesure donc le rapport entre la vapeur d'eau contenue dans l'air et sa capacité maximale à la contenir. Castera [133] a présenté une teneur eau de stabilisation pour des grumes de *Pinus pinaster* (Ait.) stockées pendant plusieurs mois en immersion de 190% pour les cernes d'aubier et de 60% pour les cernes de duramen. Ce gradient de teneur en eau est important et peut induire des contraintes élevées au niveau de la zone de transition aubier-duramen au cours du séchage [20]. La teneur en eau semble constante dans le duramen mais des variations de la teneur en eau persistent dans l'aubier avec des variations importantes possibles et de manière plus accentuée entre les phases de IW et FW (jusqu'à un coefficient multiplicateur de 4). De plus, des variations supplémentaires jusqu'à 50% de teneur en eau ont

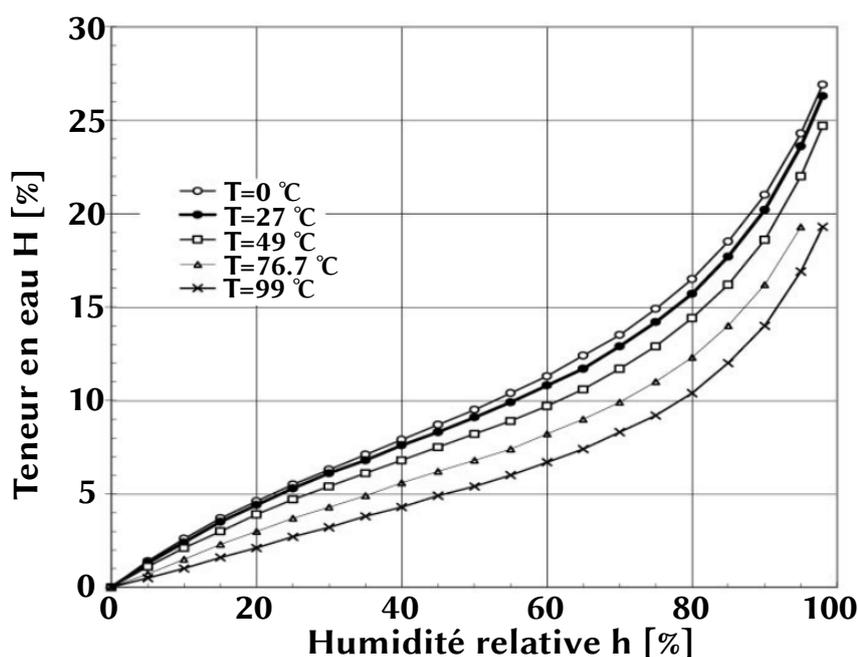


FIGURE 1.24 – Isothermes de sorption du bois pour plusieurs températures [139].

été enregistrées en fonction de la hauteur de l'arbre pour les résineux [88]. Les produits en *Pinus pinaster* (Ait.) sont généralement séchés jusqu'à 12% pour leurs utilisations industrielles, ce qui est le cas dans l'entreprise GB. La norme française AFNOR NF EN 13307-1 [134] indique que les mesures de déformations sur les produits bois doivent être effectuées après séchage avec une teneur en eau de 12%. La norme AFNOR NF EN 14220 [135] (Annexe A) indique qu'en cas de classe de service inconnue, la teneur en humidité doit être limitée à 16%. La norme AFNOR NF EN 942 [136] (Annexe B) indique que pour une charpente non-chauffée, $h \in [12\%, 19\%]$ à l'extérieur et $h \in [12\%, 16\%]$ à l'intérieur. Pour les structures chauffées, elle doit appartenir à $[9\%, 13\%]$. La norme AFNOR XP CEN/TS 13307-2 [137] précise que pour les classes de service 1, 2 et 3, la teneur en eau doit être respectivement égale à 12%, à $[12\%, 16\%]$ et éventuellement supérieure à 18%.

Isotherme d'adsorption-désorption et équilibre hygrométrique

Pour une température et une humidité relative de l'air données, le bois atteint un taux d'humidité d'équilibre (Equilibrium Moisture Content, EMC). Pour une température donnée, il est possible de tracer des isothermes de sorption qui relient l'humidité relative de l'air à la teneur en eau d'équilibre du bois. Ces isothermes sont relativement indépendantes de l'espèce [138] (contrairement à la cinétique de sorption qui dépend fortement de la densité et de la structure anatomique). Le point de saturation des fibres (PSF) est la teneur en eau du bois qui correspond à une saturation des parois cellulaires par l'eau liée avec une valeur de $[29, 31] \%$ pour le *Pinus pinaster* (Ait.) [119]. Le PSF subit une diminution dans le BC avec une valeur qui peut atteindre les 26.9% [71]. Au-delà, l'eau libre remplit les cavités cellulaires par capillarité et sa teneur en eau maximale dépend de la porosité du bois (jusqu'à 200% de teneur en eau [29]).

Les isothermes de sorption du bois dépendent de l'historique des variations thermo-hygriques. En effet, les pièces de bois subissent de nombreuses variations climatiques et une alternance entre des phases d'adsorptions et de désorptions au cours de leur cycle de vie. Une hystérésis de sorption apparaît ainsi dans le bois, régie par la désorption initiale (limite supérieure), l'adsorption

secondaire (limite inférieure), et les phases ultérieures entre ces deux limites, comme le montre la Fig. 1.25.

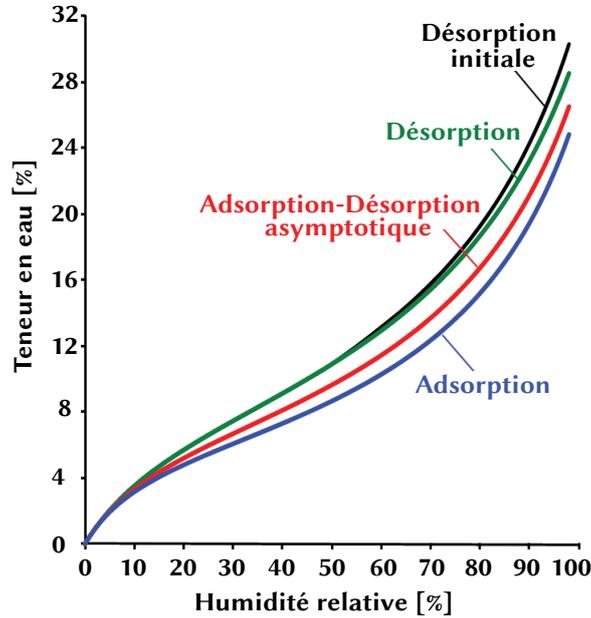


FIGURE 1.25 – Hystérésis de sorption pendant les phases d'adsorptions et de désorptions [124].

Modèle de sorption du *Pinus pinaster* (Ait.)

Plusieurs modèles analytiques existent pour exprimer la teneur en eau H du bois en fonction de la température T_{emp} et de l'humidité relative h . Ces modèles semblent être valables pour une plage de températures comprise entre 0°C et 100°C [140]. Elles peuvent être regroupées en deux approches différentes. La première, dite approche multicouche, considère que la sorption du bois est basée sur la surface d'échange. Les molécules d'eau « primaires » s'attachent à des sites de sorption spécifiques (-OH) à la surface du bois créant ainsi une nouvelle couche d'échange. La surface de cette couche permet l'apparition de nouveaux sites de sorption pour de nouvelles molécules d'eau. Une succession de couches apparaît ainsi sur les différents sites créés. La seconde approche évalue la sorption volumétrique des matériaux polymères composant le bois (cellulose, hémicellulose et lignine) et modélise la dynamique d'une solution eau-polymère. Les deux approches fournissent des équations qui relient T_{emp} et h à H . La validité des deux approches est examinée dans Simpson [140]. L'approche de la sorption surfacique semble être plus adaptée pour les faibles teneurs en eau et l'approche de la sorption volumique pour les teneurs en eau élevées. Il existe plusieurs modèles pour ces deux approches, tels que le modèle de Brunauer, Emmett et Teller (BET) [141], Dent [142] (sorption surfacique) et Hailwood-Horrobin [143] (solution eau-polymère). Dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), Lartigue et Puiggali (référéncé dans [138]) ont proposé une relation semi-empirique pour l'isotherme d'adsorption basée sur des résultats expérimentaux pour des échantillons provenant de la région des Landes :

$$\text{EMC}_{L-P} = \frac{\ln(Q)}{100 \ln(B')}. \quad (1.3)$$

où Q est défini comme :

$$Q = \frac{C'}{A'} - \ln h, \quad (1.4)$$

alors que les paramètres A' , B' et C' dépendent de la température T_{emp} (exprimée en Kelvin) et sont exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} A' &= -2.86 \cdot 10^{-5} T_{emp}^2 - 1.075 \cdot 10^{-2} T_{emp} + 10.238, \\ B' &= -5.414 \cdot 10^{-4} T_{emp} + 1.0134, \\ C' &= 4.976 \cdot 10^{-6} T_{emp}^2 - 2.667 \cdot 10^{-3} T_{emp} + 0.3546. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Malgré le fait que cette loi semi-empirique soit extraite de résultats expérimentaux sur le *Pinus pinaster* (Ait.), elle reste imprécise et souvent délaissée pour des modèles plus précis comme celui de Hailwood-Horrobin [143] qui est utilisée dans la suite de ce manuscrit :

$$EMC_{H-H} = \frac{1800}{M} \left[\frac{K h}{1 - K h} + \frac{K_1 K h + 2 K_1 K_2 K^2 h^2}{1 + K_1 K h + K_1 K_2 K^2 h^2} \right]. \quad (1.6)$$

où les paramètres M , K , K_1 et K_2 dépendent de la température T_{emp} (exprimée en Kelvin) et sont exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} M &= 2.8368 \cdot 10^{-4} T_{emp}^2 + 2.3468 T_{emp} - 330.03, \\ K &= -3.3289 \cdot 10^{-8} T_{emp}^2 + 4.7238 \cdot 10^{-4} T_{emp} + 0.68405, \\ K_1 &= 4.05 \cdot 10^{-5} T_{emp}^2 - 5.87818 \cdot 10^{-2} T_{emp} + 19.641, \\ K_2 &= -6.414 \cdot 10^{-6} T_{emp}^2 + 1.6795 \cdot 10^{-3} T_{emp} + 2.6172. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Modèle de transfert hygrique

Le phénomène physique du transfert d'humidité dans le bois peut être divisé en deux parties : au-dessus et en dessous du PSF. Au-dessus du PSF, le comportement physique du transfert d'eau n'est pas encore totalement clair et étudié. Il est généralement admis que dans cette phase, le bois présente un plan d'évaporation. Ce plan d'évaporation divise le bois en une zone humide vers le centre et une zone sèche vers l'extérieur du matériau qui sont régies respectivement par des phénomènes de transfert différents. En dessous du PSF, le matériau se situe dans le domaine hygroscopique. Le transfert d'eau est entièrement contrôlé par la diffusion de l'eau liée et par le transport de la vapeur d'eau. Les coefficients de ces deux types de transfert peuvent être combinés en un coefficient de diffusion total. Les déformations induites par variation hygrique ne se produisent que dans la phase sous le PSF [144, 145].

L'un des modèles de transfert d'humidité sous le PSF le plus courant est le modèle de diffusion totale transitoire. Ce modèle est basé sur les lois de diffusion de Fick [146, 147]. Il offre une précision suffisante en dessous du PSF contrairement à un modèle de diffusion linéaire.

Le modèle de diffusion totale transitoire est basé sur le transport de l'humidité induit par un gradient de teneur en eau. Clouet [29] a utilisé ce modèle dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) pour décrire l'état de contrainte se développant dans plusieurs configurations de lamellés-collés fabriqués à l'état vert. Deux paramètres régissent ce modèle : le coefficient d'émission de surface s_H et le coefficient de diffusion D_H . L'estimation de ces paramètres est fondamentale pour garantir la précision des résultats expérimentaux [148]. Le coefficient s_H reflète la résistance externe au transport de l'humidité et est influencé par la température, la vitesse, la viscosité, la densité du bois, la teneur en humidité et l'état de la surface [149]. Le coefficient de diffusion D_H est fonction de l'anatomie du bois, de la température et de la teneur en eau.

Considérant un volume donné V de bois caractérisé par une surface externe totale S et soumis à un flux d'humidité donné \mathbf{q}_H . La première loi de Fick peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}\mathbf{q}_H &= -\mathbf{D}_H \nabla H, \\ \dot{\mathbf{q}}_H &= -\dot{\mathbf{D}}_H \nabla H - \mathbf{D}_H \nabla \dot{H},\end{aligned}\quad (1.8)$$

où $\mathbf{D}_H(H)$ est la matrice de diffusion exprimée en fonction de la teneur en eau H qui est définie par trois coefficients de diffusion $D_m(H)$ le long des directions d'orthotropie $m = L, R, T$ [150] et ∇H est le vecteur de gradient d'humidité. Ces termes sont exprimés dans le système de coordonnées orthotropes local.

La formulation forte de la deuxième loi de Fick est la suivante :

$$\frac{\partial H}{\partial T} = \vec{\nabla} \cdot (\mathbf{D}_H \vec{\nabla} H) + Q_h, \quad (1.9)$$

où $\frac{\delta H}{\delta t}$ est le taux de variation de l'humidité et Q_h est le taux d'humidité apporté au volume par unité de temps. Les conditions aux limites associées à la formule ci-dessus sont généralement exprimées comme suit :

$$q_n = s_H(H) (H - H_o), \quad (1.10)$$

où $s_H(H)$ est le coefficient d'émission de surface exprimé en fonction du taux d'humidité H , tandis que $(H - H_o)$ est la différence initiale de taux d'humidité entre la surface externe S et le milieu environnant et q_n est le flux normal vers la surface d'échange.

Clouet [29] a trouvé expérimentalement des valeurs pour les propriétés hygriques du *Pinus pinaster* (Ait.) avec $D_m(H) \in [5, 10] \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $s_m(H) \in [6, 8] \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ avec $m = L, R, T$.

Le modèle de diffusion transitoire totale est bien adapté pour prédire le comportement du transfert d'humidité en dessous du PSF. Néanmoins, l'hypothèse d'un équilibre instantané entre l'eau liée et la vapeur d'eau ou l'utilisation de paramètres de séchage rapide peuvent entraîner des divergences avec les résultats expérimentaux [151]. Pour obtenir des résultats plus précis ou pour des applications pour des teneurs en eau supérieures au PSF, il est possible d'utiliser un modèle à séparation des phases ou de double diffusion, comme présenté par Krabbenhøft [151], Salin [152], Fortino *et al.* [153] et Frandsen *et al.* [154], en traitant séparément la physique de l'eau libre, de l'eau liée, de la vapeur d'eau et de l'air sec. Cependant, ce modèle ne prend pas en compte tous les phénomènes physiques qui peuvent se produire dans les polymères et les composites, appelés « effets non-Fickiens » [155].

Déformation hygroscopique

Les déformations hygroscopiques sont induites par les variations de la teneur en eau en dessous du PSF. En conséquence, le bois gonfle ou se rétracte pendant les phases d'adsorption ou de désorption. Au-dessus du PSF, les variations de la teneur en eau n'influencent pas les variations dimensionnelles (non-couplées au comportement mécanique) du bois [156]. En raison de la symétrie orthotrope du bois, les retraites et les gonflements provoqués par les variations de la teneur en eau dépendent fortement des directions orthotropes L , R et T . Ces déformations hygroscopiques ε_H sont régies par des coefficients de retrait/gonflement α_m en $\%/ \%$, qui décrivent les variations dimensionnelles S_m en $\%$ le long des directions $m = L, R, T$ pour une perte de teneur en eau de 1% sous le PSF :

$$\begin{aligned}\alpha_m &= \frac{S_m}{\text{PSF}}, \\ \varepsilon_H &= \alpha H, \\ \alpha^T &= [\alpha_L \ \alpha_R \ \alpha_T \ 0 \ 0 \ 0].\end{aligned}\quad (1.11)$$

Plusieurs études portent sur la caractérisation hygrique expérimentale du *Pinus pinaster* (Ait.) tempéré à environ 12% d'humidité dont les résultats sont présentés dans le Tab. 1.5. Brémaud *et al.* [71] ont mesuré les propriétés d'expansion hygrique du BC et du BN à partir de spécimens provenant de trois espèces de résineux dont le *Pinus pinaster* (Ait.) à une distance donnée de la moelle. En outre, Burgers [119] et Muñoz et Anta [157] ont présenté les propriétés physiques et hygriques de plusieurs spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) exprimées sous la forme de valeurs moyennes et de coefficients de variation. Enfin, Dumail et Castéra [158] ont présenté les propriétés d'expansions hygriques transversales de jeunes spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction de leurs densités relatives.

Bien que la distribution des coefficients d'hygroexpansion soit assez hétérogène, comme indiqué dans le Tab. 1.5, des coefficients constants ont très souvent été utilisés pour les études sur le *Pinus pinaster* (Ait.).

Les propriétés de retrait sont fortement influencées par plusieurs paramètres du bois. Dumail et Castéra [158] ont montré une forte corrélation pour une relation linéaire entre l'IF et les propriétés de retraits transverses (α_R et α_T).

Dans le cas de α_L , le coefficient longitudinal peut atteindre des valeurs autour de 1%/‰ dans le bois juvénile et le BC des résineux [88]. Pour *Pinus pinaster* (Ait.), Nicholls *et al.* [118] ont montré des variations significatives dans la zone de bois juvénile pour α_L compris dans l'intervalle $[-0.0033, 0.0100]$. Dans le BC, malgré une augmentation de la densité, α_R et α_T restent plus faibles que dans le bois normal avec une diminution estimée par Brémaud *et al.* [71] d'environ 43% – 54%. Dans le cas de α_L , Brémaud *et al.* [71]) ont trouvé une augmentation dans le BC jusqu'à une valeur de 0.10.

1.6 Propriétés mécaniques du *Pinus pinaster* (Ait.)

1.6.1 Propriétés élastiques

Loi de Hooke

Le comportement élastique du bois peut être modélisé par la loi de Hooke dont la matrice de souplesse \mathbf{S} est définie par 9 constantes élastiques indépendantes, c'est-à-dire, trois modules d'Young E_m ($m = L, R, T$), trois modules de cisaillement G_{mn} ($m, n = L, R, T$ et $m \neq n$), et trois coefficients de Poisson ν_{mn} ($m, n = L, R, T$ et $m \neq n$) :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix}, \quad (1.12)$$

où ε_m et σ_m sont respectivement la déformation normale et la contrainte normale, tandis que γ_{mn} et τ_{mn} sont respectivement la déformation et la contrainte de cisaillement.

Plusieurs études portent sur la caractérisation expérimentale des propriétés élastiques de *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle de l'arbre tempéré à environ 12% d'humidité dont les résultats sont présentés dans le Tab. 1.6. Cariou [159] a présenté les propriétés élastiques issues d'essais de traction et de cisaillement sur des échantillons choisis visuellement avec un angle de fil droit, des cernes d'accroissement à espacement constant, un rayon de courbure élevé et en absence de nœuds. Il a également présenté les résultats obtenus par Lahna [160] lors d'essais de compression. Xavier

TABLE 1.5 – Propriétés d'hydroexpansions de *Pinus pinaster* (Ait.) α_i avec $i = L, R, T$ provenant de plusieurs références.

Références	Provenance	Nb d'échantillons	Âge de l'arbre [années]	α_T [%/‰]	α_R [%/‰]	Ratio moyen α_T/α_R	α_L [%/‰]
Muñoz et Anta [157]	Galicie (Spain)	22	10-15	0.18-0.27	0.09-0.22	1.68	0.000-0.170
Dumail et Castéra [158]	Gironde (France)	862	10-15	0.15-0.35	0.05-0.20	1.6	/
Burgers [119]	Gard (France)	57	/	0.21-0.41	0.11-0.26	2.12	/
Brémaud <i>et al.</i> [71]	Gironde (France) Mean of 3 softwoods	14	/	0.28	0.14	2	0.007

[161] et Xavier *et al.* [162, 163] ont mesuré les propriétés mécaniques de cisaillement d'échantillons de bois sans défauts visibles extraits d'un arbre *Pinus pinaster* (Ait.) âgé de 74 ans. Les propriétés sont évaluées grâce à trois tests de cisaillement différents, la méthode Iosipescu, la méthode Off-axis et la méthode Arcan. En outre, Santos *et al.* [164] ont présenté les résultats des essais de traction réalisés par Pereira [165] pour caractériser les modules d'Young et les coefficients de Poisson. Pereira *et al.* [166] utilisent une méthode anisotrope reposant sur la corrélation d'images numériques et des essais de traction pour évaluer les propriétés élastiques dans le plan transversal des échantillons. Enfin, Santos [167] a déterminé le module d'Young longitudinal, le module de flexion et les propriétés de résistance de plusieurs spécimens de bois sans défauts visibles (avec une variabilité de la densité et de la largeur des cernes de croissance) par le biais d'essais de traction et de compression (parallèles et transversaux au grain), d'essais de cisaillement et d'essais de flexion.

Variabilité des propriétés élastiques

Comme tous les matériaux naturels, *Pinus pinaster* (Ait.) est caractérisé par une variabilité importante des propriétés élastiques qui est plus importante à l'intérieur de l'arbre [168]. Guitard [30] a établi des modèles pour prédire les propriétés élastiques des essences de feuillus et de résineux en fonction de leur densité W_d . Les équations suivantes décrivent les propriétés élastiques en [MPa] des résineux standard.

$$\begin{aligned} E_L &= 13100 + 41700(W_d - 0.45), & \frac{E_R}{\nu_{RT}} &= 20250 + 5280(W_d - 0.45), & G_{RT} &= 83.6 + 228(W_d - 0.45), \\ E_R &= 1000 + 2370(W_d - 0.45), & \frac{E_L}{\nu_{LR}} &= 34200 + 117000(W_d - 0.45), & G_{LT} &= 745 + 989(W_d - 0.45), \\ E_T &= 636 + 1910(W_d - 0.45), & \frac{E_T}{\nu_{LT}} &= 30800 + 101000(W_d - 0.45), & G_{LR} &= 861 + 2080(W_d - 0.45). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), Xavier *et al.* [162, 163] ont caractérisé les modules de cisaillement de *Pinus pinaster* (Ait.) pour les relier avec l'infra-densité IF $\in [0.53, 0.63]$, bien qu'avec des coefficients de détermination R^2 relativement faibles. Les relations proposées pour relier les modules de cisaillement en [MPa] à l'IF sont les suivantes :

$$\begin{aligned} G_{LR} &= 2402 \text{ IF} & \text{avec} & R^2 = 0.711, \\ G_{LT} &= 2072 \text{ IF} & \text{avec} & R^2 = 0.255, \\ G_{RT} &= 495 \text{ IF} & \text{avec} & R^2 = 0.307. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Dans Xavier *et al.* [163], de nouvelles relations sont présentés en fonction de IF $\in [0.57, 0.69]$ et sont les suivantes :

$$\begin{aligned} G_{LR} &= 500\text{IF} + 1020 & \text{avec} & R^2 = 0.050, \\ G_{LT} &= 960\text{IF} + 500 & \text{avec} & R^2 = 0.056, \\ G_{RT} &= 600\text{IF} + 160 & \text{avec} & R^2 = 0.108. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Les propriétés élastiques sont également influencées par les variations de la teneur en eau en dessous du PSF. Au-dessus de ce seuil, il est considéré que les variations de la teneur en eau n'influencent pas les propriétés élastiques [169].

L'influence de la teneur en eau sur les propriétés élastiques du bois est directement dérivée du comportement des polymères composant les parois cellulaires du bois [29]. Gerhards [170] a fourni un état de l'art sur les variations des propriétés élastiques en fonction de la teneur en eau. Des variations de 15% à 20% pour les propriétés élastiques ont été enregistrées pour une variation de la teneur en eau de 12% à 20%. Guitard [30] a étudié l'évolution des modules d'élasticité et de cisaillement sur une large gamme de teneur en eau. Entre 0 et 6% de teneur en eau, tous les modules subissent une légère augmentation autour de 5% avant de diminuer linéairement lorsque la teneur en eau passe de 6 à 20%. Enfin, une stabilisation des propriétés élastiques se produit autour du

TABLE 1.6 – Modules d'Young E_L , E_R et E_T , modules de cisaillement G_{RT} , G_{TL} et G_{LR} et coefficients de Poisson ν_{RT} , ν_{TL} et ν_{LR} dans le système de référence cylindrique local pour le *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction de plusieurs densités relatives correspondantes W_d et de la teneur en eau de mesure H [%] et extraits de plusieurs études.

Référence	E_L [GPa]	E_R [GPa]	E_T [GPa]	G_{RT} [MPa]	G_{TL} [MPa]	G_{LR} [MPa]	ν_{RT}	ν_{TL}	ν_{LR}	W_d	H [%]
Cariou [159]	11.4	0.94	0.70	200	1615	1350	0.58	0.03	0.32	0.49-0.54	11.8-13.5
Lahna [160]	16.31	2.130	1.340	120	720	2360	0.51	0.034	0.56	/	11.3
Santos <i>et al.</i> [164]	15.1	1.91	1.01	280	1340	1480	0.586	0.051	0.471	/	/
Xavier <i>et al.</i> [162]	/	/	/	286	1220	1410	/	/	/	0.578-0.589	10-12
Iosipescu Test	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Xavier <i>et al.</i> [162]	/	/	/	/	1040	1110	/	/	/	0.538-0.582	10-12
Off-axis Shear Test	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Xavier <i>et al.</i> [163]	/	/	/	239	1090	1330	/	/	/	0.608-0.660	11
Arcan Test	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Santos [167]	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Measure 1	13.2	/	/	/	/	/	/	/	0.46	0.46	/
Measure 2	15.7	/	/	/	/	/	/	/	0.35	0.60	/
Table 4.25	16.11-17.77	/	/	/	/	/	/	/	/	0.635-0.725	/
Pereira <i>et al.</i> [166]*	/	1.4-2.6	0.4-1.5	110-333	/	/	0.53-0.95	/	/	0.58	/

* Anisotropic based method

TABLE 1.7 – Propriétés des nœuds de *Pinus pinaster* (Ait.) [67].

Modules de Young transverses [MPa]	$E_R = E_T = 400$
Coefficient de Poisson transverse	$\nu_{RT} = 0.4$
Modules de cisaillement transverse [MPa]	$G_{RT} = 143$

PSF. Guitard [30] a proposé des formules empiriques pour calculer les modules d'élasticité et de cisaillement en fonction de la teneur en eau H.

$$\begin{aligned} E_L(H) &= E_L(H_{ref}) (1 - 0.015 (H - H_{ref})), & G_{RT}(H) &= G_{RT}(H_{ref}) (1 - 0.030 (H - H_{ref})), \\ E_R(H) &= E_R(H_{ref}) (1 - 0.030 (H - H_{ref})), & G_{TL}(H) &= G_{TL}(H_{ref}) (1 - 0.030 (H - H_{ref})), \\ E_T(H) &= E_T(H_{ref}) (1 - 0.030 (H - H_{ref})), & G_{LR}(H) &= G_{LR}(H_{ref}) (1 - 0.030 (H - H_{ref})). \end{aligned} \quad (1.16)$$

où $E_m(H)$, $G_{mn}(H)$ ($m, n = L, R, T$ et $m \neq n$) sont respectivement les modules de Young et modules de cisaillement exprimés pour $H_{ref}=12\%$, la teneur en eau de référence.

Enfin, la température influence également les propriétés élastiques. Des relations empiriques existent pour décrire la variation des modules d'Young en fonction de la température :

$$E_m(T_1) = E_m(T_2) [1 - \alpha_{th,m} (T_2 - T_1)], \quad (1.17)$$

où $E_m(T_p)$ ($m = L, R, T$) sont les module d'Young exprimés à la température T_p [°C] avec $p = 1, 2$ et $\alpha_{th,m}$ ($m = L, R, T$) sont les coefficients d'expansion thermique.

De plus, les propriétés mécaniques dépendent de la position de l'échantillon dans les troncs [171]. Dans la direction radiale, les propriétés élastiques ont tendance à augmenter avec la distance r à la moelle. Dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), Machado et Cruz [172] ont enregistré une augmentation des modules élastiques de 99% en passant de 10% à 90% de la distance totale de la moelle pour des arbres de 50 ans, ce qui peut s'expliquer par la présence de bois juvénile dans les premiers cernes plus proches de la moelle [50]. Sanz *et al.* [18] a montré des variations de 55% à 65% du module d'Young longitudinal entre le bois juvénile et le bois adulte sans défauts. En ce qui concerne la variation des propriétés mécaniques suivant la direction longitudinale, Lundström et Stoeckli [171] ont observé une diminution des modules d'élasticité avec la hauteur de l'arbre pour deux espèces de résineux. En ce qui concerne *Pinus pinaster* (Ait.), Moreau [50] a observé une diminution du module de Young longitudinal avec la hauteur de l'arbre. Cela s'explique principalement par la proportion plus élevée de bois juvénile dans la partie la plus haute des arbres, à proximité du houppier vivant et des branches, comme le montre la Fig. 1.26.

Les défauts tels que le BC et les nœuds influencent fortement les propriétés élastiques. Les singularités, comme les nœuds et les poches de résine, jouent un rôle d'inclusion car leurs propriétés sont différentes de celles de la matrice du bois, comme indiqué dans Tab. 1.7. La sylviculture joue également un rôle important dans la croissance et les propriétés du bois, comme l'illustre la Fig. 1.26. Moreau [50] a présenté l'effet de différents scénarios sylvicoles sur les propriétés élastiques de *Pinus pinaster* (Ait.). Les trois scénarios décrits dans Moreau [50] sont un scénario de haute qualité avec une longue rotation et une croissance modérée, un scénario de rotation traditionnelle et un scénario de rotation courte avec des coupes à blanc. Par exemple, la diminution des durées de rotation entraîne une augmentation de la proportion de bois juvénile et donc une diminution des modules élastiques. Dans le cas de la variation du taux de croissance des résineux, les espèces présentant une transition abrupte entre le bois initial et le bois final, telles que *Pinus pinaster* (Ait.), ne présentent pas de changements dans leurs propriétés élastiques.

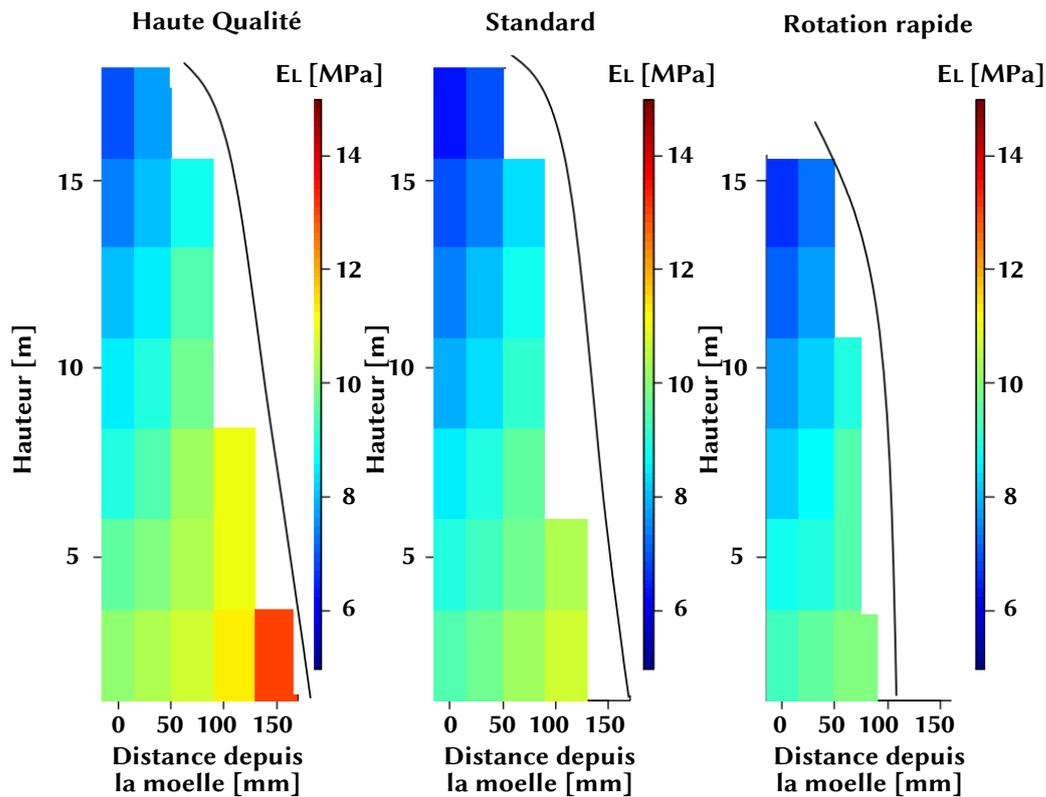


FIGURE 1.26 – Évolution expérimentale intra-arbre du module d'élasticité longitudinal en fonction de la hauteur de l'arbre, de la distance à la moelle et des options sylvicoles pour le *Pinus pinaster* (Ait.), adaptée de Moreau [50].

1.6.2 Propriétés de résistance

Les propriétés mécaniques les plus couramment utilisées pour évaluer la rupture du bois sont la contrainte limite en flexion, les valeurs de contrainte ultime en compression, la résistance en traction et la résistance au cisaillement parallèlement et perpendiculairement au fil du bois [124]. La résistance du bois est différente en traction et en compression. Cette différence s'explique par le comportement distinct des éléments tubulaires constituant la micro-structure du bois. En effet, ils présentent un micro-flambage en compression et une rupture fragile en traction. Le Tab. 1.8 regroupe les propriétés de résistance *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle de l'arbre disponibles dans la littérature avec le module de rupture (MOR); la contrainte axiale ultime $\sigma_{i,\tau}^u$ ($i = R, T, L$) à la fois en traction ($\tau = t$) et en compression ($\tau = c$); les contraintes de cisaillement limites dans les trois plans caractéristiques, c'est-à-dire, LR , LT et RT , en termes de niveau de contrainte auquel la première fissure apparaît $\sigma_{s,co}$, de contrainte en cisaillement ultime $\sigma_{s,u}$, et de résistance au cisaillement $\sigma_{s,s}$.

Des résultats expérimentaux ont été obtenus grâce à :

- tests Arcan modifié dans Grazide *et al.* [173];
- méthode de classement vibratoire dans Pommier *et al.* [168];
- 4-points bending tests in Moreau [50], Morgado *et al.* [174] et Morgado *et al.* [175] qui s'appuient sur les normes françaises comme AFNOR NF EN 14251 [176], AFNOR NF EN 408+A1 [177] et AFNOR NF EN 384+A2 [178];
- Tests de compression axiale dans Burgers [119].

Dans le cas de Cruz *et al.* [179], les propriétés de résistance sont extraites de la norme portugaise NP 4305 [180]. Pour Balmori *et al.* [181], les essais ne sont pas présentés et le lecteur est renvoyé à la norme européenne ISO 13061-6 [182] et aux deux normes espagnoles UNE 56535 et UNE-EN 408 :2011+A1 :2012 [183, 184].

Variabilité des propriétés de résistance

Les propriétés de résistance varient (de la même manière que les propriétés élastiques) en fonction de la position dans le tronc et des conditions climatiques. En ce qui concerne la direction radiale, les variations des propriétés de résistance suivent les mêmes tendances que les propriétés élastiques [171, 50]. Pour *Pinus pinaster* (Ait.), Machado et Cruz [172] ont enregistré une augmentation des propriétés de résistance proportionnelle à la distance de la moelle. Notamment, à partir d'échantillons extraits entre 10 et 90% du rayon total, une augmentation de 50 à 60% a été observée pour la résistance à la flexion et une augmentation de 39 à 48% pour la résistance à la compression parallèle au grain, avec une valeur stabilisée pour les deux propriétés à 50% du rayon total. Enfin, pour la résistance à la traction perpendiculaire au grain, une première augmentation de 23% a été mesurée entre 10% et 50% de rayon total, avant une seconde augmentation de 33% entre 50% et 90% de rayon total, comme illustré sur la Fig. 1.27. Les propriétés de résistance varient

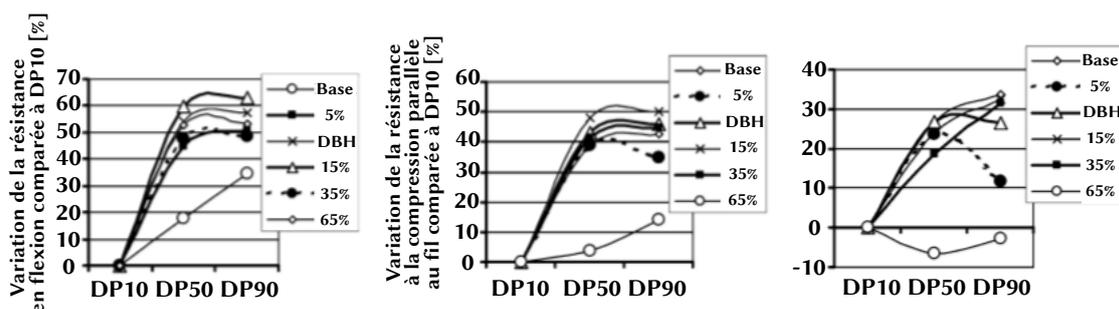


FIGURE 1.27 – Variation de a) la résistance à la flexion, b) la résistance à la compression parallèle au grain, et c) la résistance à la traction perpendiculaire au grain par rapport aux propriétés mesurées à 10 % du rayon total DP10 en fonction du rayon à partir de la moelle et du pourcentage de la hauteur totale pour le *Pinus pinaster* (Ait.), adaptée de Machado et Cruz [172].

également dans le sens longitudinal [171]. Moreau [50] a observé une réduction des propriétés de résistance dans les parties les plus hautes d'un arbre. Machado et Cruz [172] ont enregistré respectivement des réductions de 12, 32 et 23% de la résistance à la flexion sur des échantillons prélevés entre 0 et 65% de la hauteur totale de l'arbre et à une distance respectivement de 10, 50 et 90% du rayon total de la moelle. Ils ont constaté des réductions de 29% et 24% pour la résistance à la compression parallèle au grain et de 30% pour la résistance à la traction perpendiculaire au grain à la même hauteur pour des distances d'échantillonnage à partir de la moelle de 50% et 90% du rayon total, comme le montre Fig. 1.28. Dans le bois juvénile, les propriétés de résistance sont inférieures à celles du bois adulte chez les espèces de résineux. Cette dégradation de la résistance mécanique dans le bois juvénile pourrait s'expliquer par une épaisseur plus faible de la paroi cellulaire et des angles de micro-fibrilles plus importants. Dans *Pinus pinaster* (Ait.), Machado et Cruz [172] ont rapporté des variations moyennes de 30% de la résistance à la flexion, de 20% de la compression parallèle au fil et de 15% de la résistance à la tension perpendiculaire au fil par rapport au bois adulte.

Dans le BC, les résistances à la traction et à l'impact sont réduites [67]. Les nœuds et les

TABLE 1.8 – Propriétés de résistance de référence exprimées en termes de : module de rupture (MOR) ; contrainte axiale ultime $\sigma_{i,c}^u$ ($i = R, T, L$) à la fois en traction ($\tau = t$) et en compression ($\tau = c$) ; contraintes de cisaillement limites dans les trois plans caractéristiques LR, LT et RT, en termes de niveau de contrainte auquel la première fissure apparaît, c'est-à-dire $\sigma_{s,co}$, de contrainte de cisaillement ultime, c'est-à-dire $\sigma_{s,u}$, et de résistance au cisaillement, c'est-à-dire $\sigma_{s,s}$ pour le *Pinus pinaster* (Ait.) et extraites de plusieurs études.

Référence	MOR [MPa]	$\sigma_{L,t}^u$ [MPa]	$\sigma_{R,t}^u$ [MPa]	$\sigma_{T,t}^u$ [MPa]	$\sigma_{L,c}^u$ [MPa]	$\sigma_{R,c}^u$ [MPa]	$\sigma_{T,c}^u$ [MPa]	σ_{LR} [MPa]	σ_{LT} [MPa]	σ_{RT} [MPa]
Santos <i>et al.</i> [164]	/	97.5	4.20	7.93	/	/	/	/	/	/
Graziade <i>et al.</i> [173]	/	85.95	3.7	3.7	/	/	/	7-12	7-12	/
Pommier <i>et al.</i> [168]	17.2-37.2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Burgers [119]	/	/	/	/	44.8	/	/	/	/	/
Moreau [50]	23-82	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Xavier <i>et al.</i> [162]	/	/	/	/	/	/	/	15.9 ($\sigma_{s,co}$)	15.9 ($\sigma_{s,co}$)	2.38 ($\sigma_{s,co}$)
Iosipescu Test	/	/	/	/	/	/	/	16.9 ($\sigma_{s,u}$)	18.1 ($\sigma_{s,u}$)	4.35 ($\sigma_{s,u}$)
Xavier <i>et al.</i> [162]	/	/	/	/	/	/	/	14.1 ($\sigma_{s,u}$)	14.0 ($\sigma_{s,u}$)	/
Off-Axis Test	/	/	/	/	/	/	/	16.5 ($\sigma_{s,s}$)	16.6 ($\sigma_{s,s}$)	/
Xavier <i>et al.</i> [163]	/	/	/	/	/	/	/	15.1 ($\sigma_{s,co}$)	11.7 ($\sigma_{s,co}$)	/
Arcan Test	/	/	/	/	/	/	/	15.9 ($\sigma_{s,u}$)	15.2 ($\sigma_{s,u}$)	4.6 ($\sigma_{s,co}$)
Sanz <i>et al.</i> [18]	62.0-151.9	46-162	/	/	34.0-68.5	/	/	/	/	/
Jodin et Milton [88]	7-80	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Morgado <i>et al.</i> [174]	69.3	/	/	/	37.7	/	/	/	/	/
Morgado <i>et al.</i> [175]	82.7	/	/	/	40.9	/	/	/	/	/
Santos <i>et al.</i> [164]	/	93.7	/	/	51.9	/	/	/	/	/
Balmori <i>et al.</i> [181]	54.75	71.04	/	/	42.50	/	/	/	/	/
Cruz <i>et al.</i> [179]	18-35	11-21	0.4	0.4	18-25	6.9-7.3	6.9-7.3	/	/	2.0-3.4

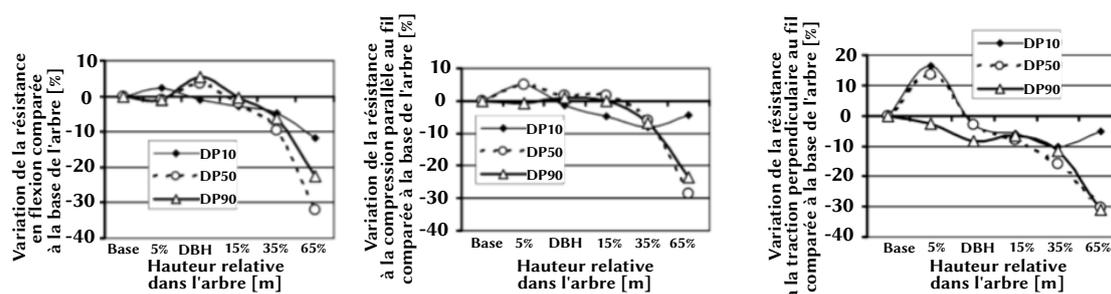


FIGURE 1.28 – Variation de a) la résistance à la flexion, b) la résistance à la compression parallèle au grain, et c) la résistance à la traction perpendiculaire au grain par rapport aux propriétés mesurées à la base de l’arbre en fonction du pourcentage de la hauteur totale et du rayon à partir de la moelle pour le *Pinus pinaster* (Ait.), adaptée de Machado et Cruz [172].

poches de résine influencent grandement la résistance mécanique et la qualité de l’arbre. Les caractéristiques géométriques d’un nœud (taille et position) et la déviation de la pente de fil résultante impliquent une diminution de la résistance à la flexion des poutres en bois [173].

Enfin, concernant l’influence de la densité sur les propriétés de résistance, peu d’informations sont disponibles dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.). Sanz *et al.* [18] affirment qu’il existe une relation affine entre la densité relative et la résistance à la traction dans le sens des fibres. Xavier *et al.* [163] ont présenté des relations entre l’infra-densité IF et les résistances au cisaillement avec des coefficients de détermination R^2 relativement faibles, qui s’appliquent pour des valeurs de $IF \in [0.57, 0.69]$:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{LR} &= 0.57IF + 15.44 && \text{avec } R^2 = 0, \\
 \sigma_{LT} &= 44.09IF + 15.02 && \text{avec } R^2 = 0.274, \\
 \sigma_{RT} &= 8.39IF + 0.80 && \text{avec } R^2 = 0.212.
 \end{aligned}
 \tag{1.18}$$

1.7 Conclusions

L’étude bibliographique a permis de regrouper une grande variété d’informations extraites de la littérature scientifique sur les propriétés d’une espèce profondément enracinée dans les Landes de Gascogne : le *Pinus Pinaster* (Ait.). Tout d’abord, en présentant la propagation géographique de cette espèce à travers l’Histoire, ce travail a permis d’identifier des provenances similaires à celles des Landes de Gascogne en Europe du Sud-Ouest et obtenir des informations précises sur l’essence de *Pinus pinaster* (Ait.) *ssp. atlantica*. Ensuite, le chapitre a permis de mettre en évidence les particularités du *Pinus pinaster* (Ait.) en tant que matériau naturel hautement hétérogène et anisotrope, ainsi que la complexité des structures multi-échelles de cette essence et de souligner la forte variabilité des propriétés en fonction de multiples facteurs génétiques, climatiques et environnementaux. En outre, ce travail met en évidence le manque d’informations sur les propriétés de *Pinus Pinaster* (Ait.), et en particulier sur la variabilité intra-arbre, qui limite le développement d’un modèle de comportement hygro-élastique adapté aux LCAs. Les paramètres de croissances influencent l’activité cambiale, responsable de la formation des cellules de bois, qui entraînent des modifications physiologiques du bois et engendrent une variabilité importante des propriétés de *Pinus pinaster* (Ait.) définies dans un repère local cylindrique associé aux grumes. L’influence des paramètres de croissance est particulièrement importante sur les propriétés géométriques et physiques du *Pinus pinaster* (Ait.). Toutefois, des données expérimentales conséquentes existent

dans la littérature scientifique qui permettent d'estimer les propriétés géométriques et physiques (fortement corrélées) du *Pinus pinaster* (Ait.), ainsi que leur variabilité, à l'échelle intra-cerne et inter-cernes en fonction de la position relative dans les grumes, et spécifiquement en fonction de la distance depuis la moelle et de la hauteur. Par addition, le chapitre a permis de montrer l'influence d'une propriété physique spécifique, la densité relative, sur les propriétés hygriques et mécaniques, qui sont nécessaires au développement d'un modèle de déformation hygro-élastique de produits LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.).

En définitive, le chapitre a permis de confirmer le manque d'informations sur les propriétés de *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle intra-arbre qui limite le développement d'un modèle fidèle de comportement hygro-élastique. Cependant, une littérature scientifique suffisante existe sur les propriétés géométriques et physiques aux échelles inférieures, c'est-à-dire aux échelles intra-cerne et inter-cernes. Ces informations, combinées aux relations entre densité relative et propriétés hygriques et mécaniques existantes, permettent le développement d'un modèle multi-échelles nécessaire à l'obtention des propriétés hygro-élastique du *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle intra-arbre.

Le chapitre suivant présente la stratégie de modélisation qui permet de remonter aux propriétés hygriques et mécaniques nécessaires à l'échelle intra-arbre de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) nécessaire au modèle hygro-élastique utilisé pour étudier le comportement de produits LCAs.

Modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique de lamelles en *Pinus pinaster* (Ait.)

La modélisation du comportement hygro-mécanique de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) nécessite une connaissance détaillée des propriétés des lamelles constituantes en fonction de leur géométrie et de leur position relative dans les grumes. Des travaux comme l'étude de Nguyen [28] et la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134] Annexe A se concentrent sur le comportement hygro-mécanique de LCAs en résineux compte tenu exclusivement de l'influence du motif de cernes (dosse, quartier) sur les déformations et contraintes hygro-mécaniques des lamelles au cours de variations climatiques. Aucune étude ne donne d'informations précises de l'influence de la position relative des lamelles dans les grumes sur leurs propriétés hygro-élastiques dans le cas du *Pinus pinaster* (Ait.).

Dans ce travail de thèse, une recherche approfondie de l'état de l'art a permis de mettre en évidence le manque d'informations sur les propriétés hygriques et mécaniques du *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle intra-arbre qui limite l'obtention des propriétés des lamelles en fonction de leur position relative dans les grumes. Cependant, les connaissances sur les propriétés géométriques et physiques intra-cerne et inter-cernes ainsi que leurs relations avec les propriétés hygriques et mécaniques sont suffisantes pour permettre une modélisation paramétriques de grumes de *Pinus pinaster* (Ait.). Cette modélisation de grumes « synthétiques » constitue la base d'une modélisation multi-échelles dont l'objectif est de modéliser le comportement de toute typologie de lamelles, définie en fonction de leur position relative dans les grumes.

La première partie du chapitre est consacrée à la décomposition du problème en échelles de travail depuis l'échelle la plus petite utilisée dans ce manuscrit, c'est-à-dire l'échelle intra-cerne, jusqu'à l'échelle des LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.). La deuxième partie du chapitre se concentre sur la construction d'un modèle paramétrique de génération de grumes de *Pinus pinaster* (Ait.). Le modèle paramétrique est établi par la discrétisation des propriétés géométriques et physiques en fonction du numéro de cernes depuis la moelle à partir des données expérimentales tirées de la littérature scientifique. La troisième partie du chapitre est, quant à elle, destinée à l'établissement des propriétés hygro-mécaniques à l'échelle microscopique des parties de IW et de FW qui composent chaque cerne en fonction de leur position relative dans les grumes. Ces propriétés sont établies à partir de données expérimentales issues de la littérature scientifique et sont exprimées en fonction de la densité relative. La quatrième partie du chapitre est concentrée sur la détermination des propriétés à l'échelle mésoscopique de volumes de *Pinus pinaster* (Ait.) constitués de l'alternance de cernes de IW et de FW grâce à une méthode d'homogénéisation numérique basée sur l'équivalence de l'énergie de déformation des milieux périodiques. Finalement, la dernière partie du chapitre est réservée à la caractérisation des propriétés de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) qui repose sur l'utilisation d'entités NURBS (Non-Uniform Rational Basis-Spline) dont la fonction est d'approximer de manière continue les propriétés hygriques et élastiques des lamelles en fonc-

tion de leur position relative dans les grumes à partir des données discrétisées obtenues à l'échelle précédente.

2.1 Définition des échelles de modélisation

Les produits en bois comme les LCAs sont finalement des composites stratifiés biosourcés, dont les caractéristiques principales sont l'hétérogénéité et l'anisotropie qui sont définies à plusieurs échelles de travail et qui sont illustrées en Fig. 2.1 :

- Échelle microscopique : échelle des cernes d'accroissement constitués par l'accumulation de cellules ligneuses (90% de trachéides longitudinales) et produits par le cambium. Chaque cerne d'accroissement peut être décomposé dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) d'une partie IW et d'une partie FW ;
- Échelle mésoscopique : échelle correspondante aux volumes obtenus par l'empilement de plusieurs cernes et considérés comme des composites stratifiés ;
- Échelle macroscopique locale : échelle des lamelles de bois extraites de grumes ;
- Échelle macroscopique globale : échelle des LCAs fabriqués à partir du collage et de l'aboutage de multiples lamelles de bois.

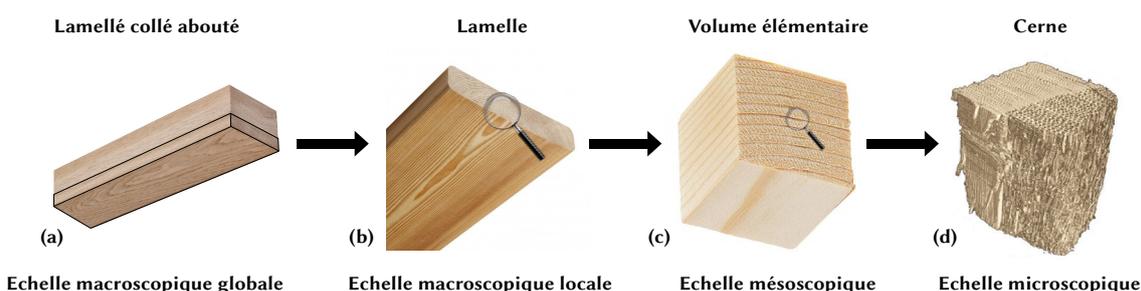


FIGURE 2.1 – Décomposition des LCAs en échelles de modélisation. (a) Échelle macroscopique globale - image originelle de Ducerf Group¹ (b) Echelle macroscopique locale - image originelle de deck-linea² (c) Échelle mésoscopique - image originelle de Tiki³ (d) Échelle microscopique - image adaptée de Paterna *et al.* [185].

Plusieurs autres échelles de travail existent pour des dimensions bien inférieures comme l'échelle cellulaire qui correspond à la structure cellulaire multi-couches du bois et l'échelle nanoscopique qui définit l'échelle des composites fibreux de bois (micro-fibrilles de cellulose dans une matrice d'hémicellulose et de lignine) qui constituent les différents parois cellulaires végétales. Pour évaluer les propriétés des résineux à l'échelle cellulaire, les études de Harrington *et al.* [186], Persson [187] et Kucíková *et al.* [188] ont proposé des modèles analytiques et numériques multi-échelles pour déterminer les propriétés élastiques et hygriques des couches de la paroi cellulaire à partir des propriétés de ses polymères constitutifs avant de calculer les propriétés globales de la paroi cellulaire à une teneur en eau d'environ 12%. Ces échelles ne sont pas prises en considération dans la suite de ce manuscrit car il n'y a pas assez d'informations disponibles dans la littérature scientifique sur la structure cellulaire des parois en *Pinus pinaster* (Ait.) et particulièrement sur l'orientation des composites fibreux intra-couche.

1. <https://www.ducerf.com>

2. <https://www.deck-linea.com>

3. <https://tiki.vn>

2.2 Génération de grumes « synthétiques » de *Pinus pinaster* (Ait.)

Les différentes échelles de modélisation permettent de progressivement obtenir les propriétés hygro-mécaniques de lamelles de LCAs à partir des propriétés initiales des cernes de IW et FW en fonction de leur position relative dans les grumes. Premièrement, un modèle paramétrique des propriétés géométriques et physiques est établi à l'échelle microscopique et discrétisé en fonction du numéro de cernes depuis la moelle. Ensuite, une méthode d'homogénéisation numérique basée sur l'équivalence de l'énergie de déformation des milieux périodiques permet d'obtenir les propriétés équivalentes de volumes de *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle mésoscopique composés par l'empilement de cernes de IW et FW en fonction de leur position relative dans les grumes. Enfin, des entités NURBS sont utilisées comme métamodèle pour obtenir une évolution continue des propriétés hygro-élastiques de lamelles de LCAs à l'échelle macroscopique locale en fonction de leur position relative dans des grumes à partir de propriétés discrétisées de volumes de *Pinus pinaster* (Ait.). Il est fondamental de réaliser dans un premier temps un modèle paramétrique de grumes « synthétiques » constituées par la fabrication additive de cernes produits par le cambium afin de pouvoir obtenir les propriétés physiques nécessaires à la détermination des propriétés de IW et de FW à l'échelle microscopique tout en prenant en compte la variabilité associée. En effet, il existe dans la réalité une infinité de spécimens de *Pinus pinaster* (Ait.) différents dont les propriétés géométriques et physiques sont variables et dépendent de multiples facteurs comme les caractéristiques du biotope, les interactions avec la biocénose, l'environnement climatique, la sylviculture et le vieillissement des arbres. Comme l'évaluation des propriétés à chacune des échelles est réalisée en fonction de la position relative des objets étudiés dans les grumes, le développement du modèle paramétrique est prioritaire et une étude stochastique doit être réalisée sur les propriétés géométriques, physiques, hygriques et élastiques à chacune des étapes de la modélisation des propriétés des lamelles de LCAs.

2.2.1 Hypothèses à la base de la modélisation de grumes de bois

Afin de générer des modèles semi-réalistes, à différentes échelles, de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) il est nécessaire de formuler certaines hypothèses simplificatrices permettant d'exploiter les données disponibles dans la littérature scientifique. Plusieurs hypothèses sont émises pour construire le modèle paramétrique de la grume de bois :

1. Le tronc est considéré comme un cylindre parfait avec une moelle centrée. L'influence des facteurs externes tels que la lumière, la gravité et le vent est donc négligée ;
2. La variabilité dans la direction longitudinale (direction de l'orientation de la tige) des propriétés du bois due à l'angle conique, à l'angle de fil et à la proximité du houppier vivant n'est pas prise en compte ;
3. La grume est modélisée sans présence de BC de par le manque d'informations dans la littérature scientifique de la répartition intra-arbre de BC et de sa variabilité dans des populations de *Pinus pinaster* (Ait.).
4. L'influence du MFA sur les propriétés effectives du bois est négligée dans un premier temps à cause du manque d'information disponible dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) et particulièrement dans le bois juvénile ;
5. La présence de défauts tels que les nœuds et les poches de résine est négligée. Les produits en bois de l'entreprise GB sont purgés de tous défauts externes qui ne sont donc pas considérés dans ce travail de thèse ;

6. La formation du duramen n'est pas prise en considération. En effet, Berthier [90] n'a pas montré de différences décisives dans les propriétés mécaniques entre l'aubier et le bois de cœur dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.);
7. Les cernes d'accroissement sont supposés concentriques à la moelle. En outre, ils sont considérés comme composés de deux phases, à savoir IW et FW, en raison de la transition abrupte entre leurs densités respectives pour le *Pinus pinaster* (Ait.), comme mentionné par Moreau [50]. La probabilité de formation d'un faux-cerne est considérée comme nulle.
8. Une hypothèse supplémentaire est faite pour le bois juvénile. La modélisation du bois juvénile et du bois adulte est traitée en évaluant leur influence sur les propriétés physiques. La limite moyenne habituelle entre le bois juvénile et le bois adulte est estimée à 12 ans, comme présenté dans Moreau [50], et est considérée comme définitivement terminée à 15 ans dans ce manuscrit.

Quatre paramètres, à savoir la largeur des cernes, le ratio IW/FW dans chaque cerne, les densités moyennes des cernes et les densités de FW de chaque cerne, permettent de modéliser les grumes « synthétiques ». Les propriétés sont supposées être discrétisées en fonction du nombre de cernes, de la moelle vers l'écorce.

Pour comparer le modèle paramétrique présenté dans les sections suivantes avec les données existantes de la littérature scientifique, le lecteur est invité à consulter les travaux de Louzada [121], qui ont présenté des paramètres similaires exprimés sous forme de valeurs moyennes et de coefficients de variation dans une zone délimitée de la moelle à l'âge cambial étudié pour une population de *Pinus pinaster* (Ait.).

2.3 Modélisation à l'échelle microscopique - Propriétés physiques et géométriques des cernes

2.3.1 Description de la variabilité intra-arbre

Par analogie avec les travaux de Delucia *et al.* [189] sur la modélisation multi-échelle des agglomérats de liège, les propriétés du bois définies dans ce travail de thèse sont affectées par l'incertitude et leur variabilité est décrite par une distribution normale définie plus spécifiquement à l'échelle du i -ème cerne (à l'exception des trois premiers cercles en raison du manque d'information dans la littérature scientifique). La fonction de densité de probabilité normale $\psi(q_i)$ d'une propriété générique q_i peut être définie sous la forme suivante :

$$\psi(q_i) := \frac{1}{\xi(q_i)\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(q_i - \mu(q_i))^2}{2\xi(q_i)^2}\right), \quad (2.1)$$

où $\mu(q_i)$ et $\xi(q_i)$ sont respectivement la valeur moyenne et l'écart type de la distribution de la propriété q_i . La valeur moyenne $\mu(q_i)$, l'écart type $\xi(q_i)$ et le coefficient de variation $C_v(q_i)$ [%] peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{aligned} \mu(q_i) &:= \frac{1}{N_v} \sum_{j=1}^{N_v} q_{i,j}, \\ \xi(q_i) &:= \sqrt{\mu\left((q_i - \mu(q_i))^2\right)}, \\ C_v(q_i) &:= 100 \frac{\xi(q_i)}{\mu(q_i)}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

où $q_{i,j}$ est la $j^{\text{ème}}$ valeur de q_i observée pour N_v valeurs.

2.3.2 Largeurs de cernes d'accroissement

Dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.), à l'exception des premiers cernes (2^{ème} au 5^{ème}), la largeur des cernes diminue avec leur numéro de cerne de la moelle vers l'écorce. La diminution de largeur est plus rapide dans la zone de transition entre le bois juvénile et le bois adulte. On peut définir, pour un numéro de cernes i , une largeur de cerne associée RW_i . Le modèle proposé dans cette thèse est basé sur les données obtenues par Gaspar *et al.* [117], Nicholls *et al.* [118] et Nicholls [123] où un maximum de RW_i est obtenu au 4^{ème} cerne ($RW_4 \in [7, 11]$ mm) suivi d'une forte diminution jusqu'à la limite du bois juvénile où la valeur de largeur de cernes atteinte est $RW_i = 2$ mm. L'Eq. (2.3) donne la valeur moyenne de RW_i en [mm] choisie pour le modèle proposé en fonction du numéro de cerne :

$$RW_i = \begin{cases} \{2.5, 9.4, 10.0, 10.2, 10.1, 9.9, 9.0, 7.8, 6.5, 5.3, 4.3, 3.4, 2.8, 2.3\} & \text{pour } i = 1, \dots, 14, \\ 2 & \text{pour } i \geq 15. \end{cases} \quad (2.3)$$

Pour chaque numéro de cerne, le coefficient de variation associé $C_v(RW_i)$ est considéré comme égal à 20%.

2.3.3 Âge des grumes modélisées

Dans les Landes de Gascogne, 92% des forêts locales sont privées. La traçabilité des peuplements transformés par la société GB n'est donc pas assurée et l'âge des arbres reste généralement inconnu. Toutefois, la société GB possède des données dendrologiques sur la moyenne et l'écart-type du diamètre des grumes évaluées sur 149727 grumes. Les mesures ont été effectuées pour des grumes de 2.5 m extraites de troncs d'arbres dont la hauteur est inférieure à 8 m. Il est à noter que les résultats de l'écart-type de GB sont surévalués car référencés comme 120 piles d'environ 1250 arbres. Quelques informations existent sur les arbres traités par GB, notamment un âge minimal de 40 ans avec la possibilité d'atteindre 60 ans avant d'être récoltés. Le modèle proposé doit prendre en compte l'hétérogénéité des âges des arbres qui se traduit par un nombre variable de cernes. A cette fin, l'hypothèse suivante est introduite : dans la suite de ce manuscrit, une distribution normale avec un âge moyen de 45.6 et un écart-type de 4.52 est assumée (les âges des arbres en dehors de l'intervalle [40, 62] ans sont négligés). Les paramètres susmentionnés, c'est-à-dire la largeur des cernes et l'âge des arbres, permettent de proposer un modèle paramétrique et géométrique pour les grumes numériques qui peut être comparé à l'échantillon GB en termes de moyenne et d'écart type du diamètre des grumes, en supposant une distribution normale, comme indiqué dans le Tab. 2.1.

TABLE 2.1 – Comparaison entre les moyennes et écarts-types des grumes de bois extraites des données de GB (149727 grumes) et le modèle proposé (100000 simulations).

	Échantillon GB	Modèle paramétrique
Diamètre Moyen [mm]	313.1	313.6
Ecart-Type [mm]	19.15	21.20

2.3.4 Proportion de bois final

La proportion de bois final (Final Wood Proportion, FWP) dans les cernes d'accroissement n'est pas constante. A notre connaissance, seuls les travaux de Nicholls *et al.* [118] et Nicholls [123] présentent l'évolution de la FWP avec l'âge cambial pour *Pinus pinaster* (Ait.). Une augmentation globale de la proportion de bois final dans le bois juvénile est trouvée avant d'atteindre un niveau constant dans la zone adulte. Dans le bois juvénile, l'hypothèse suivante est introduite : le FWP augmente linéairement avec le numéro de cernes i , pour $i = 2, 3, \dots, 15$.

L'Eq. (2.4) permet d'obtenir la valeur de FWP_i en fonction du numéro de cerne. Ces relations sont extraites quantitativement de Nicholls *et al.* [118] et de Nicholls [123] (Fig. 1.19 et elles sont utilisées dans ce manuscrit pour modéliser la proportion de bois final dans chaque cerne.

$$FWP_i = \begin{cases} 0.08 & \text{for } i = 1, \\ (0.08 + 0.02(i - 2)) & \text{for } i = 2, 3, \dots, 15, \\ 0.36 & \text{for } i \geq 16. \end{cases} \quad (2.4)$$

Le coefficient de variation $C_v(FWP_i)$ est considéré comme égal à 20% en fonction des données disponibles dans la Tab. 1.4.

2.3.5 Densités moyennes de bois initial et de bois final

De manière similaire au FWP, on considère une évolution linéaire de W_d et FW_d en fonction du numéro de cerne, avant d'atteindre une valeur limite dans la zone adulte. Tandis que Nicholls *et al.* [118] et Nicholls [123] ont fourni l'évolution de W_d en fonction du numéro de cerne, Moreau [50] a fourni les valeurs de FW_d pour une gamme étendue de RW (variant de 1 à 11 mm) en fonction de l'âge du cambium.

Les Eqs. (2.5) donnent les valeurs de $W_{d,i}$ et $FW_{d,i}$ en fonction du numéro de cerne. Ces relations sont extraites quantitativement de Nicholls *et al.* [118], de Nicholls [123] et de Moreau [50] (Figs. 1.22 et 1.23) et elles seront utilisées dans ce manuscrit pour modéliser les densités du bois.

$$W_{d,i} = \begin{cases} 0.43 & \text{for } i = 1, \\ (0.43 + \frac{12}{14}(i - 2)) & \text{for } i = 2, 3, \dots, 15, \\ 0.55 & \text{for } i \geq 16. \end{cases} \quad (2.5a)$$

$$FW_{d,i} = \begin{cases} 0.56 & \text{for } i = 1, \\ (0.56 + 0.01(i - 2)) & \text{for } i = 2, 3, \dots, 15, \\ 0.70 & \text{for } i \geq 16. \end{cases} \quad (2.5b)$$

Dans le cas des résineux, il est bien établi qu'il existe une corrélation inverse entre la largeur des cernes et la densité. En effet, le cambium est capable de produire une quantité limitée de bois au cours d'une saison de croissance qui dépend des conditions climatiques, de la génétique, de la sylviculture et des interactions extérieures, c'est-à-dire du vent et de la neige. Dans ce travail, les masses de IW et FW produites par un cerne en une année de croissance est considérée comme constante et exprimée sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} S_i W_{d,i} = c_1 &\iff \pi(R_{\text{ext},i}^2 - R_{\text{int},i}^2) W_{d,i} = c_1, \\ S_{FW_i} FW_{d,i} = c_2 &\iff \pi(R_{\text{ext},i}^2 - R_{FW,i}^2) FW_{d,i} = c_2, \\ RW_i &= R_{\text{ext},i} - R_{\text{int},i}, \\ RW_i FWP_i &= R_{\text{ext},i} - R_{FW_i}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

où S_i est la surface totale du cerne, $S_{FW,i}$ est la surface de FW du cerne, $R_{int,i}$, $R_{ext,i}$ et $R_{FW,i}$ sont respectivement les rayons interne et externe du cerne et le rayon interne de la partie FW du cerne, tandis que c_i ($i = 1, 2$) sont des constantes appropriées. Par conséquent, selon les Eq. (2.5) et (2.6), les évolutions des valeurs de RW_i et FWP_i induisent également une variation des valeurs des densités, c'est-à-dire $W_{d,i} = W_{d,i}(RW_i, FWP_i)$, $FW_{d,i} = FW_{d,i}(RW_i, FWP_i)$.

2.3.6 Propriétés élastiques à l'échelle microscopique

Le comportement élastique des phases IW et FW peut être modélisé par la loi de Hooke où la matrice de souplesse \mathbf{S} est définie sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RT} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{L,k}} & \frac{-\nu_{RL,k}}{E_{R,k}} & \frac{-\nu_{TL,k}}{E_{T,k}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR,k}}{E_{L,k}} & \frac{1}{E_{R,k}} & \frac{-\nu_{TR,k}}{E_{T,k}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT,k}}{E_{L,k}} & \frac{-\nu_{RT,k}}{E_{R,k}} & \frac{1}{E_{T,k}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR,k}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL,k}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT,k}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RT} \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

où les trois modules de Young $E_{m,k}$ ($m = L, R, T$ et $k = IW, FW$), les trois modules de cisaillement $G_{mn,k}$ ($m, n = L, R, T$, $m \neq n$ et $k = IW, FW$) et les trois coefficients de Poisson $\nu_{mn,k}$ ($m, n = L, R, T$, $m \neq n$ et $k = IW, FW$) sont définis en fonction de la phase k qui correspond respectivement aux phases IW et FW.

Dans la littérature scientifique, les propriétés élastiques du bois peuvent être exprimées comme une fonction linéaire de la densité relative, comme décrit dans Kasal [190]. Guitard [30] a proposé un modèle linéaire pour calculer les propriétés élastiques des bois résineux en fonction de leur densité relative moyenne. Ce modèle est basé sur des résultats expérimentaux réalisés sur une grande variété d'essences de résineux et est fréquemment utilisé dans la plupart des études. Néanmoins, si ce modèle reste assez précis pour des densités relatives faibles, il perd en précision dans le cas d'un résineux à forte densité comme *Pinus pinaster* (Ait.). Puisque le modèle proposé dans ce manuscrit considère que chaque cerne est constitué d'une phase IW de faible densité relative et d'une phase FW de forte densité relative, le modèle classique de résineux de Guitard [30] n'est pas adapté et d'autres sources doivent être utilisées pour caractériser le comportement élastique des phases IW et FW. Plus précisément, les données relatives aux propriétés mécaniques de *Pinus pinaster* (Ait.) tirées de la littérature scientifique sont utilisées pour établir des relations qui décrivent avec précision le comportement des phases de IW and FW de cette essence, tout en tenant compte de la dépendance à la densité. Pour cela, une relation linéaire des modules de Young et de cisaillement avec la densité relative est supposée, comme dans l'étude de Guitard [30]. En ce qui concerne les coefficients de Poisson, il n'y a pas suffisamment d'informations dans le cas de *Pinus pinaster* (Ait.) et leurs valeurs sont considérées comme constantes. Comme il n'existe pas d'étude se concentrant précisément sur les propriétés mécaniques des phases IW et FW, nous considérons un comportement similaire à la densité relative entre les propriétés moyennes du bois et celles des phases IW/FW. Ainsi, les lois décrivant les propriétés mécaniques de *Pinus pinaster* (Ait.) par rapport à W_d extraites des données de la littérature scientifique sont appliquées aux phases IW et FW de chaque cerne.

Modules de Young

A la connaissance de l'auteur aucune source dans la littérature scientifique ne décrit la tendance des modules de Young en fonction de la densité relative dans le cas du *Pinus pinaster* (Ait.).

Néanmoins, des données spécifiques sont fournies dans plusieurs références pour des densités données telles que les études de Pereira [165] (référéncée dans [164]), Cariou [159], Santos [167], et Gaspar *et al.* [117]. Ces informations sont exploitées pour établir un modèle adapté aux modules de Young de *Pinus pinaster* (Ait.) qui sera étendu aux phases IW et FW.

Dans le cas du module de Young longitudinal, Santos [167] a fourni neuf valeurs qui sont reportées dans le Tab. 2.2 liant le module de Young longitudinal à W_d , correspondant à l'essence *Pinus pinaster* (Ait.).

TABLE 2.2 – Modules de Young longitudinaux et densités relatives correspondantes obtenus à partir d'essais de flexion [167].

W_d	0.46	0.60	0.635	0.64	0.65	0.693	0.705	0.715	0.725
E_L [MPa]	13200	15700	16110	16600	16435	16794	17775	17100	17545

Une relation linéaire entre le module longitudinal E_L [MPa] et la densité relative W_d est trouvée et est décrite dans l'Eq. (2.8) avec un coefficient de détermination $R_d^2 = 0.9581$.

$$E_L = 5874.4 + 16209W_d. \quad (2.8)$$

Trois références, les études de Cariou [159], Pereira [165] et Lahna [160] ont estimé les modules de Young de *Pinus pinaster* (Ait.) en omettant la densité relative des échantillons. En considérant un comportement similaire en traction et en compression des échantillons de bois dans le domaine élastique, la relation linéaire de l'Eq. (2.8) permet d'évaluer la densité relative des échantillons des trois études. Les estimations des densités et les propriétés élastiques sont présentées dans le Tab. 2.3.

TABLE 2.3 – Modules de Young mesurés des références [159, 165, 160] et densités relatives estimées à une teneur en eau d'environ 12%.

Références	E_L [MPa]	E_R [MPa]	E_T [MPa]	W_d
Cariou [159]	11369	/	703	0.3390
Pereira [165]	15100	1910	1010	0.5690
Lahna [160]	16140	2086	/	0.6439

Dès lors il est maintenant possible de proposer des relations linéaires avec la densité relative $W_{d,k}$, grâce à des régressions linéaires, pour les trois modules de Young [MPa] associées à la phase $k = IW, FW$ sous la forme suivante :

$$E_{L,k} = 16209W_{d,k} + 5874.4, \quad E_{R,k} = 2972.2W_{d,k} + 238.70, \quad E_{T,k} = 1334.8W_{d,k} - 250.51. \quad (2.9)$$

Modules de cisaillement

Xavier *et al.* [162] ont caractérisé les modules de cisaillement de *Pinus pinaster* (Ait.) en utilisant deux méthodes d'essai de cisaillement, à savoir les méthodes Iosipescu et off-axis. Les

relations proposées pour relier les modules de cisaillement [MPa] à l'infradensité (IF) sont lues comme :

$$G_{RT,k} = 495IF_k, \quad G_{TL,k} = 2072IF_k, \quad G_{LR,k} = 2402IF_k, \quad (2.10)$$

avec $IF_k = \frac{W_{d,k}}{1.12+0.159W_{d,k}}$. Les formules ci-dessus sont considérées comme applicables aux densités étudiées dans ce travail de thèse et sont appliquées aux phases IW et FW.

Coefficients de Poisson

Cariou [159] a caractérisé les propriétés élastiques de *Pinus pinaster* (Ait.) grâce à des tests expérimentaux. Le Tab. 2.4 présente les coefficients de Poisson obtenus dans Cariou [159]. Comme il existe peu d'informations dans la littérature sur les variations des coefficients de Poisson en fonction de la densité du bois, ces valeurs sont considérées comme constantes et adaptées aux phases IW et FW.

TABLE 2.4 – Coefficients de Poisson du *Pinus pinaster* (Ait.) [159] avec $k = IW, FW$.

$\nu_{RT,k} = 0.58$		$\nu_{TL,k} = 0.03$		$\nu_{RL,k} = 0.04$
---------------------	--	---------------------	--	---------------------

Conformité du modèle élastique proposé pour les phases de bois initial et de bois final

Dans le modèle numérique à l'échelle mésoscopique qui est présenté dans la section suivante, chaque cerne est composé de deux phases constitutives, à savoir IW et FW. Par conséquent, les relations données dans les Eqs. (2.9) et (2.10) pour exprimer la dépendance des propriétés élastiques par rapport à la densité relative de chaque phase doivent être conformes au comportement classique et général du bois. Guitard [30] et Cariou [159] ont exprimé la conformité du comportement du bois par une condition sur les rapports entre les modules de Young (selon des axes différents) et les modules de cisaillement (selon des plans différents) qui doivent rester quasiment constants. Les rapports considérés sont les suivants $\frac{E_{L,k}}{E_{T,k}}, \frac{E_{L,k}}{E_{R,k}}, \frac{G_{LR,k}}{G_{RT,k}}$, et $\frac{G_{TL,k}}{G_{RT,k}}$.

Dans ce manuscrit, un modèle matériau est considéré comme conforme si tous les rapports des propriétés élastiques des Eqs. (2.9) et (2.10), c'est-à-dire $Ra(W_{d,k}) = \frac{E_{L,k}}{E_{T,k}}, \frac{E_{L,k}}{E_{R,k}}, \frac{G_{LR,k}}{G_{RT,k}}, \frac{G_{TL,k}}{G_{RT,k}}$, satisfont à la condition suivante :

$$100 \frac{|Ra(W_{d,k}) - Ra(0.55)|}{Ra(0.55)} \leq 10\%, \quad (2.11)$$

où $W_{d,k} \in [0.40, 0.80]$ est la plage moyenne des densités relatives avec $k = IW, FW$.

Les Figs. 2.2 et 2.3 illustrent les rapports de propriétés élastiques calculés avec le modèle proposé. Tous les rapports sont considérés comme quasi-constants car la condition susmentionnée est remplie avec une variation maximale égale à 9.7%.

2.3.7 Propriétés hygriques à l'échelle microscopique

Cette partie se concentre sur le comportement d'expansion hygroscopique des phases IW et FW à l'échelle microscopique. Les déformations hygroscopiques sont induites par des variations

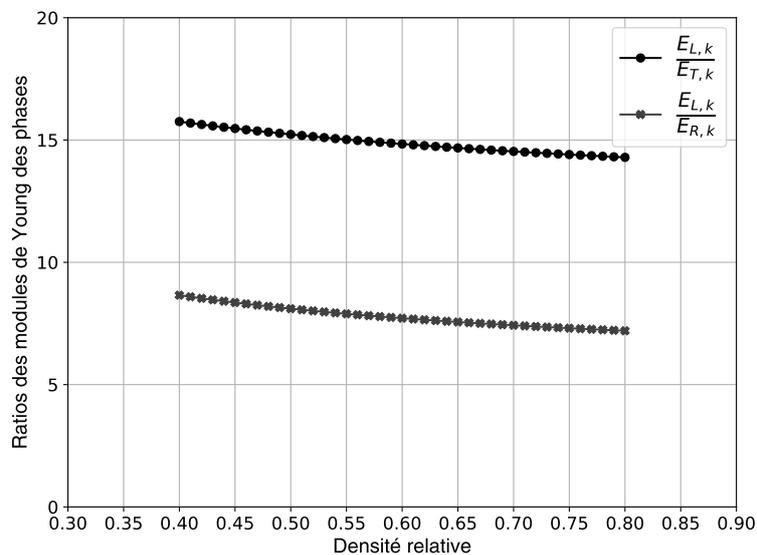


FIGURE 2.2 – Ratios des modules de Young des phases $k = IW, FW$ en fonction de la densité relative.

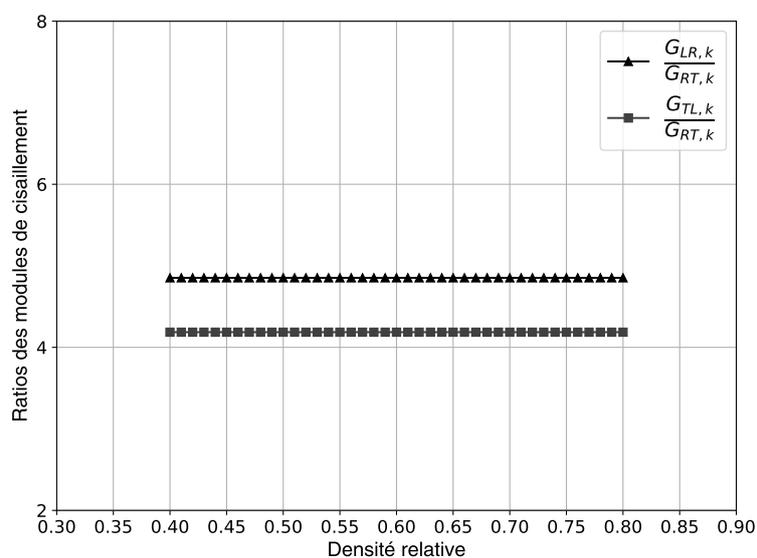


FIGURE 2.3 – Ratios des modules de cisaillement des phases $k = IW, FW$ en fonction de la densité relative.

de la teneur en eau (H) en dessous du point de saturation des fibres (PSF) dont la valeur est d'environ 30% (29%-31% pour *Pinus pinaster* (Ait.)). [119]). Par conséquent, le bois gonfle ou se rétracte pendant les phases d'absorption ou de désorption. Au-dessus du PSF, les variations de la teneur en eau n'influencent pas les variations dimensionnelles (découplées du comportement mécanique) du bois. En raison de la symétrie orthotrope du bois, le retrait et le gonflement dus aux variations de la teneur en eau dépendent fortement des axes orthotropes L , R et T . La déformation hygroscopique de chaque phase $\varepsilon_{H,k}$ est régie par les coefficients de retrait/gonflement $\alpha_{i,k}$ en %/%, qui décrivent les variations dimensionnelles $S_{i,k}$ en % le long des directions $i = L, R, T$ des phases $k = IW, FW$ pour une perte de teneur en eau de 1% dans le cadre du PSF.

$$\begin{aligned} \alpha_{i,k} &= \frac{S_{i,k}}{\text{PSF}}, \\ \varepsilon_{\mathbf{H}} &= \alpha_k \dot{H}, \\ \alpha_k^T &= [\alpha_{L,k} \ \alpha_{R,k} \ \alpha_{T,k} \ 0 \ 0 \ 0]. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dans la littérature scientifique, les propriétés d'expansion hygroscopique du bois peuvent être exprimées comme une fonction linéaire de la densité relative. Puisqu'aucune étude ne décrit l'évolution des propriétés d'hygro-expansion des phases de IW et de FW en fonction de la densité relative, nous posons l'hypothèse que le comportement des propriétés des phases à la densité relative est similaire au comportement de la cerne de *Pinus pinaster* (Ait.). Ainsi, les lois décrivant les propriétés d'hygro-expansion du *Pinus pinaster* (Ait.) par rapport à W_d extraites des données de la littérature scientifique sont appliquées aux phases IW et FW de chaque cerne. A cette fin, Dumail et Castéra [158] ont proposé des propriétés d'hygro-expansion transversales du *Pinus pinaster* (Ait.) en tant que fonction linéaire de W_d . Les relations sont extraites d'une étude expérimentale sur 862 spécimens, sont associées à la phase $k = IW, FW$ et se présentent sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \alpha_{R,k} &= 0.487IF - 0.04, \\ \alpha_{T,k} &= 0.751IF - 0.05, \end{aligned} \quad (2.13)$$

A la connaissance de l'auteur, aucune source dans la littérature scientifique ne donne de modèles complets pour décrire la tendance des modules du coefficient d'hygro-expansion longitudinal $\alpha_{L,k}$ ($k = IW, FW$) en fonction de la densité relative. La valeur est considérée comme constante et égale à $\alpha_{L,k} = 0.01$ [88].

2.4 Détermination des propriétés hygro-élastiques à l'échelle mésoscopique

A l'échelle microscopique, les données bibliographiques et les multiples hypothèses introduites sur les propriétés de *Pinus pinaster* (Ait.) ont permis de proposer deux modèles de matériaux différents pour les phases IW et le FW en tenant compte de leur variabilité dans la section transverse en fonction de leur densité relative correspondante.

À l'échelle mésoscopique, les propriétés de volume élémentaire représentatif (VER) de *Pinus pinaster* (Ait.), qui peut être considéré comme un composite lamellaire, peuvent être obtenues à partir des propriétés des phases constitutives, c'est-à-dire l'alternance des phases IW et FW, de largeur et de propriétés variables pour représenter les cernes d'accroissement.

Plusieurs modèles analytiques plus ou moins sophistiqués ont été développés pour donner une estimation des propriétés des matériaux hétérogènes en présence de variabilité. Ils sont basés sur des formules empiriques et semi-empiriques incluant des hypothèses simplificatrices, comme les modèles présentés par Einstein [191] et Hashin et Shtrikman [192] pour les propriétés élastiques ou les modèles de Levin [193], Turner [194] et Schapery [195] dans le cas des propriétés

hygriques. Dans le cas des propriétés élastiques, plusieurs études basées sur des approches numériques existent également dans la littérature scientifique. McManus [196] a proposé une méthode probabiliste pour calculer les propriétés élastiques équivalentes de stratifiés hétérogènes sur la base des relations classiques de la théorie des plaques (CLPT). Alazwari et Rao [197], utilisant les mêmes relations, ont comparé les résultats de l'approche probabiliste avec ceux d'une approche par intervalles. Catapano et Jumel [198] ont utilisé une méthode d'homogénéisation numérique basée sur la densité d'énergie de déformation des milieux périodiques pour déterminer les propriétés élastiques équivalentes des polymères renforcés par des inclusions ainsi que leur classe de symétrie élastique macroscopique. Cette technique a également été employée dans l'étude de Delucia *et al.* [189] pour déterminer les propriétés de composites à base d'agglomérat de liège en association à une méthode de Monte-Carlo pour prendre en compte la variabilité des composites naturels. Dans le cas du bois, Šejnoha *et al.* [199] ont utilisé des méthodes analytiques et numériques sur des cellules unitaires de bois d'épicéa pour déterminer les propriétés thermo-hygro-mécaniques des phases IW et FW. La micro-structure locale a été obtenue grâce à une technique de micro-tomographie computationnelle à rayons X. Girardon *et al.* [200] ont proposé un modèle paramétrique décrivant l'influence de l'âge cambial sur les propriétés effectives du bois de placage stratifié de peuplier en utilisant les approximations analytiques de Reuss-Voigt [201, 202], et le principe de Steiner couplé à une approche stochastique. Dans le cas des propriétés hygriques, Karch [203] a calculé les coefficients de dilatation thermique (analogue aux coefficients d'hygro-expansion) de feuilles de cuivre à l'aide de plusieurs méthodes d'homogénéisation analytiques et numériques. Tandis que Wang [204] ont estimé les coefficients d'hygro-expansion des composites unidirectionnels en utilisant le modèle de Tsai-Hahn, mieux adapté pour homogénéiser les propriétés des structures composites avec une différence dans les teneurs en eau des phases constitutives. Dans le cas du bois, Badel et Perré [205] et Perré et Badel [206] ont utilisé des techniques d'homogénéisation numériques sur un modèle d'éléments finis (EF) développé à partir d'images radiographiques pour calculer les propriétés d'élasticité et d'hygro-expansion des cernes d'accroissement du chêne.

Dans ce manuscrit, pour obtenir les propriétés effectives élastiques de VER de *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle mésoscopique, la méthode d'homogénéisation basée sur l'équivalence de l'énergie de déformation des milieux périodiques, présentée dans Barbero [207] et étendue dans les travaux de Catapano et Jumel [198] et Delucia *et al.* [189] a été adaptée au modèle 3D EF d'un VER de spécimens de bois extraits de plusieurs régions dans les grumes « synthétiques ». Le modèle tient compte de l'hétérogénéité et de la variabilité des principales propriétés du bois à l'échelle mésoscopique (inter-cernes) et à l'échelle microscopique (intra-terne). Cette méthode repose sur l'utilisation de conditions limites périodiques (CLP) et sur le postulat selon lequel le VER d'une structure hétérogène périodique et le volume correspondant d'un solide homogène fictif possèdent la même énergie de déformation. Dans le cas des propriétés d'hygro-expansion, les propriétés effectives sont déterminées à l'aide de la méthode d'homogénéisation du coefficient de dilatation présentée dans Stolz *et al.* [208] et adaptée dans le cas des déformations hygroscopiques. Cette méthode est basée sur l'intégration de la déformation hygroscopique ε_H sur l'ensemble d'un VER le long des directions orthotropes causée par une différence initiale de teneur en eau.

Par conséquent, les VERs, qui sont modélisés comme des composites lamellaires avec chaque couche correspondant à une phase IW ou FW, peuvent être remplacés par des milieux homogènes équivalents à l'échelle mésoscopique dont les propriétés hygro-élastiques et la symétrie élastique du matériau sont déterminées durant le processus d'homogénéisation. La procédure d'homogénéisation est ensuite couplée à une approche stochastique, la méthode Monte-Carlo, pour calculer efficacement la variabilité associée en fonction de la position relative des VERs dans les grumes « synthétiques ».

De plus, les hypothèses suivantes sont formulées pour déterminer les propriétés effectives à l'échelle mésoscopique :

- Comportement orthotrope linéaire défini dans un système de coordonnées cylindrique local pour les phases IW et FW ;
- Condition de liaison parfaite à l'interface des phases admise.

2.4.1 Description de la géométrie du VER

Les VERs sont extraits des grumes « synthétiques » à partir des principales hypothèses décrites dans la Sec. 2.2. Les positions des VERs sont définies dans deux systèmes de référence principaux : un système de référence cylindrique local ($O'; L, R, T$) et un système de référence cartésien global ($O; X_1, X_2, X_3$), défini respectivement au centre du VER et au centre de la moelle qui sont illustrés en Fig. 2.4.

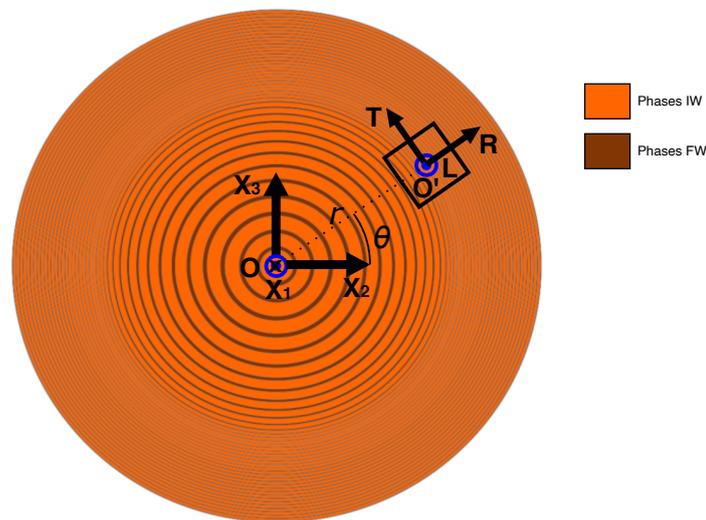


FIGURE 2.4 – Systèmes de référence global cartésien et local cylindrique pour décrire la position des VERs dans la grume.

Comme cette technique d'homogénéisation est appliquée à des milieux périodiques et compte tenu de la symétrie de la grume, les positions des VERs sont définies uniquement en termes de distance à la moelle r , par rapport à l'ensemble de la grume synthétique. En outre, la géométrie des phases IW et FW est simplifiée en strates rectilignes, c'est-à-dire que le rayon de courbure des cernes est négligé, comme l'illustre la Fig. 2.5 où le volume des VERs est défini comme un cube dans le système de référence cartésien global avec a_1 , a_2 , et a_3 la longueur des côtés des VERs respectivement le long des axes X_1 , X_2 , et X_3 . En effet, puisque la taille du VER à l'échelle mésoscopique est supposée être significativement inférieure à la taille de la grume, la longueur caractéristique du VER est supposée suffisamment petite pour que la courbure des cernes puisse être négligée.

De plus, étant donné que la géométrie des grumes et des cernes d'accroissement est affectée par la variabilité, comme indiqué dans la Sec. 2.2, plusieurs configurations de VERs sont possibles en termes de nombre et d'épaisseurs des strates constitutives en fonction de la distance par rapport à la moelle r . En effet, dans les VERs, le nombre de couches peut varier d'une seule couche IW dans la zone de bois juvénile proche de la moelle à un nombre élevé de couches dans la zone de

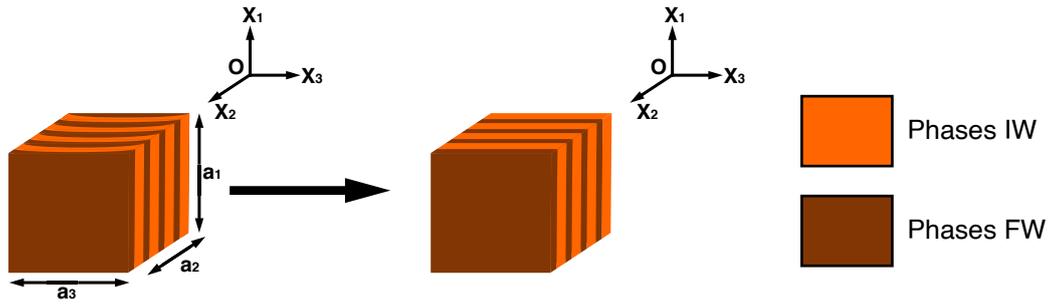


FIGURE 2.5 – Phases constitutives et géométrie des éléments des volumes élémentaires représentatifs.

bois adulte. Par exemple, un VER dans cette zone peut être composé d'environ 8 à 15 couches comme illustré dans la Fig. 2.6.

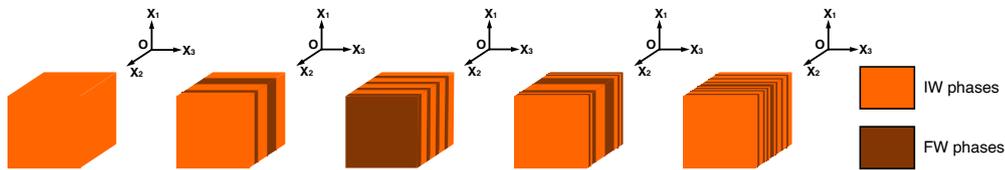


FIGURE 2.6 – Exemples de configurations des VERs en termes de nombre et d'épaisseur des plis des phases IW and FW qui dépendent de la distance depuis la moelle r .

2.4.2 Modèle éléments finis

Cas des propriétés élastiques

La géométrie utilisée pour le VER générique est présentée en Fig. 2.7. Le VER est un volume cuboïde modélisé comme un composite stratifié, avec l'axe X_2 perpendiculaire à l'empilement composé de n_l couches. Les paramètres géométriques sont les dimensions du VER cuboïde, c'est-à-dire $a_1 = a_2 = a_3 = h$, la distance du centroïde du VER par rapport à la moelle r et l'épaisseur de chaque couche modélisant les phases IW et FW dans le VER, c'est-à-dire h_j avec $j = 1, \dots, n_l$. Plus précisément, le volume du VER est toujours le même et est défini comme $V_{\text{VER}} = h^3$. Bien entendu, la relation entre le côté du VER et l'épaisseur des couches est la suivante :

$$h = \sum_{j=1}^{n_l} h_j, \quad (2.14)$$

où $n_l = n_l(h, r, RW_i, FWP_i)$ et $h_j = h_j(h, r, RW_i, FWP_i)$ sont respectivement le nombre de couches et l'épaisseur des couches qui dépendent de la dimension du côté du VER h , de la distance r et des paramètres géométriques des cernes RW_i et FWP_i . Les expressions de RW_i et FWP_i sont fournies dans les Eqs. (2.3) et (2.4).

Les VERs sont extraits des grumes « synthétiques » qui sont générés grâce à un script paramétrique codé dans l'environnement Python® en tenant compte de la variabilité des quantités introduites dans la Sec. 2.2. Le modèle paramétrique EF est ensuite créé dans le code EF commercial Ansys®. Des éléments solides à 20 nœuds (SOLID186) avec trois degrés de liberté (DOF) par nœud ont été utilisés. L'option « Layered » a été activée pour modéliser chaque phase de IW et de FW comme une couche équivalente avec 3 points d'intégration par couche. Lorsque cette option est utilisée, le modèle cinématique de Reissner-Mindlin est activé dans l'épaisseur du solide stratifié [209], c'est-à-dire le long de l'axe x_2 en se référant à la Fig. 2.7.

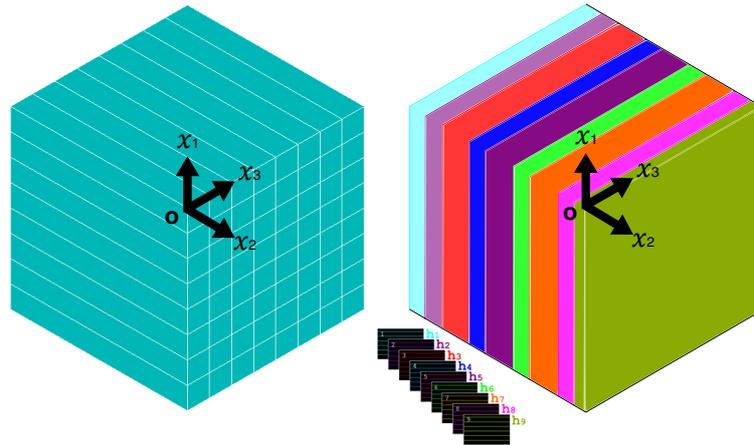


FIGURE 2.7 – Modèle élément fini du VER modélisé comme un solide stratifié.

Cas des propriétés hygriques

La géométrie utilisée pour le VER dans le cas hygrique est illustrée en Fig. 2.8. Le VER est un parallélépipède rectangle modélisé comme un composite en couches, avec l'axe X_2 perpendiculaire à l'empilement composé de n_l couches. Les paramètres géométriques sont le côté du VER, c'est-à-dire $a_{1,hyg} = a_{3,hyg} = \frac{h}{2}$ et $a_{2,hyg} = h$, la distance du centroïde du VER par rapport à la moelle r et l'épaisseur de chaque couche modélisant les phases IW et FW, c'est-à-dire h_j avec $j = 1, \dots, n_l$. Plus précisément, le volume du VER est défini comme $V_{VER,hyg} = \frac{h^3}{4}$. Le volume du VER utilisé pour le comportement hygrique représente $\frac{1}{4}$ du volume de VER utilisé pour le comportement élastique. Des conditions limites de symétrie sont utilisées dans ce cas. Bien entendu, la relation entre le côté du VER et l'épaisseur des couches est la même que dans le modèle précédent et est présentée dans l'Eq. (2.14).

Le modèle paramétrique EF est ensuite créé dans le code EF commercial Ansys[®]. Des éléments solides à 20 nœuds (SOLID186) avec trois degrés de liberté (Degrees of Freedom, DOF) par nœud ont été utilisés. L'option « Layered » a également été activée pour modéliser chaque phase de IW et de FW de manière similaire au cas élastique.

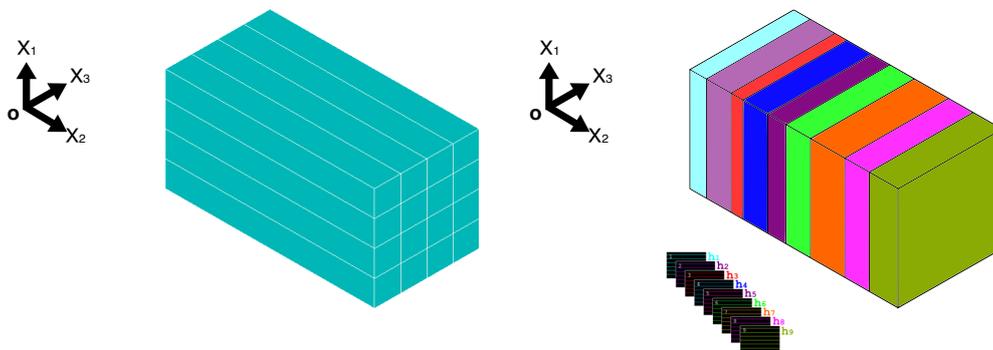


FIGURE 2.8 – Modèle élément fini du VER pour l'homogénéisation du comportement hygrique : VER modélisé comme un solide stratifié dans lequel les couches ont des épaisseurs et des propriétés matérielles différentes.

2.4.3 Méthode d'homogénéisation numérique

Homogénéisation des propriétés élastiques

Dans la partie suivante, la méthode d'homogénéisation basée sur l'équivalence de l'énergie de déformation des milieux périodiques est brièvement rappelée. Dans le cas 3D, la loi de Hooke généralisée pour le matériau élastique équivalent à l'échelle supérieure peut être écrite sous la forme :

$$\bar{\sigma}_i = \bar{C}_{ij} \bar{\epsilon}_j \text{ avec } i, j = 1, \dots, 6, \quad (2.15)$$

où $\bar{\sigma}$ et $\bar{\epsilon}$ sont respectivement les tenseurs de contrainte et de déformation exprimés en notation de Voigt du continuum anisotrope homogène équivalent aux échelles supérieures et, en tant que tels, sont moyennés sur le volume.

L'objectif de la méthode est d'évaluer les composantes du tenseur de rigidité anisotrope homogène équivalent \bar{C} en appliquant successivement 6 cas de chargement statique indépendants au VER hétérogène en termes de champ de déformation mono-composant, comme présenté dans le Tab. 2.5. Ces champs de déformation monoaxiaux sont appliqués via les CLP. Le détail des CLP

TABLE 2.5 – Champ de déformation élémentaire appliqué au VER. La valeur u appliquée est constante et non-nulle pour tous les cas de charge.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
$\bar{\epsilon}_1$	$\frac{u}{a_1}$	0	0	0	0	0
$\bar{\epsilon}_2$	0	$\frac{u}{a_2}$	0	0	0	0
$\bar{\epsilon}_3$	0	0	$\frac{u}{a_3}$	0	0	0
$\bar{\epsilon}_4$	0	0	0	$\frac{u}{a_2} + \frac{u}{a_3}$	0	0
$\bar{\epsilon}_5$	0	0	0	0	$\frac{u}{a_1} + \frac{u}{a_3}$	0
$\bar{\epsilon}_6$	0	0	0	0	0	$\frac{u}{a_1} + \frac{u}{a_2}$

est explicité dans l'ouvrage de Barbero [207].

Après avoir résolu l'analyse statique linéaire pour chaque cas de chargement, il est possible de déduire les composantes du tenseur des contraintes, c'est-à-dire $\bar{\sigma}_\alpha$ avec $\alpha = 1, \dots, 6$ de la manière suivante :

$$\bar{\sigma}_\alpha (\bar{\epsilon}_\beta) = \frac{1}{V_{VER}} \int_{V_{VER}} \sigma_\alpha (\bar{\epsilon}_\beta) dV \approx \frac{1}{V_{VER}} \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{n_l} h_j \sigma_{\alpha e j} (\bar{\epsilon}_\beta) A_{e j}, \quad (2.16)$$

où $A_{e j}$ est la surface de l'élément e de la j -ième couche, h_j est l'épaisseur de la j -ième couche et $\bar{\epsilon}_\beta$ correspond à la déformation élémentaire imposée à travers les CLP pour le cas de charge générique, comme indiqué dans le Tab. 2.5. Ensuite, conformément à la procédure présentée dans [198], les composantes de la matrice d'élasticité à l'échelle supérieure sont calculées, pour chaque ensemble de CLP, sous la forme suivante :

$$\bar{C}_{\alpha\beta} = \frac{\bar{\sigma}_\alpha}{\bar{\epsilon}_\beta} \text{ with } \beta = 1, \dots, 6 \text{ and } \bar{\epsilon}_\gamma = 0, \text{ with } \gamma = 1, \dots, 6 \text{ and } \gamma \neq \beta. \quad (2.17)$$

En outre, puisque la taille du VER à l'échelle mésoscopique est supposée être significativement inférieure à la taille de la grume et que les positions des VERs dans le repère local cylindrique sont définies uniquement selon la distance depuis la moelle avec $r \geq 0$ mm et $\theta = 0^\circ$, les VERs sont considérés comme alignés avec le repère global cartésien. Ainsi, il est possible d'évaluer les

modules élastiques effectifs du VER à partir de la matrice de souplesse $\bar{\mathbf{S}} = \bar{\mathbf{C}}^{-1}$ décrite dans le système de coordonnées cartésiennes global, comme présenté dans l'Eq. (2.18) [198].

$$\begin{aligned}
 &\text{Trois modules élastiques : } E_1 = \frac{1}{\bar{S}_{11}}, \quad E_2 = \frac{1}{\bar{S}_{22}}, \quad E_3 = \frac{1}{\bar{S}_{33}}; \\
 &\text{Trois modules de cisaillement : } G_{23} = \frac{1}{\bar{S}_{44}}, \quad G_{13} = \frac{1}{\bar{S}_{55}}, \quad G_{12} = \frac{1}{\bar{S}_{66}}; \\
 &\text{Trois coefficients de Poisson : } \nu_{23} = -\frac{\bar{S}_{32}}{\bar{S}_{22}}, \quad \nu_{13} = -\frac{\bar{S}_{31}}{\bar{S}_{11}}, \quad \nu_{12} = -\frac{\bar{S}_{21}}{\bar{S}_{11}}; \\
 &\text{Trois coefficients de Chentsov : } \mu_{23,31} = \frac{\bar{S}_{45}}{\bar{S}_{55}}, \quad \mu_{23,12} = \frac{\bar{S}_{46}}{\bar{S}_{66}}, \quad \mu_{31,12} = \frac{\bar{S}_{56}}{\bar{S}_{66}}; \\
 &\text{Neuf coefficients d'influence mutuelle : } \eta_{1,23} = \frac{\bar{S}_{14}}{\bar{S}_{44}}, \quad \eta_{1,31} = \frac{\bar{S}_{15}}{\bar{S}_{55}}, \quad \eta_{1,12} = \frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{66}}, \\
 &\eta_{2,23} = \frac{\bar{S}_{24}}{\bar{S}_{44}}, \quad \eta_{2,31} = \frac{\bar{S}_{25}}{\bar{S}_{55}}, \quad \eta_{2,12} = \frac{\bar{S}_{26}}{\bar{S}_{66}}, \quad \eta_{3,23} = \frac{\bar{S}_{34}}{\bar{S}_{44}}, \quad \eta_{3,31} = \frac{\bar{S}_{35}}{\bar{S}_{55}}, \quad \eta_{3,12} = \frac{\bar{S}_{36}}{\bar{S}_{66}}.
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

De plus, le degré de symétrie élastique peut être identifié en définissant 9 critères de symétrie indépendants f_a ($a = 1, \dots, 9$), comme présenté dans l'Eq. (2.19). Un critère f_a est considéré comme satisfait si sa valeur, exprimée en [%], respecte la condition $f_a \leq 1\%$.

$$\begin{aligned}
 &\text{Critères sur les modules de Young : } f_1 = \frac{|E_3 - E_2|}{E_2}, \quad f_2 = \frac{|E_1 - E_2|}{E_2}, \\
 &\text{Critère sur les modules de cisaillement : } f_3 = \frac{|G_{31} - G_{23}|}{G_{23}}, \quad f_4 = \frac{|G_{12} - G_{23}|}{G_{23}}, \\
 &\text{Critères sur les coefficients de Poisson } f_5 = \frac{|\nu_{31} - \nu_{23}|}{\nu_{23}}, \quad f_6 = \frac{|\nu_{12} - \nu_{23}|}{\nu_{23}}, \\
 &\text{Critère d'isotropie } f_7 = \frac{|G_{23} - \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})}|}{G_{23}}, \\
 &\text{Critères sur les coefficients de Chentsov et d'influence mutuelle :} \\
 &\quad f_8 = \max(|\mu|), \quad f_9 = \max(|\eta|).
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Enfin, notons $\mathcal{E} := \{E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{31}, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{31}\}$ l'ensemble des propriétés élastiques décrites dans le système global de coordonnées cartésiennes résultant de l'homogénéisation numérique. Elles doivent satisfaire un ensemble de contraintes $g_l(\mathbf{M})$ [210, 211], avec $\mathbf{M} = \{h, r, RW_i, FWP_i\}$ le vecteur des variables de conception géométrique, pour assurer la positivité de la matrice de ri-

gidité homogénéisée à l'échelle mésoscopique, à savoir :

$$\begin{aligned}
 g_1(\mathbf{M}) &= -E_1 \leq 0, \\
 g_2(\mathbf{M}) &= -E_2 \leq 0, \\
 g_3(\mathbf{M}) &= -E_3 \leq 0, \\
 g_4(\mathbf{M}) &= -G_{12} \leq 0, \\
 g_5(\mathbf{M}) &= -G_{23} \leq 0, \\
 g_6(\mathbf{M}) &= -G_{31} \leq 0, \\
 g_7(\mathbf{M}) &= |v_{23}| - \sqrt{\frac{E_2}{E_3}} < 0, \\
 g_8(\mathbf{M}) &= |v_{31}| - \sqrt{\frac{E_3}{E_1}} < 0, \\
 g_9(\mathbf{M}) &= |v_{12}| - \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} < 0, \\
 g_{10}(\mathbf{M}) &= 2v_{23}v_{31}v_{12} + v_{23}^2 \frac{E_3}{E_2} \\
 &+ v_{31}^2 \frac{E_1}{E_3} + v_{12}^2 \frac{E_2}{E_1} - 1 < 0, \\
 g_{11}(\mathbf{M}) &= v_{23} + v_{31} + v_{12} - \frac{3}{2} < 0.
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Homogénéisation des propriétés d'hygro-expansion

Dans le cas 3D, la loi d'hygro-expansion libre généralisée pour le matériau équivalent à l'échelle supérieure peut être écrite sous la forme :

$$\bar{\varepsilon}_{H,i} = \bar{\alpha}_{i,k}(H_1 - H_0) \quad i = 1, \dots, 6, \tag{2.21}$$

où $\bar{\varepsilon}_H$ est le tenseur des déformations d'hygro-expansion libre exprimé en notation de Voigt du continuum anisotrope homogène équivalent aux échelles supérieures et, en tant que tel, est moyenné sur le volume.

L'objectif de cette méthode est d'évaluer toutes les composantes du tenseur d'hygro-expansion libre équivalent $\bar{\alpha}$ en appliquant un cas de charge de teneur en eau initiale $H_1 - H_0$ appliqué en tout point du VER.

TABLE 2.6 – Cas de chargement hygrique initial appliqué au VER et conditions limites symétriques avec u_i ($i = 1, 2, 3$) le déplacement associé dans le repère global cartésien le long de l'axe X_i .

Variation initiale d'humidité	Points de coordonnées $X_1 = 0$	Point de coordonnées $X_2 = r - \frac{h}{2}, X_1 = 0$ et $X_3 = 0$	Points de coordonnées $X_3 = 0$
$H_1 - H_0$	Déplacement $u_1 = 0$	Déplacement $u_2 = 0$	Déplacement $u_1 = 0$

Après avoir résolu l'analyse statique, il est possible de récupérer les composantes du tenseur des déformations $\bar{\varepsilon}_{H,\beta}$ avec $\beta = 1, \dots, 6$ et de calculer ensuite leur valeur moyennée sur le volume de la manière suivante :

$$\bar{\varepsilon}_{H,\beta}(H) = \frac{1}{V_{VER}} \int_{V_{VER}} \varepsilon_{H,\beta}(H) dV \approx \frac{1}{V_{VER}} \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{n_l} h_j \varepsilon_{H,\beta e j}(H) A_{e j}, \tag{2.22}$$

où $A_{e j}$ est la surface de l'élément e de la j -ième couche et h_j est son épaisseur. Les coefficients d'hygro-expansion à l'échelle supérieure sont ensuite calculés de la façon suivante :

$$\bar{\alpha}_\beta = \frac{\bar{\varepsilon}_{H,\beta}}{H_1 - H_0} \quad \text{avec } \beta = 1, \dots, 6. \tag{2.23}$$

2.5 Résultats numériques tenant compte de la variabilité

2.5.1 Méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte-Carlo (MC) est couramment utilisée pour estimer la distribution probabiliste des résultats de simulations et elle a déjà été utilisée dans le cas de matériaux naturels, comme dans le cas des agglomérats de liège [189]. Dans ce manuscrit, la variabilité induite par le modèle proposé sur la configuration des VERs, c'est-à-dire le nombre de couches composant les VERs, leur largeur, leurs propriétés élastiques, et leur composition, à une distance donnée de la moelle r , influence les propriétés mécaniques effectives résultantes à l'échelle mésoscopique. Cette influence peut être évaluée grâce à la méthode MC couplée aux techniques d'homogénéisation numérique décrite dans la Sec. 2.4. La méthode MC appliquée dans ce travail de thèse repose sur quatre étapes principales :

- Étape 1. Le modèle paramétrique EF prend en compte la variabilité de chaque paramètre d'entrée, comme présenté dans la Sec. 2.2.
- Étape 2. Un nombre statistiquement représentatif d'échantillons est choisi en effectuant une analyse de convergence pour obtenir des informations sur la population étudiée de VER.
- Étape 3. Le processus d'homogénéisation est effectué sur chaque échantillon VER pour obtenir la distribution probabiliste des propriétés élastiques équivalentes à l'échelle mésoscopique à une distance donnée depuis la moelle r .
- Étape 4. Les étapes 1 à 3 sont répétées pour les valeurs de r dans l'intervalle $r \in [4, 150]$ mm avec un incrément de 1 mm.

Le nombre d'échantillons n utilisé dans ce travail de thèse a été estimé en analysant la convergence des propriétés élastiques équivalentes, la moyenne et le coefficient de variation, des VERs sur toute la gamme de r pour différentes valeurs de n comme présenté à l'étape 2. Le nombre de simulations est supposé comme suffisant si les variations de la valeur moyenne sont respectivement inférieures à 2% en comparaison de la valeur asymptotique (valeur pour un nombre de simulations de 500). La convergence sur le nombre de simulations est présentée en Fig. 2.9 pour des distances depuis la moelle $r = 20, 50, 80, 150$ mm.

Le nombre d'échantillons à analyser est égal à $n = 250$, ce qui signifie que n analyses d'homogénéisation sont effectuées pour chaque valeur de r dans la gamme sélectionnée (étapes 3 et 4).

2.5.2 Analyse de convergence

Pour valider la précision et l'efficacité du modèle EF du VER, des analyses de convergence sur la taille du VER et sur la taille du maillage sont réalisées exclusivement en termes de valeurs moyennes des paramètres physiques et géométriques (aucune variabilité n'est prise en compte dans cette étude préliminaire).

Les analyses de convergence sont effectuées dans la zone de bois adulte en raison du plus grand nombre de couches composant le VER dans cette région et les résultats obtenus sont considérés comme valables pour toute la gamme de r .

Pour une taille de VER de $h = 8$ mm, le meilleur compromis en termes de coûts de calcul et de précision dans l'estimation des constantes élastiques est une taille de maillage égale à $e_{\text{size,ela}} = \frac{h}{8}$ dans le cas élastique et de $e_{\text{size,hyg}} = \frac{h}{2}$ dans le cas hygrique. Les temps de calculs pour 1 simulation sont respectivement égaux à $t = 3.0$ secondes et $t = 1.0$ seconde (Intel(R) Core(TM) i7-7700K CPU @ 4.20GHz - 16.0 Go RAM).

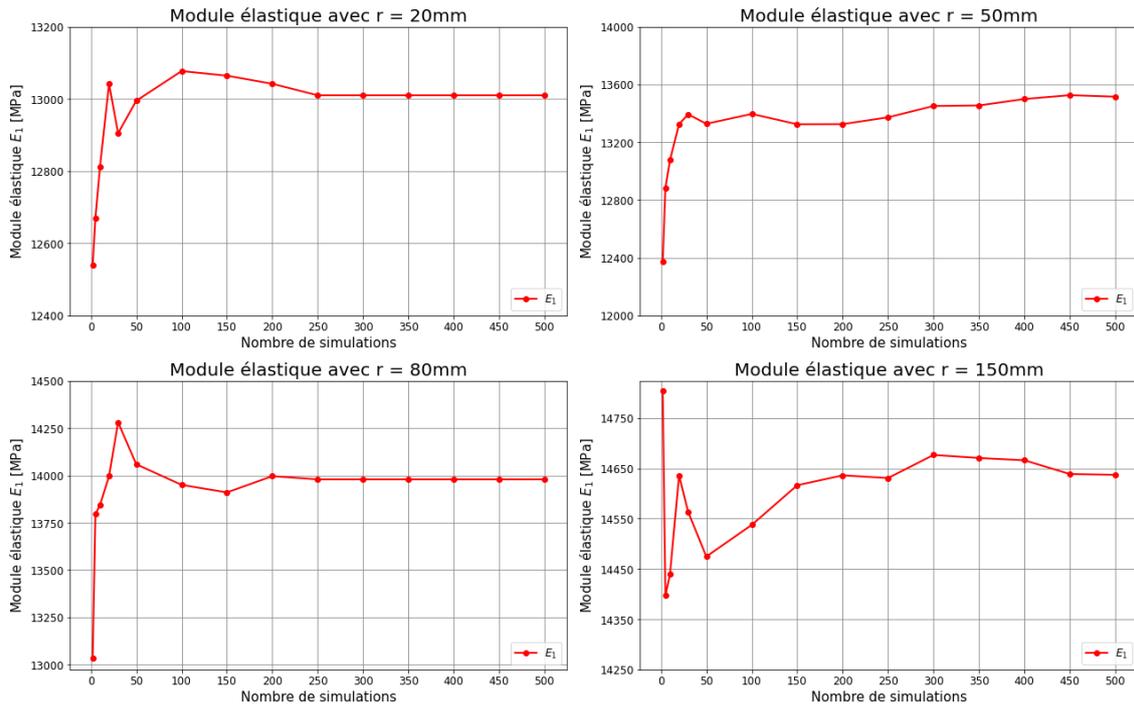


FIGURE 2.9 – Étude de la convergence des propriétés élastiques par l'évolution de la valeur moyenne en fonction du nombre de simulations pour 4 distance depuis la moelle $r = 20, 50, 80, 150$ mm.

2.5.3 Résultats numériques des propriétés élastiques

Pour montrer l'efficacité de l'approche proposée, une comparaison entre le modèle numérique proposé et les limites variationnelles de Reuss-Voigt (R-V) sur la plage d'intérêt r est effectuée. En outre, des données expérimentales de la littérature scientifique sont juxtaposées aux résultats en tant que terme de comparaison supplémentaire. Elles proviennent de diverses études telles que Cariou [159], Pereira *et al.* [166] et Santos [167]. En outre, des données supplémentaires sont introduites à partir de diverses études telles que Morgado *et al.* [212], Morgado *et al.* [175], Morgado *et al.* [174], Pedro [213] et Carballo *et al.* [214] qui ont évalué le module d'élasticité longitudinal à l'aide d'essais de flexion 4 points reposant sur plusieurs normes européennes adoptées comme normes françaises telles que AFNOR NF EN 14251 [176], AFNOR NF EN 408+A1 [177] et AFNOR NF EN 384+A2 [178] (pour le module d'Young longitudinal local et global).

Les résultats de l'évaluation des symétries élastiques des VÉRs au moyen du critère f_a ($a = 1, \dots, 9$) de l'Eq. (2.19) sont présentés sur la Fig. 2.10. Il convient de noter que sur toute la plage de r , seuls les critères f_8 et f_9 sont vérifiés. Par conséquent, le continuum homogénéisé à l'échelle mésoscopique se comporte comme un matériau orthotrope sur toute la gamme de r .

De plus, les résultats obtenus pour la valeur moyenne et l'intervalle de confiance de 68% de l'ensemble des propriétés élastiques équivalentes $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{31}$ du composite stratifié à l'échelle mésoscopique dans l'intervalle $r \in [4, 150]$ mm sont présentés dans les Figs. 2.11 et 2.12.

Les valeurs moyennes des propriétés élastiques effectives ainsi que les intervalles de confiance sont toujours inclus dans les limites analytiques variationnelles R-V. La validité de la méthode numérique est donc vérifiée.

Il convient de noter qu'il existe relativement peu d'informations dans la littérature concernant toutes les propriétés élastiques, à l'exception du module d'Young longitudinal $E_1 = E_L$. De plus, les données globales sur le *Pinus Pinaster* (Ait.) proviennent majoritairement du Portugal où les

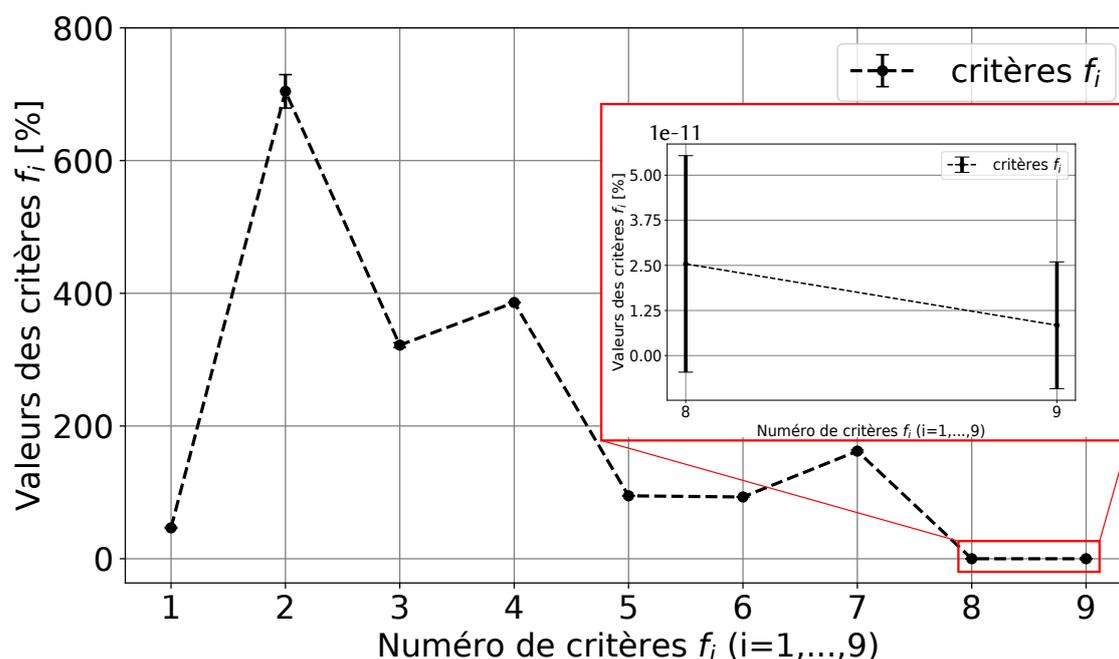


FIGURE 2.10 – Critères de symétrie élastique pour l’estimation du degré d’anisotropie du *Pinus pinaster* (*Ait.*) à l’échelle mésoscopique.

arbres ont tendance à avoir une densité globale plus élevée. Néanmoins, les résultats du modèle semblent en bon accord avec les données expérimentales obtenues dans la littérature scientifique, qui sont presque toutes incluses dans l’intervalle de confiance de 68%.

Des prémices de travaux sur la mesure expérimentale de l’évolution des propriétés élastiques en fonction de la distance depuis la moelle et plus généralement dans les grumes ont été entamées au cours des travaux de thèse via l’encadrement de deux stages de 3 mois de juin à septembre 2022. Les premiers travaux consistent en des analyses modales et harmoniques de plaques en *Pinus pinaster* (*Ait.*) de faibles épaisseurs. Le contexte, la présentation du processus expérimentale ainsi que les premiers résultats d’analyses sont présentés succinctement en Annexe A.

Au niveau de l’évolution des propriétés avec les grumes, comme le montrent les Figs. 2.11 et 2.12, l’ensemble des modules élastiques augmente avec la distance à la moelle avec des variations importantes dans la zone juvénile, c’est-à-dire $r \in [20, 100]$ mm. Inversement, lorsque $r > 100$ mm, la zone adulte étant atteinte, les modules élastiques tendent à se stabiliser autour d’une asymptote horizontale. Ces observations sont cohérentes avec les hypothèses sur les paramètres physiques d’entrée formulées dans la Sec. 2.2. De plus, les allures des évolutions des modules élastiques sont en accord avec différents travaux extraits de la littérature scientifique. En effet, les travaux expérimentaux de Ormarsson et Cown [19] sur les modules élastiques du *Picea Abies*, expérimentaux de Matsuo-Ueda *et al.* [215] sur le module élastique longitudinal du *Cryptomeria japonica* et numériques de Nairn [216] sur le module élastique radial du *Pseudotsuga menziesii* montrent une évolution similaire des modules élastiques avec la distance depuis la moelle avec une augmentation des valeurs progressive dans le bois juvénile suivie d’une stabilisation dans le bois adulte. Dans le cas du *Pinus pinaster* (*Ait.*), aucune étude ne présente l’évolution des modules élastiques avec la distance depuis la moelle et les travaux de ce manuscrit constituent une nouveauté dans le domaine.

Enfin, les valeurs des coefficients de Poisson sont toujours constantes, égales aux propriétés

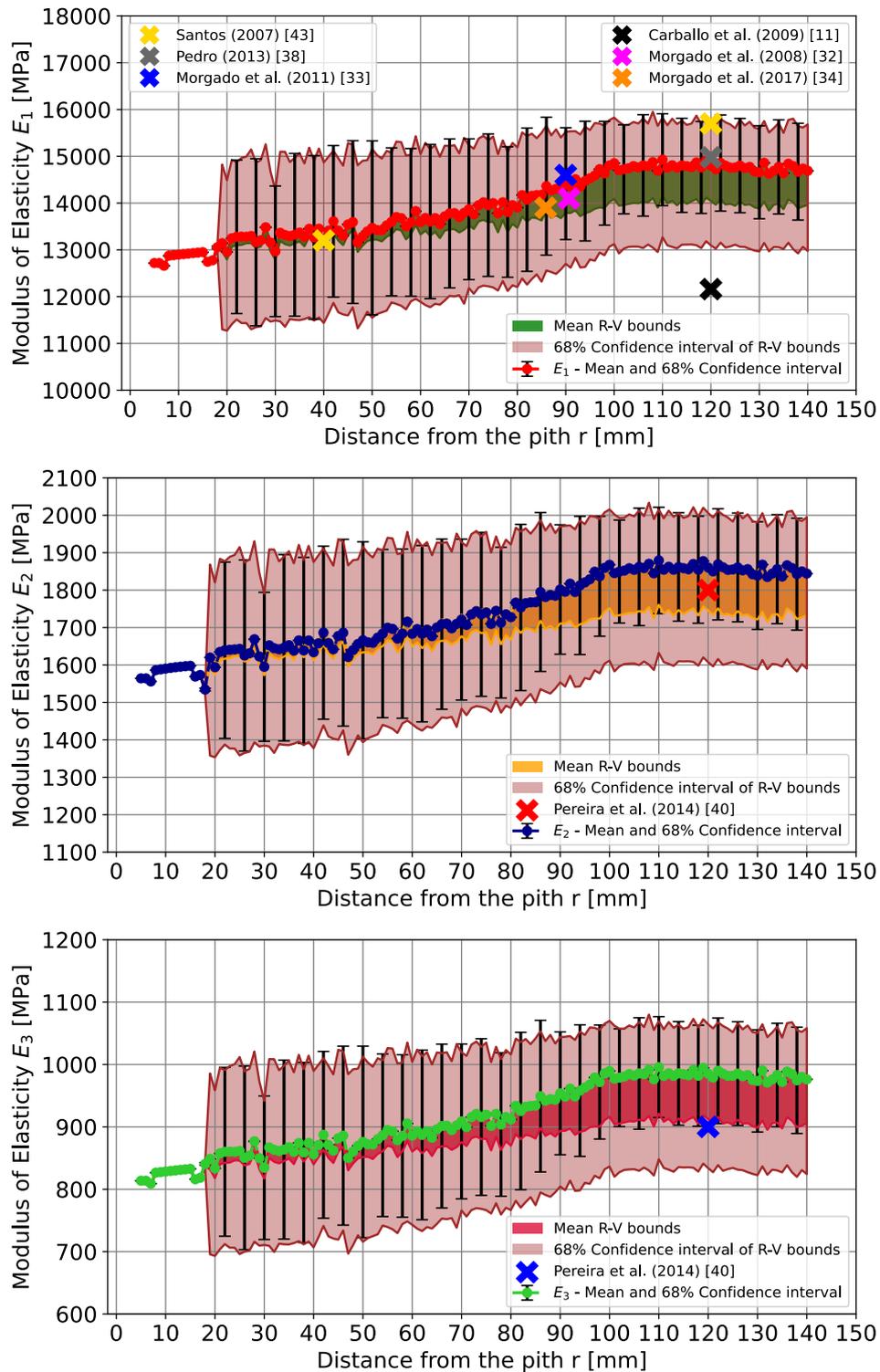


FIGURE 2.11 – Modules de Young effectifs à l'échelle mésoscopique en fonction de la distance depuis la moelle avec la variabilité associée. Les valeurs expérimentales sont placées aux densités correspondantes du modèle. Les densités relatives sont incluses dans l'intervalle [0.46, 0.60] - inconnue pour [166].

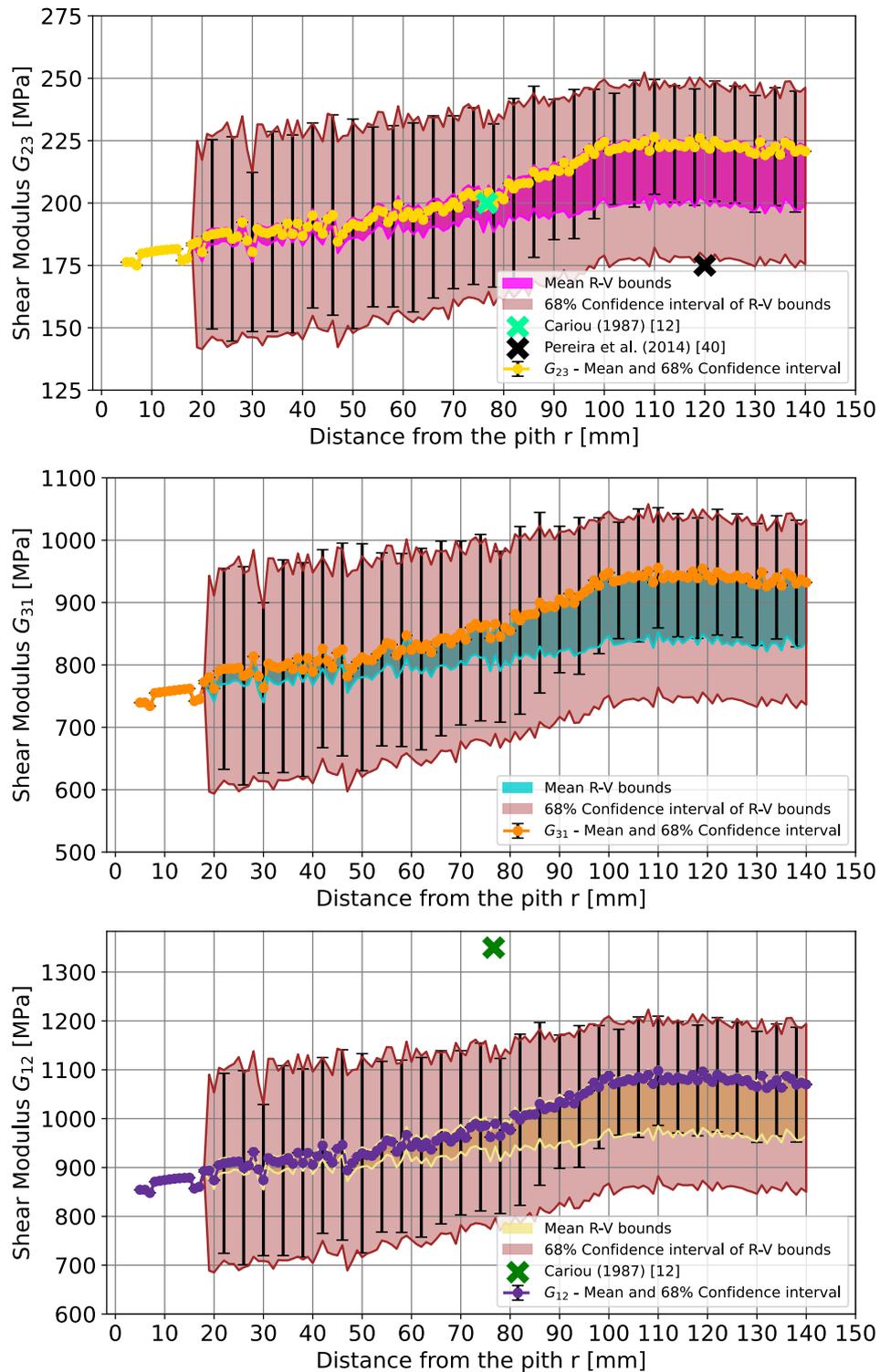


FIGURE 2.12 – Modules de cisaillement effectifs à l'échelle mésoscopique en fonction de la distance depuis la moelle avec la variabilité associée. Les valeurs expérimentales sont placées aux densités correspondantes du modèle. La densité relative est de 0.51 pour [159] et est inconnue pour [166].

d'entrée, et présentées dans le Tab. 2.7.

TABLE 2.7 – Coefficients de Poisson effectifs à l'échelle mésoscopique obtenus à partir de l'étude numérique et similaires aux données d'entrée des cernes à l'échelle microscopique avec $k=IW,FW$.

$\nu_{23} = \nu_{RT,k}$	$\nu_{31} = \nu_{TL,k}$	$\nu_{21} = \nu_{RL,k}$
0.58	0.03	0.04

Estimation de la variabilité des propriétés élastiques

Les coefficients de variation de l'ensemble des propriétés élastiques $C_v(M)$ sont présentés en Fig. 2.13.

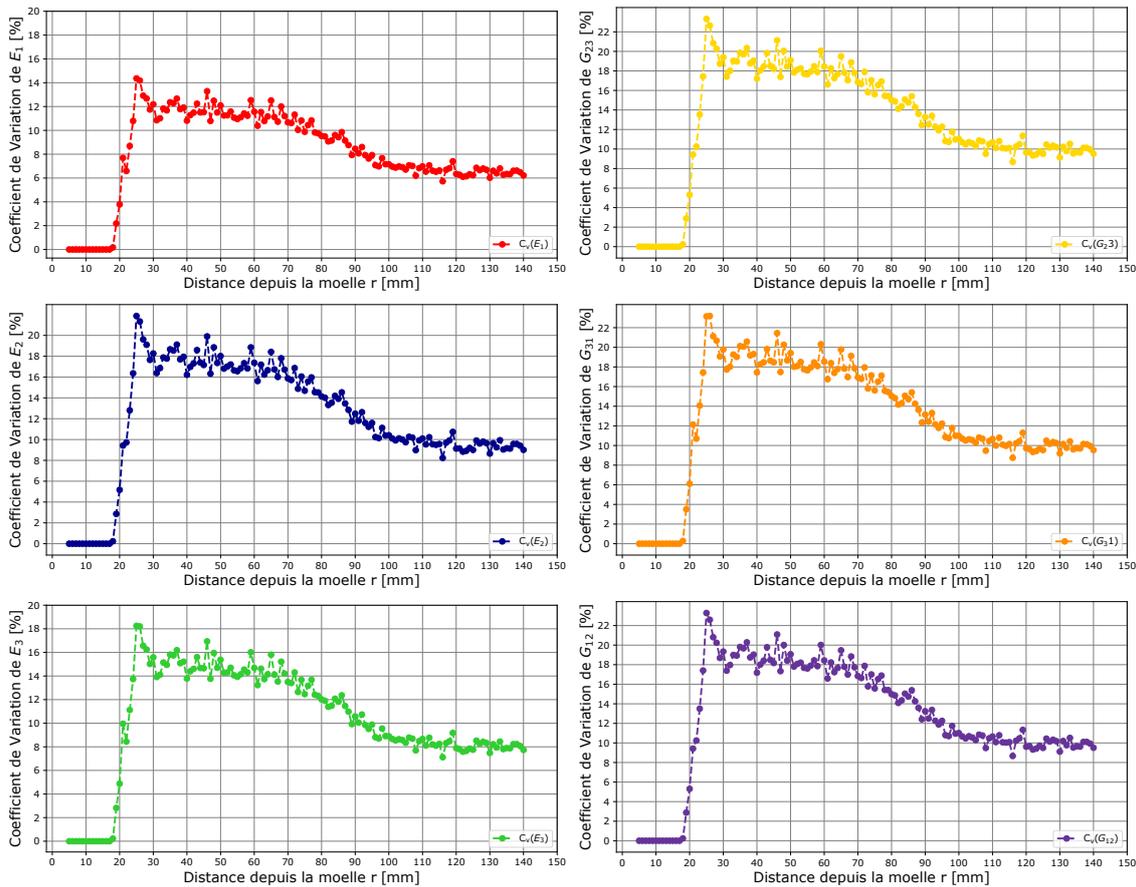


FIGURE 2.13 – Coefficient de variation effectif [%] en fonction de la distance depuis la moelle des modules de Young.

Des données expérimentales tirées de plusieurs références, telles que Santos *et al.* [164], Morgado *et al.* [175], Morgado *et al.* [212], Morgado *et al.* [174], Pereira *et al.* [166] et Carballo *et al.* [214] sont disponibles pour estimer la variabilité globale des propriétés élastiques et de la densité

sur des troncs entiers de *Pinus pinaster* (Ait.). À titre de comparaison, $N_{cv} = 100000$ échantillons, prélevés au hasard dans l'intervalle r , ont été sélectionnés pour obtenir la valeur moyenne et le coefficient de variation des propriétés élastiques effectives à l'échelle mésoscopique du modèle proposé. Le Tab. 2.8 présente les différences entre les résultats numériques et expérimentaux pour les modules de Young et la densité.

Tout d'abord, on peut remarquer que la variation de la densité considérée dans ce travail de thèse est plus élevée que les données expérimentales, car la variabilité sur l'ensemble du plan transverse RT de la grume synthétique est prise en compte dans la stratégie de modélisation proposée. Cependant, dans le cas des modules de Young, les C_v sont plus faibles. Ceci est dû aux hypothèses simplificatrices introduites sur la forme, le bois de réaction, la variabilité longitudinale, l'angle des micro-fibrilles qui, couplées à la relation linéaire entre les propriétés élastiques et la densité, conduisent à une sous-estimation de la variabilité des propriétés élastiques.

2.5.4 Résultats numériques des propriétés d'hygro-expansion

Pour l'homogénéisation du comportement hygrique, une comparaison entre le modèle numérique proposé et les limites variationnelles de Reuss-Voigt (R-V) (voir [201] et [202]) des coefficients d'hygro-expansion sur la plage d'intérêt r est effectuée. En outre, les données de la littérature scientifique sont juxtaposées aux résultats en tant que terme de comparaison supplémentaire. Elles proviennent de diverses études telles que Brémaud *et al.* [71] (moyenne de 3 résineux dont *Pinus pinaster* (Ait.)) et Muñoz et Anta [157]. En outre, les résultats obtenus pour la valeur moyenne et l'intervalle de confiance de 68% de l'ensemble des propriétés d'hygro-expansion équivalentes α_2 et α_3 du composite stratifié à l'échelle mésoscopique dans l'intervalle $r \in [4, 150]$ mm sont présentés dans la Fig. 2.14.

Les valeurs moyennes des propriétés effectives d'hygro-expansion ainsi que les intervalles de confiance sont toujours inclus dans les limites analytiques variationnelles R-V. La validité de la méthode numérique est donc vérifiée.

Comme le montre la Fig. 2.14, l'ensemble des propriétés d'hygro-expansion augmente avec la distance depuis la moelle, avec des variations importantes dans la zone juvénile, c'est-à-dire $r \in [20, 100]$ mm. Inversement, lorsque $r > 100$ mm, alors que la zone adulte est atteinte, les propriétés d'hygro-expansion tendent à se stabiliser autour d'une asymptote horizontale. Ces observations sont cohérentes avec les hypothèses sur les paramètres physiques d'entrée formulées dans la Sec. 2.2. Enfin, les valeurs de la dernière propriété d'expansion hygroscopique $\alpha_1 = 0.01$ sont toujours constantes et égales aux propriétés d'entrée.

2.5.5 Estimation de la variabilité des propriétés d'hygro-expansion

Les coefficients de variation de l'ensemble des propriétés d'hygro-expansion sont présentés dans la Fig. 2.15.

Des données expérimentales tirées de plusieurs références, telles que Burgers [119] et Muñoz et Anta [157], sont disponibles pour estimer la variabilité globale des propriétés d'hygro-expansion et de la densité sur des grumes entières de *Pinus pinaster* (Ait.). À titre de comparaison, $N_{cv} = 100000$ échantillons, prélevés au hasard dans l'intervalle r , ont été sélectionnés pour obtenir la valeur moyenne et le coefficient de variation des propriétés effectives d'hygro-expansion à l'échelle mésoscopique. Le Tab. 2.9 présente les différences entre les résultats numériques et expérimentaux pour les propriétés d'hygro-expansion transversales et la densité.

Il est possible de remarquer que les variations de la densité W_d et du coefficient d'expansion hygroscopique α_3 considérées dans ce travail de thèse sont plus élevées que les données expérimentales, puisque la variabilité sur l'ensemble du plan RT de la grume « synthétique » est prise en

TABLE 2.8 – Comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales des propriétés élastiques et de la densité.

Références	E_1 [MPa]	$C_V(E_1)$ [%]	E_2 [MPa]	$C_V(E_2)$ [%]	E_3 [MPa]	$C_V(E_3)$ [%]	W_d	$C_V(W_d)$
Modèle proposé	13947	10.2	1691.7	15.1	913.37	12.94	0.551	24.3
Table 2 Pereira <i>et al.</i> [166]	/	/	1800	12.8	900	23.7	/	/
Table 2 Carballo <i>et al.</i> [214]	12161	21	/	/	/	/	0.573	11
Table 2 Morgado <i>et al.</i> [174]	13900	17.96	/	/	/	/	0.5288	9.64
Table 3 Morgado <i>et al.</i> [212]	14600	23.3	/	/	/	/	0.535	11
Table 1 Santos <i>et al.</i> [164] avec des données extraites de [165]	15100	6.8	1910	7.9	1010	14.4	/	/

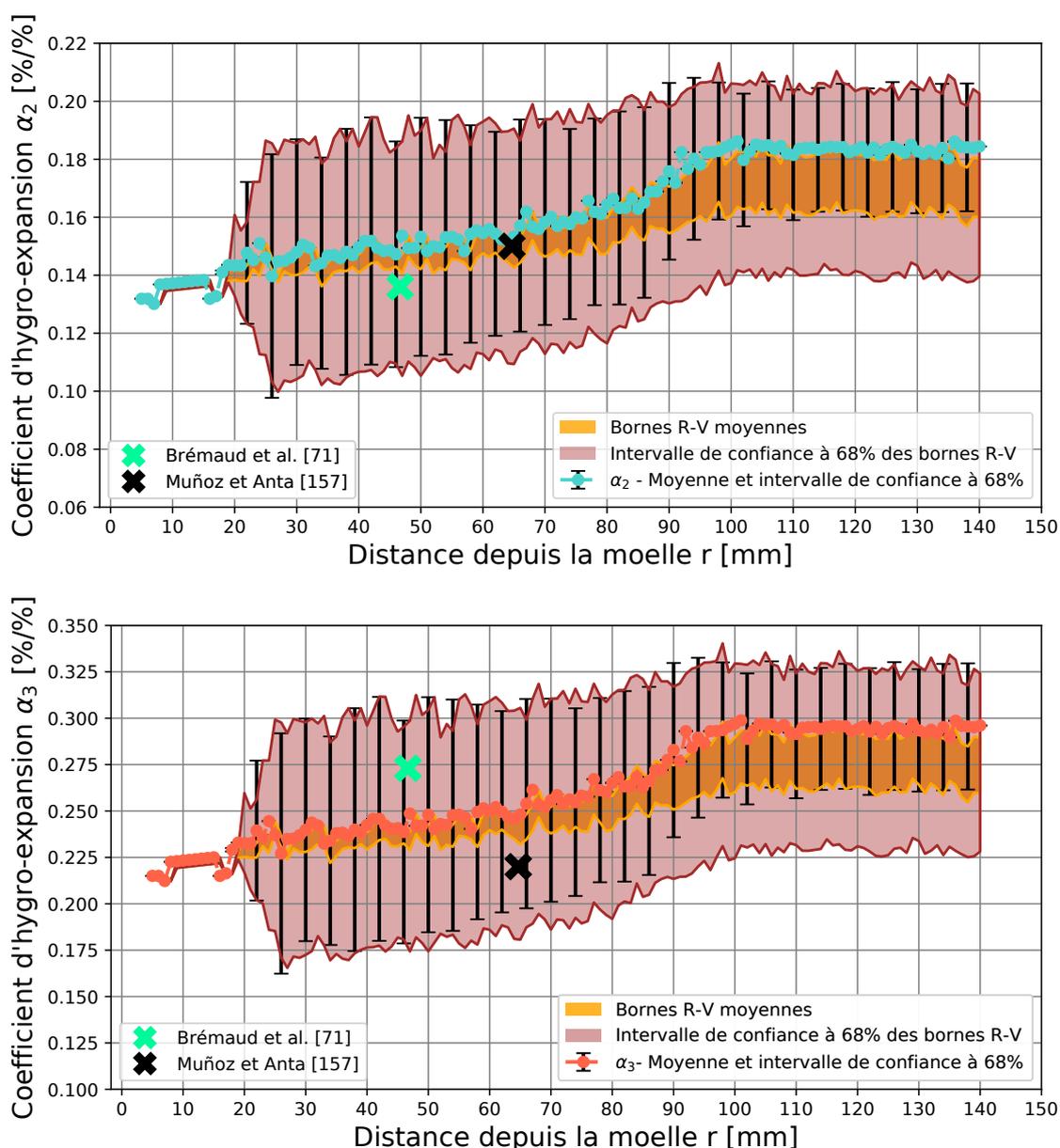


FIGURE 2.14 – Coefficients d'hygro-expansion effectifs α_2 et α_3 à l'échelle mésoscopique en fonction de la distance depuis la moelle et de la variabilité associée. Les valeurs expérimentales sont placées aux densités correspondantes du modèle. Les densités relatives sont comprises dans $[0.46, 0.60]$.

compte dans la stratégie de modélisation proposée. De plus, dans le cas du coefficient d'expansion hygroscopique α_2 , aussi bien μ que C_v semblent être en bonne adéquation avec les données de la littérature scientifique. Néanmoins, il existe très peu d'informations pour comparer correctement le modèle numérique proposé avec les résultats expérimentaux. De plus, l'impact des hypothèses simplificatrices introduites sur la forme de la grume, le bois de réaction et la variabilité longitudinale couplées à la relation linéaire entre les propriétés d'hygro-expansion et la densité sur les résultats numériques n'est pas estimé et est possiblement important.

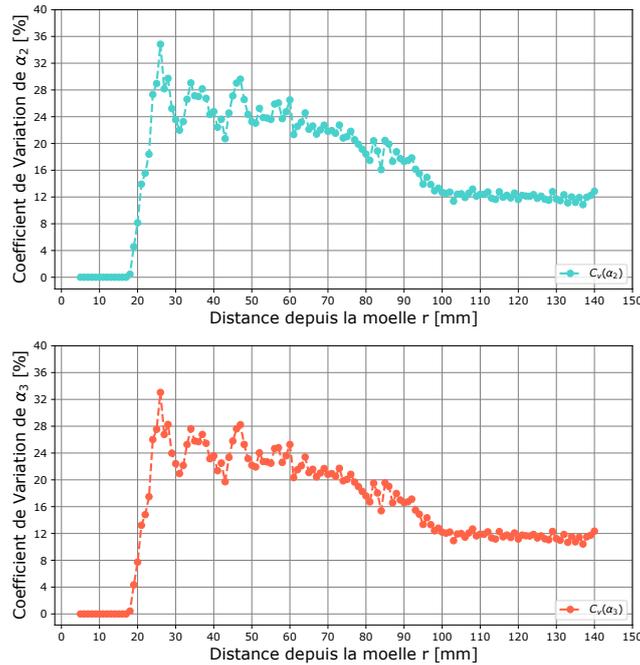


FIGURE 2.15 – Coefficient de variation effectif $C_v(\alpha_2)$ et $C_v(\alpha_3)$ [%] en fonction de la distance depuis la moelle.

TABLE 2.9 – Comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales des propriétés d’hygro-expansion et de la densité.

Références	α_2 [MPa]	$C_v(\alpha_2)$ [%]	α_3 [MPa]	$C_v(\alpha_3)$ [%]	W_d	$C_v(W_d)$
Modèle proposé	0.162	20.9	0.262	20.0	0.551	24.3
Table 3.2 Burgers [119]	0.163	24	0.347	10	0.561	14
Table 2 Muñoz et Anta [157]	0.15	23.5	0.22	13.1	0.497	11.4

2.6 Détermination des propriétés hygro-élastiques à l’échelle macroscopique locale

La Sec. 2.4 a permis d’obtenir des relations numériques entre les propriétés équivalentes élastiques et d’hygro-expansion en fonction de la distance depuis la moelle r à l’échelle mésoscopique à partir de données issues de la littérature scientifique sur l’essence *Pinus pinaster* (Ait.). Cette section se concentre sur la détermination des propriétés à l’échelle macroscopique locale de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction de leur position dans la grume grâce à des méthodes d’approximation des propriétés discrétisés à l’échelle mésoscopique reposant sur l’utilisation de fonctions NURBS (Non-uniform Rational Basis-Spline).

Les lamelles sont des parallélépipèdes rectangles de dimensions $l_1 = [100, 500]$ mm, $l_2 = 86$ mm et $l_3 = [12, 22]$ mm respectivement selon les axes X_1 , X_2 et X_3 du système de coordonnées global cartésien défini au centre de la grume « synthétique ». Comme la direction X_1 n’a pas d’influence sur les propriétés des lamelles selon les hypothèses prises dans la Subsec. 2.2.1, la position des lamelles est définie exclusivement dans la section transversale de la grume, plus spécifique-

ment en termes de distance depuis la moelle de leur centre R_{c_j} et de l'angle θ_{c_j} (avec j le numéro de la lamelle) entre les axes X_2 et R du repère local cylindrique, comme illustré sur la Fig. 2.16.

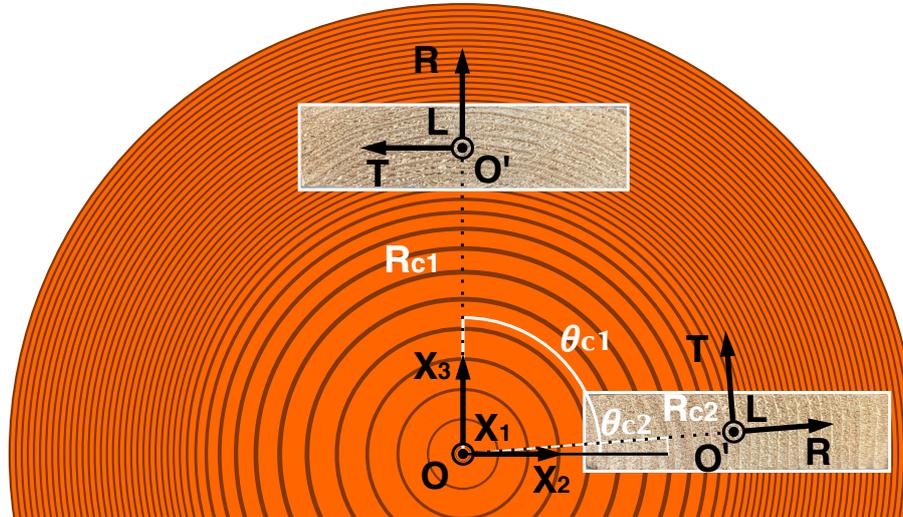


FIGURE 2.16 – Représentation schématique de la position des lamelles dans la grume.

2.6.1 Formalisme mathématique des NURBS

Cette subsection présente brièvement les fondamentaux des entités NURBS et est directement extraite des travaux de Audoux *et al.* [217], Vuillod *et al.* [218] et Vuillod [219] dont le code est utilisé pour ce travail de thèse. Les entités NURBS correspondent à une généralisation des courbes B-Splines qui, à leur tour, sont une généralisation des courbes de Bézier [220]. Les courbes de Bézier sont des courbes polynomiales de degré n dont les points sont définis par une représentation paramétrique reposant sur les polynômes de Bernstein et par $n + 1$ points de contrôle qui influencent la trajectoire des courbes et dont les extrémités agissent comme points de départ et d'arrivée. Quant à elle, les courbes B-splines sont définies mathématiquement par des combinaisons linéaires de fonctions splines (fonctions définies par morceaux par des polynômes) non-négatives à support compact. Ces fonctions permettent de remédier à l'inconvénient d'une définition globale imposée par les courbes de Bézier où la position d'un point de contrôle n'a de conséquences directes que sur une partie limitée de la courbe. Elles permettent ainsi une plus grande liberté de conception et d'ajustement et représentent un outil d'importance pour des problèmes d'approximation ou d'interpolation.

Utilisées à l'origine dans la conception assistée par ordinateur (CAO) dans les années 1990, les NURBS sont des objets mathématiques qui sont maintenant utilisées dans de nombreux domaines tels que l'optimisation topologique [221, 222, 223], l'optimisation de forme [224, 225], l'optimisation de l'anisotropie pour les composites à rigidité variable [226, 227] et/ou la génération de métamodèle [219, 228]. Dans ce manuscrit de thèse, les fonctions NURBS sont utilisées dans le dernier cas, c'est-à-dire comme métamodèle pour les propriétés élastiques et d'hygro-expansion de lamelles de bois en *Pinus pinaster* (Ait.).

Le formalisme mathématique des NURBS est présenté ci-dessous et est directement extrait

des travaux de Audoux *et al.* [217], Zani *et al.* [229] et Vuillod [219]. Considérons un problème à multiples entrées et sorties dont la fonction de transfert est donnée par $\mathcal{M} : \mathcal{A} \subseteq \mathbb{R}^N \mapsto \mathbb{R}^M$, avec \mathcal{A} , le domaine de dimension N où les paramètres d'entrée prennent leurs valeurs et \mathcal{B} , le co-domaine de dimension M où les sorties évoluent. L'objectif d'un métamodèle NURBS est d'approcher une base de données \mathbf{T} de $N_{TP} = \prod_{k=1}^N (r_k + 1)$ Target Points (TP), avec $(r_k + 1)$ le nombre de TPs de dimension M dans la direction k (c'est-à-dire chaque TP est défini dans \mathbb{R}^M). La base de données des TPs provient de résultats d'expérimentation ou de calculs haute-fidélité. Formellement, une entité NURBS est exprimée par :

$$\mathbf{h}(u^{(1)}, \dots, u^{(N)}) = \frac{\sum_{i_1=0}^{n_1} \dots \sum_{i_N=0}^{n_N} N_{i_1, p_1}(u^{(1)}) \dots N_{i_N, p_N}(u^{(N)}) \omega_{i_1, \dots, i_N} \mathbf{P}_{i_1, \dots, i_N}}{\sum_{j_1=0}^{n_1} \dots \sum_{j_N=0}^{n_N} N_{j_1, p_1}(u^{(1)}) \dots N_{j_N, p_N}(u^{(N)}) \omega_{j_1, \dots, j_N}}, \quad (2.24)$$

où \mathbf{h} est une fonction rationnelle à valeurs vectorielles de dimension M , évaluée aux coordonnées normalisées $(u^{(1)}, \dots, u^{(N)})$ définies sur l'intervalle $[0, 1]$, $\mathbf{P}_{i_1, \dots, i_N}$ correspond au vecteur contenant les M coordonnées des Control Points (CP) générique et ω_{j_1, \dots, j_N} équivaut aux poids associées aux CPs. Le vecteur des CPs est défini comme $\mathbf{P}_{i_1, \dots, i_N} = \{P_{i_1, \dots, i_N}^{(1)}, \dots, P_{i_1, \dots, i_N}^{(M)}\}$ avec $(n_k + 1)$, le nombre de CPs dans la direction $k = 1, \dots, N$. Ainsi, les coordonnées des CPs qui définissent l'hyper-réseau de contrôle ont pour coordonnées $P_{i_1, \dots, i_N}^{(j)}$ avec $j = 1, \dots, M$. Finalement, $N_{j_k, p_k}(u^{(k)})$ correspondent aux polynômes de Bernstein de degré p_k , associés à la direction d'entrée k , et sont définis de manière récursive par l'algorithme de Cox et De Boor [230, 231] en fonction des polynômes associés de degré inférieur $0 \leq q_k \leq p_k$. Ces polynômes sont définis non-nuls sur $p_k + 1$ intervalles du vecteur nodal qui est déduit à partir des coordonnées normalisés ayant généré la base de données de départ.

Pour plus d'informations sur les fonctions NURBS, le lecteur de ce manuscrit peut se reporter à l'ouvrage de Piegl et Tiller [220]. Pour plus d'informations sur l'influence des différents paramètres sur la fonction de sortie NURBS, c'est-à-dire le degré des polynômes, les coordonnées des CPs, les poids associés et les intervalles de définitions des fonctions de bases définis par le vecteur nodal, le lecteur est invité à consulter les travaux de Vuillod [219].

2.6.2 Modélisation de la grume via des fonctions « Non-uniform rational basis-spline » (NURBS)

Dans ce travail de thèse, les entités NURBS sont utilisées pour construire un métamodèle des lamelles de bois, dans le but d'obtenir une évolution continue (dans la lamelle) des propriétés élastiques et d'hygro-expansion en fonction de la distance depuis la moelle du *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction des propriétés discrètes obtenues en Sec. 2.4. En d'autres termes, les fonctions NURBS sont utilisées comme courbes d'approximation pour estimer toutes données scalaires identifiées par leur distance depuis la moelle r à partir d'une base de données de TPs discrétisées. En effet, de par les hypothèses prises dans la Subsec. 2.2.1, les propriétés équivalentes discrètes sont uniquement dépendantes de la distance depuis la moelle r et sont indépendantes de l'angle θ ou de la direction longitudinale.

Les fonctions NURBS sont utilisées pour approximer un modèle $\mathbb{M} : \mathbb{R}^N \mapsto \mathbb{R}^M$, où $N = 1$ et $M = 16$ correspondent respectivement à la dimension de la coordonnée r et aux dimensions de l'ensemble des propriétés élastiques et d'hygro-expansion non-constantes souhaitées (moyenne et écart-type) extraites de l'étude numérique de la Sec. 2.4. Dans le cas présent, ces propriétés sont les modules de Young, les modules de cisaillement, les coefficients de retraits radiaux et tangentiels et les écarts-types correspondants (le coefficient de retrait longitudinal n'est pas pris en compte puisqu'il est considéré constant). La forme paramétrique explicite de chaque coordonnée d'une

entité NURBS avec seulement un paramètre d'entrée s'exprime sous la forme suivante :

$$h_b(u^{(1)}) = \frac{\sum_{i_1=0}^{n_1} N_{i_1, p_1}(u^{(1)}) \omega_{i_1} P_{b, i_1}}{\sum_{j_1=0}^{n_1} N_{j_1, p_1}(u^{(1)}) \omega_{j_1}} \quad (2.25)$$

où $h_b(u_1)$ est la propriété b évaluée en sortie de la fonction NURBS ($b \in [1, M]$) évaluée à la coordonnée d'entrée normalisée $u^{(1)} \in [0, 1]$, $n_1 + 1$ est le nombre de CPs de la courbe NURBS le long de la direction $k = 1$ et ω_{i_1} correspond à la pondération attribuée aux CPs d'indice i_1 . Dans ce travail de thèse, les poids sont considérés égaux à $\omega_{i_1} = 1$ pour chaque CP et le formalisme des B-splines est considéré.

Chaque relation numérique des propriétés d'entrée est discrétisée par le nombre de TPs N_{TP} tandis que le nombre de CPs $n_1 + 1$ de l'entité NURBS varie selon $N_{TP} = \delta n_1 + 1$, avec δ une constante appropriée. En utilisant l'algorithme d'ajustement de courbe développé par Vuillard [219] et Audoux *et al.* [228], les CPs appliquent la fonction NURBS correspondante à travers chaque propriété de sortie pour obtenir l'évolution des propriétés élastiques et d'hygro-expansion équivalentes en fonction de la distance depuis la moelle à partir des données discrétisées d'entrée des TPs.

2.6.3 Propriétés des lamelles à l'échelle macroscopique locale

Dans un premier temps, les paramètres des entités NURBS sont définis de manière à obtenir une relation continue entre les propriétés physiques (élastiques et d'hygro-expansion) et la distance depuis la moelle. Le nombre de PCs est égal à $N_{PC} = 136$ et qui correspond au nombre de discrétisation des relations numériques obtenues à la Sec. 2.4 pour $r \in [5, 140]$ mm. Le degré des fonctions de base NURBS est défini sur la base de l'expérience égal à $p_1 = 3$ et le ratio entre les TPs et les CPs est défini égal à $\delta = 1/3$. En effet, la valeur de ce ratio doit être comprise dans l'intervalle $[1/3, 2/3]$ [232]. Une valeur qui se rapproche de la borne supérieure de l'intervalle permet d'obtenir une meilleure fidélité tout en laissant la possibilité d'obtenir des erreurs de surapprentissage pour des valeurs de $\delta \geq 2/3$ tandis que une valeur se rapprochant de la borne inférieure permet d'accentuer l'effet de lissage de la courbe. Puisque l'on désire obtenir une représentation physique générale et continue de l'évolution des propriétés en fonction de la distance depuis la moelle, cette dernière valeur de $\delta = 1/3$ est privilégiée. Les entités de NURBS de sortie des propriétés sont comparées avec les valeurs discrétisées d'entrée en fonction de la distance depuis la moelle et sont illustrés en Figs. 2.17 et 2.18. Seules les valeurs moyennes des propriétés sont présentées ici.

Dans un second temps, les entités NURBS de sortie sont utilisées pour évaluer les propriétés de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) à l'échelle macroscopique locale. Pour chaque lamelle de la grume « synthétique » définie par ses dimensions dans le plan transverse $l_2 = 86$ mm et $l_3 = 22$ mm et défini par sa position R_{c_j} et θ_{c_j} , les propriétés de numéro b de chacun des points de cette lamelle peuvent être définies à partir des propriétés de sorties s_b grâce à la distance respective de ses points depuis la moelle r . On considère ici deux lamelles exemples c_1 et c_2 . Les positions de ces lamelles sont respectivement définies par $R_{c_1} = 80$ mm et $\theta_{c_1} = 90^\circ$ et par $R_{c_2} = 50$ mm et $\theta_{c_2} = 5^\circ$. Le procédé d'estimation des propriétés à l'échelle macroscopique locale est réalisé sur ces deux lamelles exemples et les propriétés équivalentes sont présentées en Fig. 2.19.

Comme les propriétés d'entrée ne sont que dépendantes des distances depuis la moelle et la variabilité n'est pas prise en compte, la même loi de sortie s_b est utilisée pour chaque propriété b qu'importe la valeur de l'angle θ_c .

L'utilisation des entités NURBS a permis la construction d'un métamodèle permettant d'obtenir une évolution continue des propriétés d'hygro-expansion et élastiques des lamelles de LCAs à l'échelle macroscopique locale en *Pinus pinaster* (Ait.). Ces résultats permettent d'obtenir une

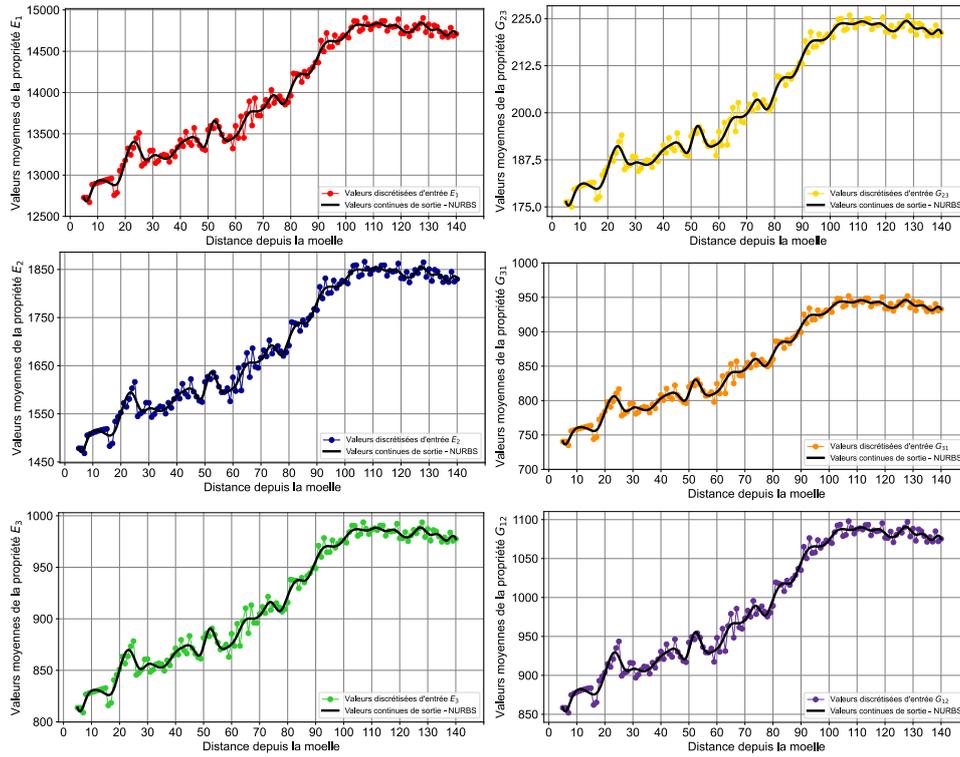


FIGURE 2.17 – Comparaison pour les propriétés élastiques entre les données d’entrée discrétisées et de sortie continues issues de l’utilisation des fonctions d’approximation NURBS.

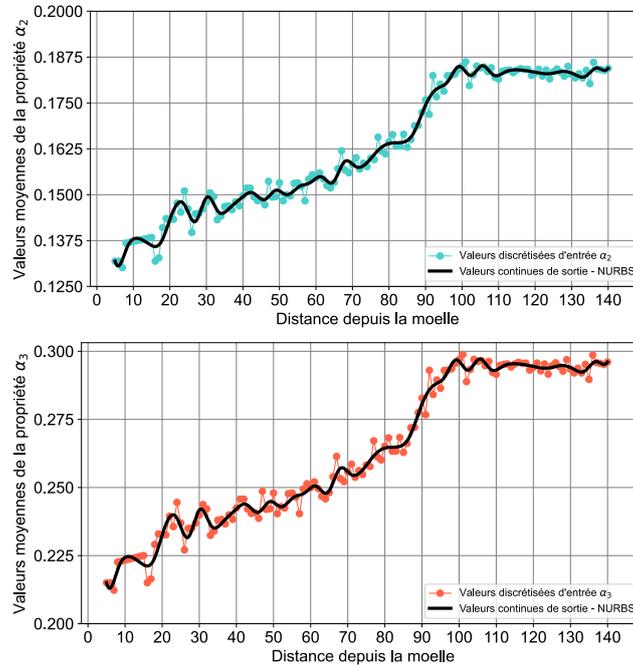


FIGURE 2.18 – Comparaison pour les propriétés d’hygro-expansion entre les données d’entrée discrétisées et de sortie continues issues de l’utilisation des fonctions d’approximation NURBS.

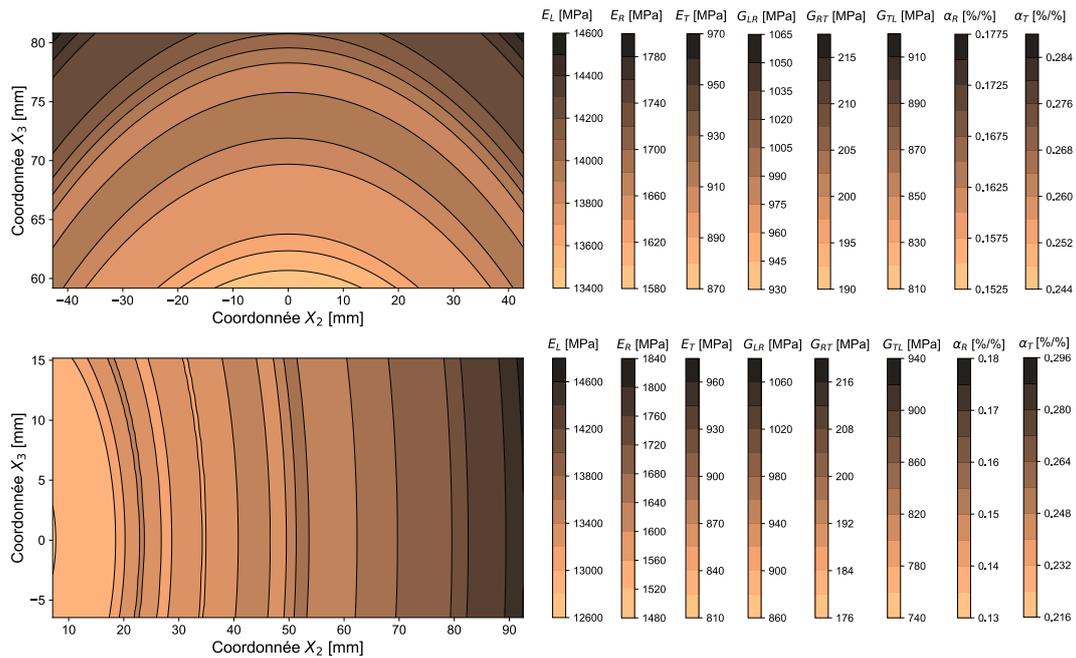


FIGURE 2.19 – Exemples d’estimation des propriétés élastiques et d’hygro-expansion transverses à l’échelle macroscopique globale pour deux lamelles de bois de positions respectives $R_{c1} = 70$ mm et $\theta_{c1} = 90^\circ$ et par $R_{c2} = 50$ mm et $\theta_{c2} = 5^\circ$.

modélisation de l’évolution des propriétés dans les lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) sans obtenir de discontinuités provoquées par la modélisation de phases de propriétés différentes ou de considérer la lamelle avec des propriétés constantes. Le modèle permet également d’obtenir les moyennes et écart-types des propriétés d’hygro-expansion et élastiques de toute lamelle en fonction de sa géométrie et de ses coordonnées dans le système de référence local cylindrique de la grume dans le plan transversal des grumes. Ainsi, les NURBS permettent une modélisation des propriétés à l’échelle macroscopique locale de toutes typologies de lamelles (le plus communément en dosse et en quartier) observable sur la chaîne de production de l’entreprise GB. Toutefois, il est possible de remarquer que l’évolution des propriétés est indépendante de la direction circonférentielle des cernes et la présence de BC ou de défauts est négligée dans ce premier modèle. Néanmoins, l’utilisation des entités NURBS comme métamodèle représente une innovation dans le domaine du bois. En effet, elles permettent d’approximer les propriétés de structures issues d’un matériau naturel, hétérogène et anisotrope, le *Pinus pinaster* (Ait.), tout en prenant en compte la variabilité associée. L’utilisation des NURBS permet ainsi de sortir des hypothèses fortes de propriétés constantes classiquement utilisées dans l’étude du comportement des résineux.

2.7 Conclusions

L’objectif de ce chapitre est d’obtenir, à partir des données issues de la littérature scientifique et regroupées dans le Chapitre 1, les propriétés d’hygro-expansion et élastiques de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction de leur position relative dans les grumes. Tout d’abord, une modélisation paramétrique à l’échelle microscopique de grumes « synthétiques » de *Pinus pinaster* (Ait.) a été réalisée à partir des informations sur les propriétés géométriques et physiques issues de la littérature scientifique. De multiples hypothèses ont été émises pour réduire la complexité du problème de modélisation. Ces hypothèses se concentrent principalement sur la forme des

grumes modélisées, sur la présence de propriétés physiologiques différentes et sur la présence de défauts éventuels. Les propriétés, moyenne et variabilité associée, ont été discrétisées en fonction du numéro de cerne depuis la moelle. L'utilisation des informations disponibles dans la littérature scientifique sur l'influence de la densité relative sur les propriétés d'hygro-expansion et élastiques de *Pinus pinaster* (Ait.) a également donné lieu à une modélisation analytique des propriétés à l'échelle microscopique des phases de IW et de FW de chaque cerne des grumes « synthétiques ». Ensuite, les propriétés à l'échelle mésoscopique ont été obtenues. Les volumes de *Pinus pinaster* (Ait.), considérés comme des stratifiées composées par l'alternance de phases de IW et de FW sont générés en fonction de leur position relative dans les grumes grâce à un script paramétrique codé dans l'environnement Python[®]. Un modèle EF de ces VERs a ensuite été créé dans le code EF commercial Ansys[®]. Enfin, une méthode d'homogénéisation numérique basée sur l'équivalence de l'énergie de déformation des milieux périodiques permet d'obtenir les propriétés équivalentes élastiques tandis que les propriétés d'hygro-expansion sont obtenues grâce à un cas de chargement hygrique appliquée à une loi des mélanges. Les propriétés d'hygro-expansions et élastiques des volumes équivalents sont obtenues et discrétisées en fonction de la distance depuis la moelle de leur centre. Le modèle prend également en compte la variabilité des propriétés en fonction de la distance depuis la moelle en employant la méthode de Monte-Carlo. Finalement, des entités NURBS sont utilisées pour le développement d'un métamodèle dont l'objectif final est de proposer une évolution continue des propriétés élastiques et d'hygro-expansions dans le plan transversal de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.).

Dans des études ultérieures, la dépendance des propriétés en fonction de la direction circonférentielle des cernes et de la direction longitudinale peut être prise en compte et les entités NURBS devront être utilisées pour permettre une représentation mathématique tri-dimensionnelle de l'évolution des propriétés dans la grume « synthétique ».

Les propriétés d'hygro-expansions et élastiques sont nécessaires au développement d'un modèle de comportement fidèle et robuste des LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) afin d'étudier la stabilité dimensionnelle des LCAs soumis aux variations climatiques, le chapitre suivant présente la stratégie de conception expérimentale de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction de l'offre de lamelles proposée par la chaîne de production de l'entreprise GB.

Conception de lamellés collés aboutés en Pinus pinaster (Ait.)

Ce chapitre se concentre sur la conception des séquences d'empilements de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) afin d'assurer leur stabilité dimensionnelle à des variations climatiques. Dans un premier temps, les séquences d'empilement choisies sont inspirées de travaux sur l'optimisation d'empilements thermo-mécaniquement découplés de structures des composites stratifiés qui sont adaptées et appliquées aux produits bois LCAs. Dans un second temps, la stabilité dimensionnelle des empilements conçus est estimée à partir de mesures réalisées par corrélation d'images numériques (CIN) des déplacements des faces des LCAs soumis à deux environnements climatiques différents.

L'optimisation de structures composites et spécifiquement des composites stratifiés est un sujet de recherche depuis la fin du XX^{ème} siècle pour leur importance notable dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile et du naval qui nécessitent des éléments structuraux légers aux propriétés mécaniques performantes. De nombreux travaux scientifiques étudient l'amélioration des propriétés de composites stratifiés (masse, performances mécaniques, thermiques ou vibratoires) grâce à une optimisation des séquences d'empilement [233], de forme [234] et/ou topologique [235]. Dans le cas des produits en bois, deux études se concentrent sur l'optimisation de leur comportement. Pech *et al.* [236] ont utilisé un algorithme d'optimisation métaheuristique (algorithme génétique) couplé à un métamodèle capable d'approximer le comportement mécanique de poutre lamellée collée soumise à une sollicitation en flexion, avec pour l'objectif la minimisation des déviations résultantes. Tandis que de Vito Jr. *et al.* [237] ont proposé une optimisation topologique des lamelles du cœur (hors lames extérieures) de produits bois, c'est à dire LCAs et bois lamellés croisés, dans le but de réduire leur masse totale avec une perte de performances minimale par rapport à une solution de référence donnée. Dans le premier cas, les travaux de Pech *et al.* [236] réalisent uniquement une minimisation de la déviation de poutres lamellées collées (non-aboutées) soumise à une sollicitation en flexion seulement en fonction du module longitudinal élastique des lamelles constituantes. Dans le second cas, les travaux de de Vito Jr. *et al.* [237] proposent une méthode de minimisation de la masse de LCAs en optimisant la topologie des lamelles intérieures des produits bois. A la connaissance de l'auteur, aucune étude ne propose de conceptions de séquences d'empilements de LCAs dans le but de garantir leur stabilité dimensionnelle aux variations climatiques.

La conception de structures composites reste un problème contemporain majeur et ouvert qui se traduit sous la forme d'une optimisation multi-échelles qui repose sur la maîtrise de deux propriétés inhérentes aux composites, à savoir l'hétérogénéité et l'anisotropie, qui influencent respectivement le problème à l'échelle mésoscopique des phases constitutives du composite intra-ply et aux échelles macroscopiques locale et globale du stratifié [238]. Lors de la conception de composites stratifiés, l'utilisation d'une structure à strates *identiques*, c'est à dire une structure composée de plis de propriétés et d'épaisseur similaires, permet de réaliser l'optimisation uniquement selon deux paramètres : le nombre de plis et leur orientation [32]. L'optimisation combinée de ces deux paramètres n'est pas triviale et requiert parfois l'utilisation d'hypothèses simplificatrices (symé-

trie des empilements, limitation du nombre d'orientation) pour obtenir des propriétés des stratifiés spécifiques (découplage membrane/flexion, orthotropie de la membrane) mais qui limitent le nombre potentiel de configurations optimal de stratifiés. Dans ce contexte, le développement d'une méthode « multi-level » [31] permettant une représentation macroscopique du comportement de stratifiés reposant sur l'utilisation de *paramètres polaires* [239] a permis une avancée majeure dans la conception de stratifiés en proposant une représentation mathématique, originairement dans le cadre de la théorie des plaques (Classical Plate Theory - CPT), des conditions générales nécessaires à l'obtention des propriétés de découplage membrane-flexion et d'homogénéité des comportements normalisés de rigidité et de flexion de la membrane de structures stratifiés. De ses équations ont été extraites une famille de solutions exactes, les séquences d'empilement Quasi-triviaux (QT), qui permettent la conception de stratifiés théoriques validant les deux propriétés de découplage et de même rigidité en membrane et en flexion. Plusieurs études se sont concentrées sur le développement de cette méthode de représentation dans le cas de la conception de stratifiés et de l'optimisation de leur comportement. Montemurro *et al.* [240] ont étudié la problématique du nombre minimal de plis lors de la conception de stratifiés pour obtenir des propriétés élastiques spécifiques. Valot et Vannucci [241] ont développé cette méthode pour obtenir des stratifiés complètement orthotrope en définissant un nombre minimal de plis. Les études de Montemurro [242, 243, 244] et de Catapano et Montemurro [245] ont élargi cette méthode dans le cas de théories des plaques d'ordre supérieur permettant d'utiliser cette méthode pour des stratifiés épais. Garulli *et al.* [32] ont utilisé cette méthode dans le cadre CPT pour obtenir des séquences d'empilement QT de stratifiés épais par superposition d'un nombre quelconque d'empilements QT « élémentaires » selon des règles pré-définies. Finalement, Izzi *et al.* [246] ont utilisé cette méthode dans le cas de l'optimisation de la masse et de la résistance de composites à rigidité variable.

Dans ce chapitre, les résultats des travaux précédents sont utilisés pour proposer des nouveaux empilements pour les LCAs de l'entreprise GB selon le concept d'empilement QT. Le travail de conception a pour but final d'améliorer la stabilité dimensionnelle des LCAs aux variations climatiques en étudiant les déplacements principaux qui sont mesurés par CIN. La CIN est une méthode de mesure optique non-destructive développée depuis les années 80 qui permet des mesures de forme, de déplacement et de champ de déformation à partir de plusieurs images prises d'un objet soumis à diverses sollicitations. Dans le domaine du bois, différentes méthodes de mesures optiques non-destructives ont été utilisées pour de multiples applications. Dupré *et al.* [247] ont utilisé un suivi de marqueurs stéréo pour estimer le comportement mécano-hygrique d'une peinture historique peinte sur panneaux de bois tandis que Bontemps *et al.* [248] ont utilisé des marqueurs ArUco (marqueurs fiduciaires) pour le contrôle du comportement mécanique à la rupture de poutres en bois. Kifetew [249] et Dang *et al.* [250] ont respectivement utilisé une méthode reposant sur l'utilisation d'un motif périodique « grid method » pour mesurer le déplacement surfacique de spécimens de bois lors du séchage et d'étudier le comportement d'échantillons de bois soumis à des chargements thermo-visco-hydro-mécaniques. Kumar et Shakher [251] ont mesuré sur la surface d'échantillons de bois des déformations hygroscopiques grâce à une méthode d'interférométrie. Finalement, Foust *et al.* [252] ont utilisé une méthode reposant sur la photoélasticité pour réaliser une analyse des contraintes sur un assemblage de bois goupillé. Dans le cas de la CIN, les études réalisées par Gauvin *et al.* [253] et Keunecke *et al.* [254] se concentrent sur la mesure 2D des déformations hygroscopiques d'échantillons de bois en fonction de leur orientation de cernes tandis que les études de Jeong *et al.* [255], Navaratnam *et al.* [256] et Bakalarz et Tworzewski [257] estiment les propriétés mécaniques et de rupture de plusieurs produits bois (LCAs, bois lamellés croisés, poutres). Dans le cas des LCAs, l'étude de Clouet [29] mesure par CIN 2D les déformations et contraintes hygroscopiques de configurations de lamelles collés en fonction de la présence de symétrie dans l'empilement ou de la typologie d'orientation de cernes

des lamelles. Dans ce travail de thèse, la CIN est utilisée grâce à l'utilisation de trois caméras qui permettent respectivement une mesure des déplacements tri-dimensionnelles des faces latérales par stéréo-corrélation et une mesure des déplacements bi-dimensionnelle des faces en bout des LCAs par CIN 2D. L'étude des déplacements principaux, c'est à dire de flèches, de tuilages et de torsions, en termes de valeurs moyennes et d'écart-types permet d'identifier les configurations qui permettent une amélioration de la stabilité dimensionnelle des LCAs du groupe GB.

Le chapitre est décomposé de la manière suivante. Premièrement, le concept d'empilements QT est exposé de manière concise et est suivi par la présentation des configurations de LCAs choisies ainsi que de leur production chez l'entreprise GB. Deuxièmement, la présentation du matériel et des logiciels de corrélation d'images utilisés (VIC-2D et VIC-3D¹) ainsi que du processus expérimental de mesure employé des déplacements des faces extérieures est réalisée.

3.1 Séquences d'empilement Quasi-Triviaux

Cette section présente le concept d'empilement QT et est directement extraite des travaux de Izzi [238]. On considère dans un premier temps un stratifié multi-couches composé de n_s plis et défini dans un repère cartésien $(o'; X, Y, Z)$ défini au centre du stratifié, comme illustré en Fig. 3.1. Considérons la loi constitutive du stratifié dans le cadre de la First-Order Shear Deformation

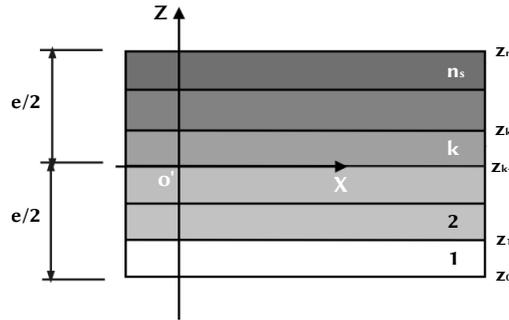


FIGURE 3.1 – Schéma représentatif de l'empilement des stratifiés, adaptée de Izzi [238].

Theory (FSDT) :

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{n} \\ \mathbf{m} \\ \mathbf{q} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ & \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \text{sym} & & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \\ \boldsymbol{\chi}_0 \\ \boldsymbol{\gamma}_0 \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

où \mathbf{A} , \mathbf{B} et \mathbf{D} sont respectivement les tenseurs de rigidité de membrane, de couplage membrane/flexion et de flexion du stratifié, tandis que \mathbf{E} est le tenseur de rigidité au cisaillement hors plan. \mathbf{n} , \mathbf{m} et \mathbf{q} sont respectivement les vecteurs des forces résultantes de membrane, des moments de flexion et des forces de cisaillement par unité de longueur, tandis que $\boldsymbol{\varepsilon}_0$, $\boldsymbol{\chi}_0$ et $\boldsymbol{\gamma}_0$ sont respectivement les vecteurs de déformations généralisées dans le plan, les vecteurs des courbures et les vecteurs de glissement hors plan du plan médian du stratifié. Par commodité, il est utile d'introduire les tenseurs de rigidité normalisés des laminés :

$$\mathbf{A}^* := \frac{1}{e} \mathbf{A}, \quad \mathbf{B}^* := \frac{2}{e^2} \mathbf{B}, \quad \mathbf{D}^* := \frac{12}{e^3} \mathbf{D}, \quad \mathbf{E}^* := \frac{1}{e} \mathbf{E}, \quad (3.2)$$

1. <https://www.correlatedsolutions.com>

où e est l'épaisseur totale du stratifié. Les conditions de découplage membrane/flexion et d'homogénéité peuvent être exprimées sous la forme :

$$\mathbf{B}^* = 0, \quad \mathbf{C} := \mathbf{A}^* - \mathbf{D}^* = 0, \quad (3.3)$$

où \mathbf{C} est appelé tenseur d'homogénéité. Pour un stratifié composé de plis identiques, agencés de manière similaire à la Fig. 3.1, les expressions de ces tenseurs en fonction des paramètres géométriques et matériaux de l'empilement sont les suivantes :

$$\mathbf{B}^* = \frac{1}{n_s^2} \sum_{k=1}^{n_s} b_k \mathbf{Q}^{in}(\delta_k), \quad \mathbf{C} = \frac{1}{n_s^3} \sum_{k=1}^{n_s} c_k \mathbf{Q}^{in}(\delta_k), \quad (3.4)$$

où \mathbf{Q}^{in} est le tenseur de rigidité réduit du pli correspondant et qui dépend de l'orientation définie par l'angle δ_k du pli (pour plus d'informations, voir [31]), n_s est le nombre de plis du stratifié et les coefficients b_k et c_k sont respectivement exprimés sous les formes suivantes :

$$b_k := 2k - n_s - 1, \quad c_k := 2n_s^2 - 12k(k - n_s - 1) - 4 - 6n_s. \quad (3.5)$$

Un empilement QT est un empilement de n_s plis dans lequel seulement m_s (avec $m_s \leq n_s$) orientations différentes sont présentes. La position des plis partageant la même orientation est telle que leur contribution au tenseur de couplage membrane/flexion et/ou au tenseur de rigidité d'homogénéité est nulle quelle que soit la valeur de l'orientation des plis. L'ensemble des couches partageant la même orientation dans un empilement QT est appelé groupe saturé (GS). Les conditions précédentes peuvent être analytiquement formulées sous la forme :

$$\mathbf{B}^* = \frac{1}{n_s^2} \sum_{i=1}^{m_s} \left[\mathbf{Q}^{in}(\delta_i) \sum_{k \in SG_i} b_k \right] = 0 \quad \forall \delta_i \quad \text{avec} \quad \sum_{k \in SG_i} b_k = 0 \quad \forall i, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n_s^3} \sum_{i=1}^{m_s} \left[\mathbf{Q}^{in}(\delta_i) \sum_{k \in SG_i} c_k \right] = 0 \quad \forall \delta_i \quad \text{avec} \quad \sum_{k \in SG_i} c_k = 0 \quad \forall i. \quad (3.7)$$

Par conséquent, un empilement QT peut satisfaire aux conditions de découplage et/ou d'homogénéité quelle que soit la valeur de l'orientation caractérisant chaque GS. Il est notable de remarquer que les empilements symétriques ne représentent qu'une petite partie de l'ensemble de la famille de solutions des empilements QT qui permettent une plus grande liberté de conception.

3.2 Présentation des configurations de lamellés collés aboutés choisis

Les LCAs produits dans le cadre de ce travail de thèse par l'entreprise GB sont des parallélépipèdes rectangles définis dans un repère cartésien ($o'; X, Y, Z$) défini au centre des stratifiés avec $L_x = 1500$ mm, $L_y = 86$ mm et $L_z = [66, 70]$ mm (en fonction du nombre de plis) la longueur des côtés des LCAs respectivement le long des axes X , Y et Z , comme illustré dans la Fig. 3.2.

Les lames de bois qui agissent comme les plis du stratifié sont produits à partir de l'aboutage de multiples lamelles de bois dans la direction longitudinale X . Le comportement de ces lamelles est variable et dépend de leur position dans les grumes sciées qui est influencée par le plan de sciage de l'entreprise GB. Ce plan de sciage définit la stratégie globale de l'entreprise du débit à réaliser sur les troncs écorcés et dicte l'aspect général des avivés résultants. La variation de la forme et de

2. <https://pro-lignum.com/nos-produits/bois-lamelle-colle>

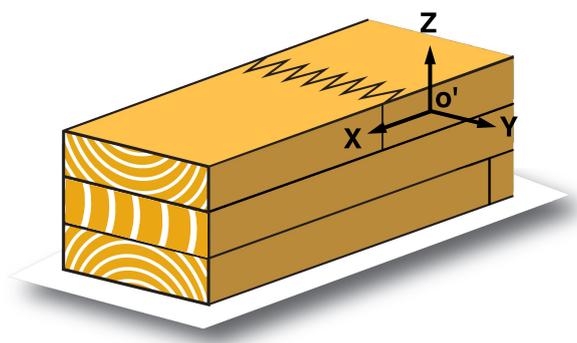


FIGURE 3.2 – Schéma représentatif des LCAs produits par l'entreprise GB, adapté de l'image de Pro-lignum².

la rectitude des troncs traités entraîne une variabilité importante des positions des lamelles dans les grumes correspondantes et donc de leurs propriétés.

Dans ce manuscrit, l'hypothèse suivante est posée : les lamelles sont réparties en « classes de comportement » qui dépendent des paramètres géométriques des lamelles. Plusieurs hypothèses sont émises pour construire les classes de comportement :

1. Les lamelles sont considérées de propriétés et d'épaisseur quasi-similaires pour respecter la condition de *quasi-identité*.
2. Le comportement hygro-mécanique de chaque lamelle est majoritairement influencée par leur motif de cernes qui modifie les directions préférentielles orthotropes L , R et T et donc leur orientation dans le repère local cylindrique, comme présenté schématiquement sur la Fig. 3.3.

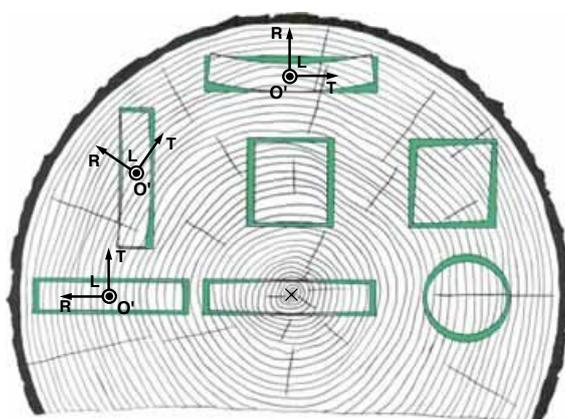


FIGURE 3.3 – Schéma représentatif des déformations des lamelles en fonction de leur position dans la grume, de leur géométrie et de leur motif de cerne, adapté de [258].

3. La définition des classes de comportement est définie principalement par la typologie des cernes de chaque lamelle et est définie selon 4 motifs : la dosse (D), la fausse-dosse (FD), le faux-quartier (FQ) et le quartier (Q). Ces motifs correspondent à des orientations de lamelles différentes et permettent leur répartition en classes de comportement qui est nécessaire à la conception des empilements QT. La représentation de ces 4 motifs est présentée en Fig. 3.4.
4. L'influence de la direction longitudinale sur le motif de cernes est considérée nulle. Ainsi, les lamelles destinées aux empilements de LCAs selon le concept d'empilements QT conservent

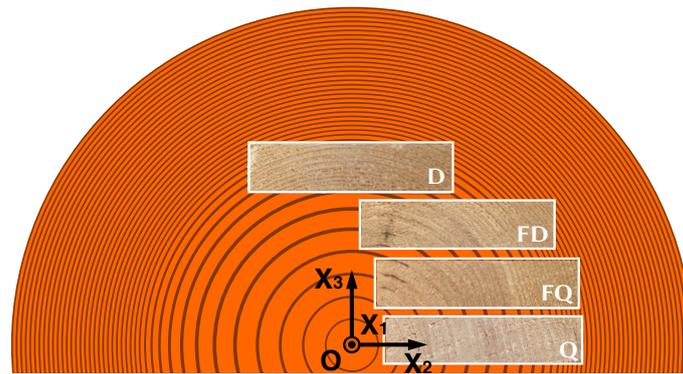


FIGURE 3.4 – Présentation schématique de la répartition des lamelles en 4 classes de comportement selon leur motif de cernes.

le même motif de cernes sur leur longueur, c'est à dire le long de la direction X .

5. Au cours du processus de production des lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.), les défauts éventuels (nœuds ou poches de résines) sont purgés. Des modifications locales importantes de l'angle de fil dues à la présence de défauts sont donc impossibles. Les angles de fil des lamelles de la même classe de comportement sont considérés comme du même ordre de grandeur et inférieur à 10° . Par conséquent, l'influence des angles de fils des lamelles ainsi que de l'angle de conicité de la grume sur le comportement des LCAs et sur la définition des classes de comportement est négligée dans ce travail de thèse comparée à l'influence du motif de cernes.

La répartition des lamelles dans les différentes classes de comportement (D, FD, FQ et Q) est établie à partir de l'étude de l'orientation des cernes constituants dans le plan transversal RT . Le classement est exclusivement visuel avec des mesures d'angles de cernes pour permettre une classification rapide d'un nombre important de lamelles sans provoquer un arrêt prolongé de la chaîne de production. Pour des lamelles dont la position dans la grume est définie par l'angle $0 \leq \theta_{cj} \leq 90^\circ$, la répartition est définie de la manière suivante :

- Chaque section transversale RT est divisée en trois zones d'épaisseurs égales dans la direction X_2 du repère global cartésien de la grume.
- Chacune des zones est classifiée selon trois types différents : une zone Dosse (Do), une zone de Transition (Tr) ou une zone de Quartier (Qu). La classification est réalisée par l'étude de l'orientation des cernes présents dans chaque zone selon les angles ϕ_i ($i = 1, 2, 3$) qui sont respectivement définis par les angles entre la direction X_3 et la direction tangentielle aux cernes de chaque zone, comme illustré en Fig. 3.5.
- Une zone i ($i = 1, 2, 3$) est définie soit comme une zone Qu si la valeur absolue des angles ϕ_i est inférieure à 45° , soit comme une zone Do si la valeur absolue des angles ϕ_i est supérieure à 45° ou comme une zone de transition Tr lorsque qu'il y a un passage en valeur absolue des angles ϕ_i entre $\pm 45^\circ$. Une zone Tr est obligatoirement présente entre une zone Do et Qu.
- La Tab. 3.1 donne la répartition des lamelles en classes de comportement en fonction de la classification des différentes zones des lamelles.
- Par symétrie selon les plans X_1X_2 et X_3X_1 , toutes les lamelles de la grume quelque soit leur position peuvent être réparties selon les différentes classes de comportement. Deux lamelles de la même classe de comportement dont les motifs de cernes sont symétriques selon le plan X_3X_1 sont différenciées par des signes positive (+) ou négatif (-) qui identifient leur

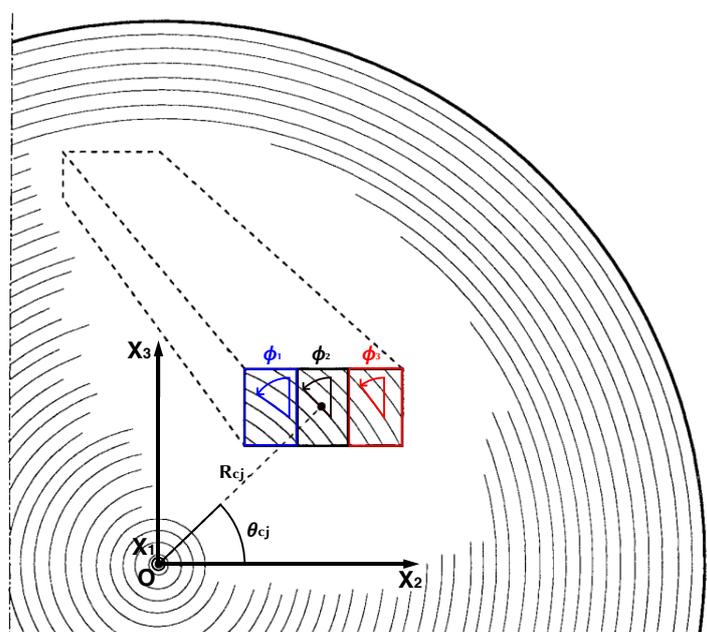


FIGURE 3.5 – Représentation schématique de la décomposition des sections des lamelles en zone et définition des angles d'orientation des cernes, adaptée de [25]

TABLE 3.1 – Répartition des lamelles en classes de comportement selon la classification des zones.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Dosse	Do	Do	Do
Fausse Dosse	Do	Do	Tr
	Do	Tr	Tr
	Do	Tr	Qu
Faux-Quartier	Tr	Tr	Qu
	Tr	Qu	Qu
Quartier	Qu	Qu	Qu

orientation tandis que deux lamelles dont les motifs de cernes sont symétriques selon le plan X_1X_2 possèdent la même orientation.

Une étude est réalisée sur la répartition en classes de comportement des lamelles de bois produites chez l'entreprise GB en fonction du plan de sciage. Le plan de sciage est défini pour favoriser la production de lamelles de typologie Dosse, comme illustré sur la Fig. 3.6. Les lamelles D et FD destinées à la menuiserie sont extraites de la zone d'aubier des grumes. Dans le cas de grumes à moelle excentrée ou à tige non-rectiligne, des lamelles de classe FQ et Q peuvent apparaître dans la chaîne de production. L'étude est réalisée sur 100 lamelles sans défauts extraites de la chaîne de production de GB. Le résultat de la répartition est présenté dans le Tab. 3.2.

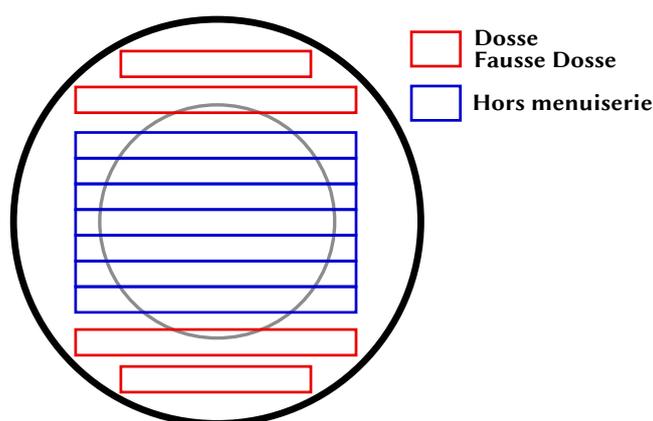


FIGURE 3.6 – Illustration du plan de sciage général de l'entreprise GB qui favorise la production de lamelles en dosse et fausse-dosse situées dans la partie d'aubier.

TABLE 3.2 – Répartition de 100 lamelles de l'entreprise GB de *Pinus pinaster* (Ait.) en classes de comportement.

Entreprise GB	Dosse	Fausse-Dosse	Faux-Quartier	Quartier
Répartition [%]	42	45	11	2

3.3 Conception des empilements expérimentaux

Dans la section précédente, la répartition des lamelles en classes de comportement selon le motif des cernes et ainsi de leur orientation permet la création des GS nécessaires à la conception des empilements QT expérimentaux. La famille de solutions QT sélectionnée dans ce travail est celle dont les répartitions des GS dans les empilements sont similaires, pour un nombre de plis fixé, à la répartition des typologies des lamelles disponibles sur la chaîne de production de l'entreprise GB. Ainsi, toutes les possibilités de solutions QT ne sont pas considérées pour ce travail de thèse.

Il faut préciser, d'ailleurs, que dans la théorie des séquences d'empilements QT, l'orientation des plis est définie selon le plan XY du repère global cartésien du stratifié. Au contraire, dans ce travail, l'orientation des lamelles est définie par rapport à la structuration du plan YZ. L'idée de ce travail est de s'inspirer des séquences QT pour proposer de nouveaux empilements LCA hygrothermo-mécaniquement stables en posant l'hypothèse que l'effet de l'architecture 3D de bois est négligeable pour des lamelles suffisamment fines. Dans ces conditions, le concept d'empilement QT est étendu aux cas des empilements des LCAs de notre étude. En effet, ce travail se concentre sur l'étude de la stabilité dimensionnelle des LCAs et utilise le concept d'empilement QT comme première tentative de compréhension pour l'optimisation de leur stabilité.

Plusieurs paramètres d'un LCA influencent également leur conception. Dans la direction de la longueur du LCA, c'est-à-dire la direction X, la présence des aboutages représente un paramètre important de conception. En effet, l'aboutage permet de concevoir des lames constituées de lamelles de classes de comportement différentes. Une illustration de l'aboutage réalisé chez l'entreprise GB est présentée en Fig. 3.7.

Comme la conception d'un LCA selon le concept des empilements QT nécessite des lames qui respectent elles-aussi la condition de « quasi-identité » en termes de propriété, la condition suivante est posée : les lames sont fabriquées à partir de l'aboutage de lamelles de classes identiques. La

3. <https://www.gascognebois.com>



FIGURE 3.7 – Illustration de l’aboutage réalisé chez l’entreprise GB pour la production de LCAs³.

moyenne des lamelles aboutées par lame de 1.5 m est approximativement de 2 à 5 courçons. Dans la direction Z de l’empilement, la condition précédente de « quasi-identité » des lames permet de réaliser la conception d’un LCA selon deux paramètres : le nombre de plis et leur orientation [32].

Quatres groupes d’empilement sont considérés dans ce travail de thèse pour étudier l’influence des paramètres de conception (lame de même classe de comportement, empilements symétriques, empilement QT et nombre de plis des LCAs sur leur stabilité dimensionnelle) :

1. Le **Groupe Tampon (GT)** est constitué par 10 LCAs classiques de 3 plis produits par l’entreprise GB. La répartition des lamelles est aléatoire aussi bien dans la direction de l’empilement que dans la direction de l’aboutage. Ce premier groupe représente un échantillon classique des LCAs produits par l’entreprise GB et sert de point de comparaison pour évaluer l’influence des différents paramètres de conception.
2. Le **Groupe Aboutage (GA)** est constitué par 14 LCAs de 3 plis qui respectent la condition de lames « quasi-identiques » où les lamelles d’une lame sont de la même classe de comportement et où l’empilement est aléatoire.
3. Le **Groupe Empilement 3 plis (GE3)** est constitué par 8 LCAs de 3 plis qui respectent la condition de « quasi-identité » des lames et où les empilements sont définis selon le concept d’empilement symétriques. Les LCAs sont définis en deux configurations symétriques qui sont respectivement :

GE3-1 : D/Q/D et GE3-2 : FD/Q/FD,

qui définissent les classes des lamelles composant les différents LCAs. Chaque configuration est représentée par 4 LCAs qui sont indexées par les indices a, b, c et d.

4. Le **Groupe Empilement 5 plis (GE5)** est constitué par 16 LCAs de 5 plis qui respectent la condition de « quasi-identité » des lames et où les empilements sont définis selon le concept d’empilement QT. Les LCAs sont définis en quatre configurations qui sont respectivement :

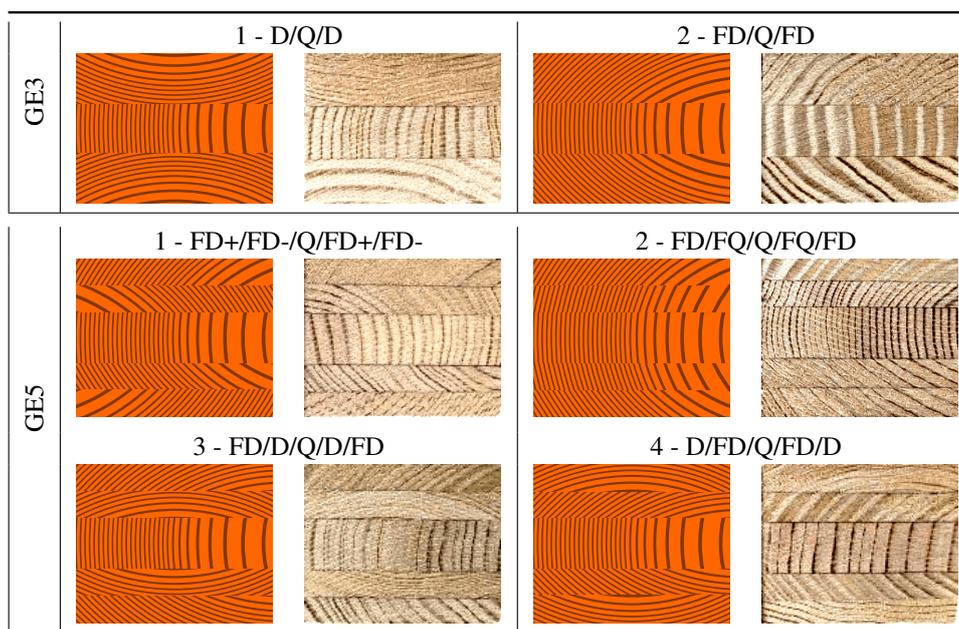
GE5-1 : FD/D/Q/Q/D/FD, GE5-2 : D/FD/Q/Q/FD/D,
GE5-3 : FD+/FD-/Q/Q/FD+/FD- et GE5-4 : FD/FQ/Q/Q/FQ/FD,

qui définissent les classes des lamelles composant les différents LCAs. Chaque configuration est représentée par 4 LCAs qui sont indexées par les indices a, b, c et d. Seul l’empilement GE5-3 n’est pas symétrique.

Dans l’enceinte de l’entreprise GB, les LCAs ont été produits sous la forme de produits de longueur de 4 m. Chaque LCA a ensuite été divisé en deux LCAs de 1.5 m. Ainsi, les LCAs des groupes GA, GE3 et GE5 sont représentées par 4 LCAs d’indice a, b, c et d. Il est notable de remarquer que sur les 4 LCAs de 1.5 m qui représentent une configuration d’empilements, les LCAs

d'indice a-b et c-d proviennent respectivement des mêmes produits LCAs de 4 m. Les configurations des groupes GE3 et GE5 qui dépendent du concept d'empilement QT ont été choisies en fonction de la répartition des lamelles en classe de comportement du Tab. 3.2. De plus, toutes les lames des LCAs (sauf de la configuration GE3-1) ont leur moelle orientée vers l'intérieur du LCA. Les configurations choisies selon le concept d'empilement QT pour GE3 et GE5 sont présentées dans la Tab. 3.3.

TABLE 3.3 – Configurations des empilements des groupes GE3 et GE5.



Les LCAs de 3 plis sont composés par 3 strates de 22 mm d'épaisseur tandis que les LCAs de 5 plis sont composés de 4 strates de 12 mm et 1 strate de 22 mm. En effet, l'étude de Valot et Vannucci [241] a permis d'identifier un nombre minimal de 6 plis comme nécessaire pour obtenir un découplage membrane/flexion et une orthotropie de la membrane dans un stratifié composé uniquement de strates orthotropes. Puisque le nombre de lamelles de classe Q est très limité (2% des lamelles totales) et sa présence est systématique au milieu de l'empilement des LCAs des groupes GE3 et GE5, le nombre de plis nécessaire est ajusté à 5 avec une lame centrale Q dont l'épaisseur est approximativement doublée. La totalité des empilements des LCAs est présentée en Chapitre 4. De ce chapitre, il est possible de remarquer que certaines lamelles (approximativement 6%) des LCAs des groupes GA, GE3 et GE5 ne respectent pas la classe de comportement demandée ou ne respecte pas la continuité de la typologie des lames. Ces erreurs proviennent d'une faute de catégorisation visuelle des lamelles en classes et d'erreurs lors de la production des LCAs. L'influence de ces erreurs dans les déformations des LCAs est considérée comme négligeable dans la suite de ce manuscrit.

3.4 Procédé expérimental de la mesure de stabilité dimensionnelle

3.4.1 Fabrication des LCAs et présentation de l'expérience

Fabrication des LCAs

La fabrication des LCAs est réalisée sur la chaîne de production de l'entreprise GB et est schématiquement représentée sur la Fig. 3.8. Les lamelles sont produites à partir de grumes d'âge minimum de 40 ans. Aucune traçabilité n'existe sur l'âge des arbres traités pour l'entreprise GB. Les défauts des lamelles sont éliminés grâce à l'utilisation d'un scanner Luxscan Combiscan+C200. Les aboutages des lamelles ont été réalisés en décembre 2021 grâce à une colle vinylique bi-composants avec un grammage de 180 g/m^2 . Les collages entre les différentes lames ont été réalisés en mai 2023 grâce à une colle vinylique du même type avec un grammage de 185 g/m^2 . Les LCAs sont ensuite stockés sur un rack de stockage avec 3 points de support qui permet d'assurer un transfert hydrique sur chacune des surfaces disponibles et négliger toutes déformations supplémentaires dû au comportement mécanosorptif (couplage mécano-hygrique) du bois entraînées par les poids propre des LCAs.

Présentation de l'expérience

Le procédé expérimental a pour ambition de mesurer l'effet des variations en humidité de LCAs se produisant au cours de leur stockage post-production et de mesurer les déformations hygroscopiques induites afin d'estimer la stabilité dimensionnelle de LCAs aux variations climatiques. Pour cela, les LCAs sont introduits dans une enceinte régulée en température et en humidité relative pour pouvoir commander précisément la teneur en eau d'équilibre (EMC). Les normes AFNOR XP P20-650-2 [259] destinée aux fenêtres, portes-fenêtres, châssis fixes et ensembles menuisés (produits manufacturés à partir de LCAs) et ISO 24339 [260] sur les revêtements de sol stratifiés prévoient respectivement de placer les échantillons dans deux ambiances différentes pendant 3 et 4 semaines. La première ambiance simule le cas d'un climat humide avec une température $T_{emp} = (23 \pm 2)^\circ \text{C}$ et une humidité relative de $h = (85 \pm 5)\%$ tandis que la seconde ambiance simule un climat sec avec une température $T_{emp} = (23 \pm 2)^\circ \text{C}$ et une humidité relative de $h = (30 \pm 5)\%$.

La durée de chacun des cycles $c = 1, 2$ est considéré de 4 semaines. L'ambiance humide est considérée similaire aux normes citées précédemment avec $T_1 = (23 \pm 2)^\circ \text{C}$ et $h_1 = (85 \pm 5)\%$ qui permettent d'obtenir selon les Eqs. (1.6) et (1.7) une teneur en eau d'équilibre $EMC_1 = 17.62\%$. Dans le cas de l'ambiance sèche, des problèmes sont survenus au cours des essais sur l'enceinte climatique avec une panne du système de déshumidification lors du second cycle climatique. Au lieu d'obtenir une température et une humidité relative similaire aux normes pour une ambiance sèche, les paramètres de l'enceinte ont été remplacés par une température de $T_2 = (23 \pm 2)^\circ \text{C}$ et une humidité relative de $h_2 = (60 \pm 5)\%$ qui correspondent à une teneur en eau $EMC_2 = 10.70\%$. L'expérience réalisée ne mesure donc que les effets hygroscopiques induites après un cycle d'humidification (approximativement $12\% \rightarrow 18\% \rightarrow 12\%$). Les teneurs en eau des LCAs ont été mesurées grâce à un humidimètre à contact MT30 (sans pointes - calibrage masse volumique $550 \pm 50 \text{ kg/m}^3$) de la marque Hydrobois⁶ sur 3 positions de mesure sur la face supérieure des LCAs. L'évolution des teneurs en eau moyennes (144 mesures) est présentée en fonction des dates de mesures sur la Fig. 3.9.

4. <https://www.kochmachinery.com>

5. <https://www.boisencolle.info>

6. <https://www.hydrobois.fr>

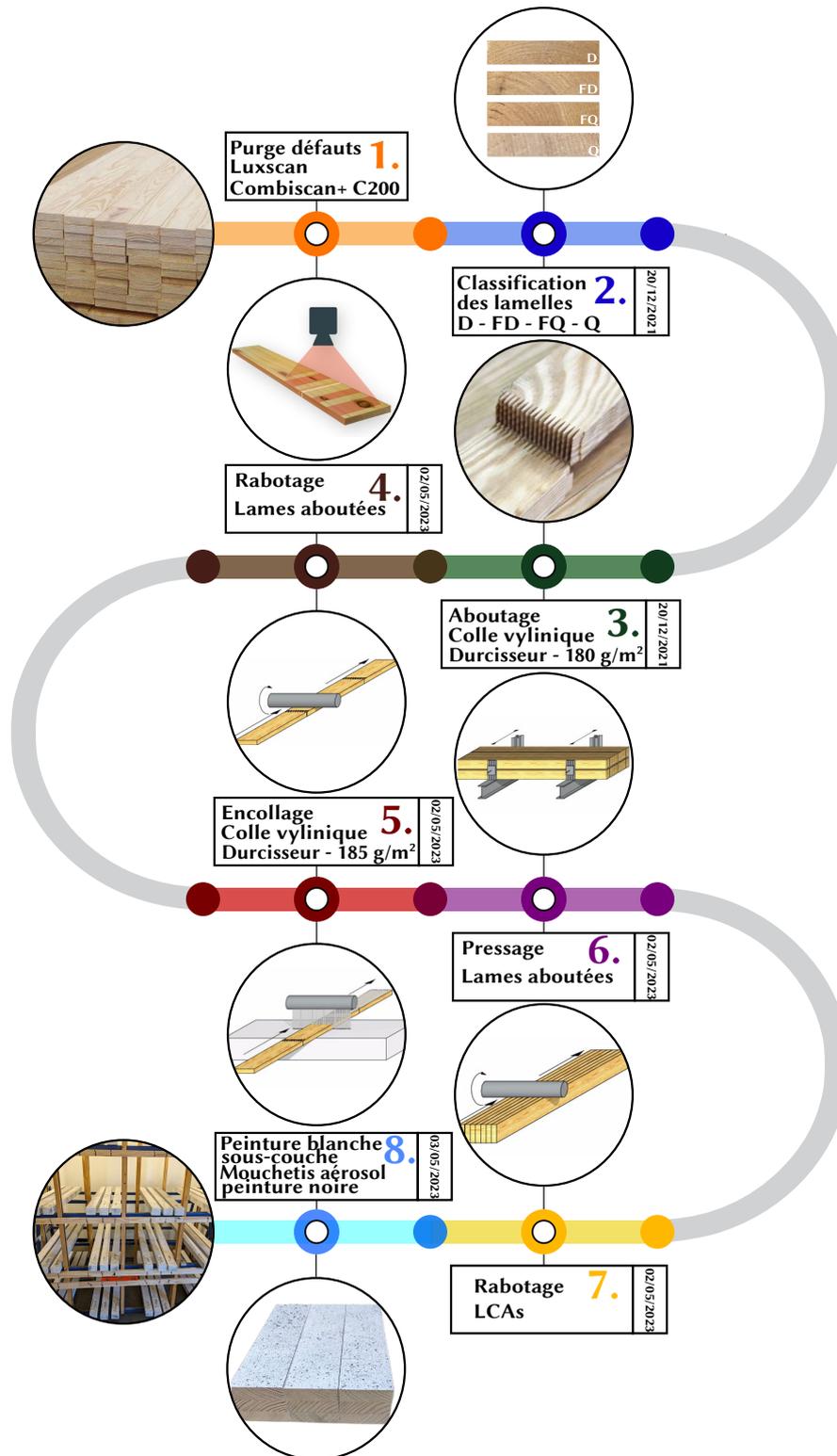


FIGURE 3.8 – Schéma représentatif de la fabrication des LCAs expérimentaux sur la chaîne de production de l’entreprise GB. Quelques images sont extraites de l’entreprise GB, de l’entreprise KOCH Machinery and Systems⁴ ou de l’entreprise Brettschichholz⁵. Note : Entre les étapes de Rabotage et d’encollage, les LCAs ont été conservés 1 an et demi dans un entrepôt de stockage.

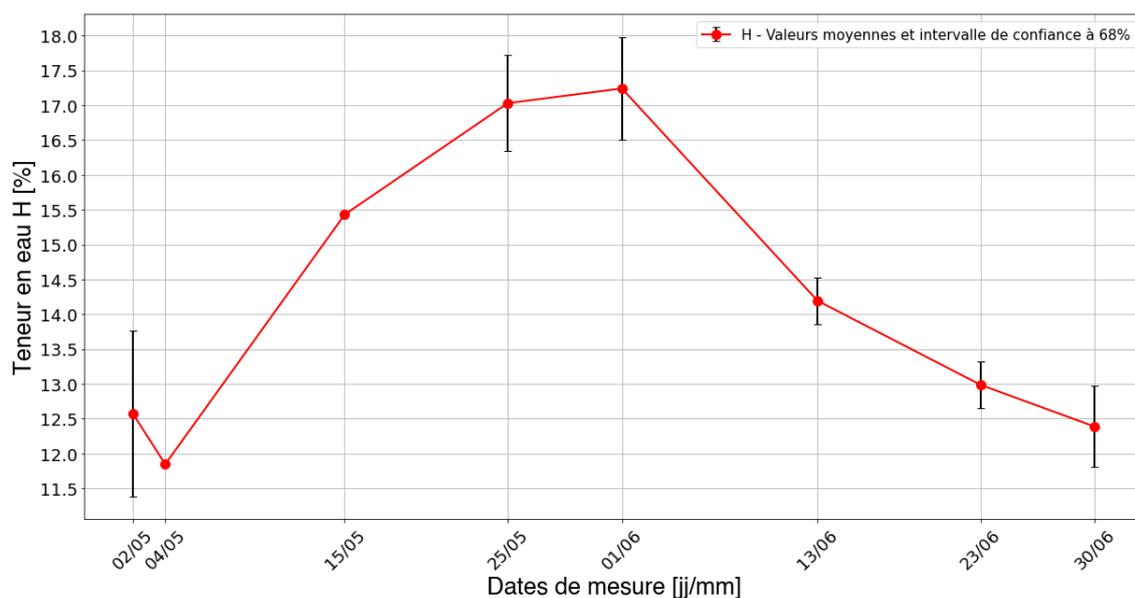


FIGURE 3.9 – Présentation de l'évolution des teneurs en eau moyennes des LCAs en fonction des dates de mesure.

Les données exactes des teneurs en eau et des masses des LCAs sont présentées en Tab. 3.4.

TABLE 3.4 – Teneurs en eau et masses des LCAs au cours de l'expérience. Les données en rouge sont extrapolées de régression par une fonction polynomiale d'ordre 2 avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.9988$.

Numéro de Mesures	0	1	2	3	4	5	6	7
Masse [g]	/	5223.1	5301.7	5329.8	5342.3	5267.3	5244.5	5234.7
Teneur en eau [%]	12.576	11.845	15.430	17.030	17.241	14.193	12.985	12.385
Dates [jj/mm]	02/05	04/05	15/05	25/05	01/06	13/06	23/06	30/06

3.4.2 Matériel, logiciels et installation expérimentale

La mesure de la stabilité dimensionnelle est réalisée à partir de la mesure du déplacement (quantité d'intérêt) des positions de points de repères sur les surfaces extérieures des LCAs. Les images nécessaires à l'utilisation de la technique de CIN sont obtenues aux mêmes dates que les mesures d'humidité de la Fig. 3.9. La stratégie de mesures nécessite d'obtenir les images des 6 faces extérieures de chacun des LCAs grâce à l'utilisation de 3 caméras. Le banc de mesure expérimental associé est placé hors mais proche de l'enceinte climatique sur le site de l'entreprise GB pour limiter les changements d'humidité lors des mesures lors du transport des LCAs entre l'enceinte climatique et le banc expérimental. Au niveau de la peinture appliquée aux LCAs pour réaliser la CIN, une première couche de couleur blanche (Peinture ligne pro monosous-couche⁷) est appliquée pour obtenir un contraste important avec la seconde couche noire (Peinture aérosol Color Touch multi-supports - Mat Noir⁸) appliquée par aérosol sous forme de mouchetis qui per-

7. <https://www.astral-batiment.com>

8. <https://www.peinturesjulien.fr>

met d'appliquer la méthode de CIN. Deux exemples de mouchetis pour la CIN pour respectivement une face en bout et une partie d'une face latérale d'un LCA sont illustrés en Fig. 3.10. Les tailles caractéristiques des mouchetis sont respectivement comprises dans les intervalles [3,40] pixels pour les faces mesurées par CIN 2D et [1, 12] pixels pour les faces mesurées par CIN 3D (valeurs approximatives).

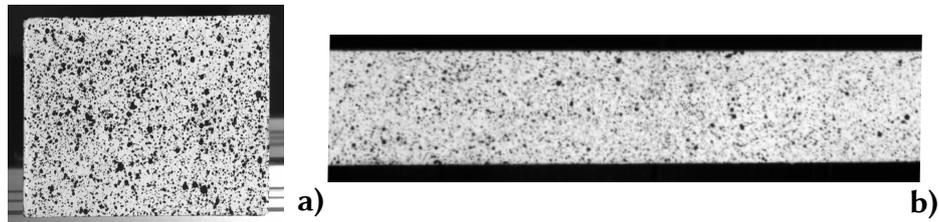


FIGURE 3.10 – Exemples de mouchetis obtenus par aérosol pour a) une face en bout pour la corrélation 2D et b) une partie d'une face latérale pour la stéréo-corrélation.

L'installation expérimentale est schématiquement représentée en Fig. 3.11.

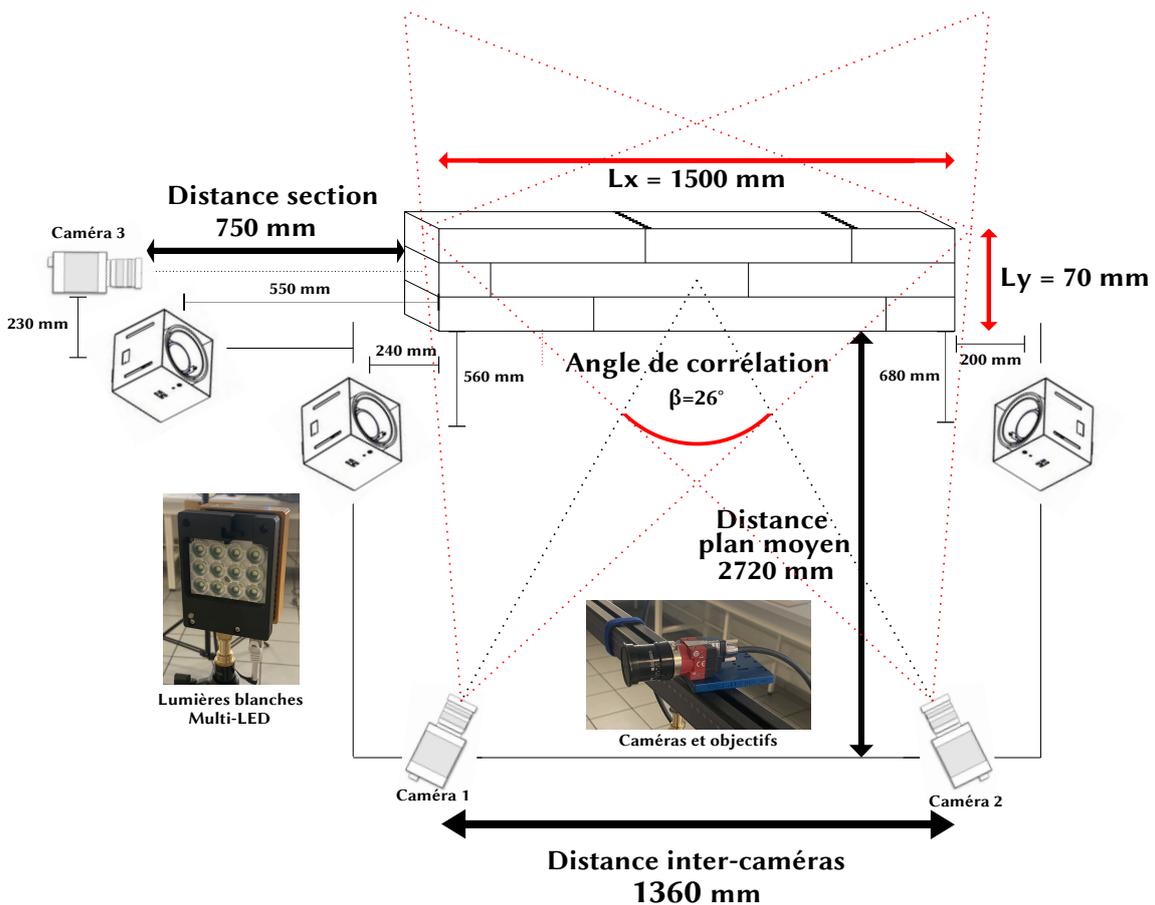


FIGURE 3.11 – Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'acquisition des images nécessaires à la méthode de CIN.

Le banc expérimental, qui est illustré en Fig. 3.12, est conçu pour faciliter l'acquisition des images pour le nombre important de 48 LCAs de ce travail de thèse. Les deux premières caméras permettent d'obtenir les images nécessaires pour obtenir le déplacement tri-dimensionnelle de

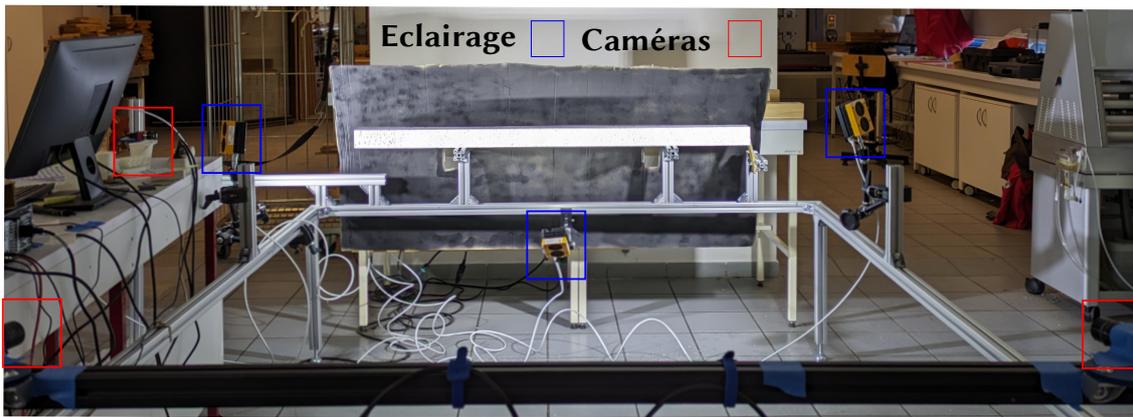


FIGURE 3.12 – Banc expérimental pour l'acquisition des images nécessaires à la méthode de CIN.

chacune des faces latérales des LCAs par stéréo-corrélation d'images tandis que la dernière caméra permet d'obtenir les déplacements en deux dimensions des deux dernières faces par CIN 2D. L'intégralité du matériel (caméras, lumières) a été fixé sur un bâti pour obtenir un minimum de déplacements relatifs au cours des essais qui s'étendent sur une durée de 57 jours. Des butées ont été ajoutées pour faciliter le positionnement des LCAs sur le banc expérimental pour conserver le même champ de vision des caméras tout au long de l'expérience. Les mouvements rigides induits par le transport des LCAs sont traités grâce aux logiciels de CIN.

Il est notable de remarquer que le nombre d'images par seconde n'a pas d'influence sur la CIN dans notre étude. En effet, les mesures sont réalisées à des intervalles de temps de l'ordre de la semaine de manière discontinue. Les caractéristiques du matériel utilisées pour l'acquisition des images sont présentées ci-dessous :

- **Caméras 1 et 2** : Alvium 1800 U-511⁹ - Résolution : 2472 (Ho) × 2064 (Ve) - Taille du Capteur : Type 1/1.8 - Taille du pixel : 2.74 μm x 2.74 μm - Norme d'interface : USB3 Vision - Étendue dynamique du capteur : 12 bits.
- **Objectifs 1 et 2** : CITRINE 1.4/12 C¹⁰ - Distance focale : 12 mm - Ouverture diaphragme choisie : f/4.0.

Caractéristiques du champ de mesure de la stéréo-corrélation d'images 3D :

Champ de vision horizontal (Ho) : 1550 mm \geq L_x - Champ de vision vertical (Ve) : 1293 mm \geq L_y - Distance du plan moyen : 2720 mm - Premier plan net : 1880 mm - Dernier plan net : 4900 mm - Taille pixel sur plan moyen : 627 μm équivalent à une échelle d'image de 1.59 px/mm - Dimension optimal mouchetis : 1881 μm .

Pour la suite de ce manuscrit, il est nécessaire d'indiquer que la caméra 2 porte des défauts qui augmentent de manière significative la variabilité des mesures en comparaison de la caméra 1. Les différences induites au cours du processus de corrélations d'images par les défauts du capteur de la caméra sont présentées pas à pas lors de la présentation des étapes du processus expérimental.

- **Caméra 3** : Alvium 1800 U-508¹¹ - Résolution : 2464 (Ho) × 2056 (Ve) - Taille du Capteur : Type 2/3 - Taille du pixel : 3.45 μm x 3.45 μm - Norme d'interface : USB3 Vision - Étendue dynamique du capteur : 12 bits.

9. <https://www.alliedvision.com/en/products/alvium-configurator/alvium-1800-u/511>

10. https://schneiderkreuznach.com/application/files/5216/8068/8382/CITRINE_14_12_C_1001951_datasheet.pdf

11. <https://www.alliedvision.com/en/products/alvium-configurator/alvium-1800-u/508>

- **Objectif 3** : CITRINE 1.9/35 C¹² - Distance focale : 35 mm - Ouverture diaphragme choisie : f/14.0.

Caractéristiques du champ de mesure de la corrélation d’images 2D :

Champ de mesure (Ho) : $186.6 \text{ mm} \geq L_y$ - Champ de mesure (Ve) : $155.7 \text{ mm} \geq L_z$ - Distance du plan moyen : 750 mm - Premier plan net : 720 mm - Dernier plan net : 780 mm - Taille pixel sur plan moyen : $75.73 \mu\text{m}$ équivalent à une échelle d’image de 13.2 px/mm.

- **Lumières blanche x4** : MULTILED QX GSVITEC¹³ - 150 W - 48 V - 12.000 Lumens - Lentilles (Ho x Ve) : $12^\circ \times 12^\circ$

3.4.3 Mesure expérimentale des déplacements

Les étapes de la procédure expérimentale d’acquisition et de traitement des images pour la CIN ainsi que les logiciels associés sont illustrées sur la Fig. 3.13. Les logiciels utilisés sont le groupe de logiciels VIC-Snap (version 9), VIC-2D (version 7) et Vic-3D (version 9) fournis par l’entreprise Correlated Solutions® et destinés à l’acquisition et la corrélation d’images numériques et les deux environnements MATLAB® et Python® permettant l’exploitation des données de corrélations issues des logiciels précédents pour le calcul et la présentation graphique des déplacements et de la stabilité dimensionnelle des LCAs.

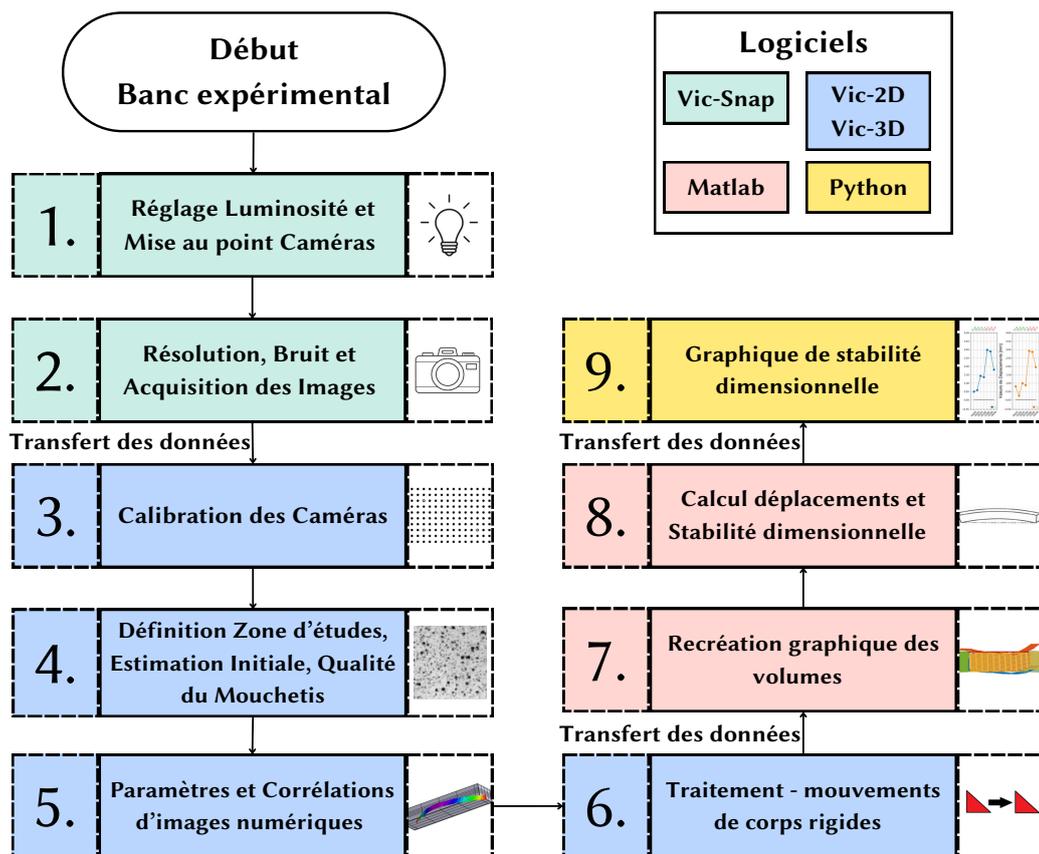


FIGURE 3.13 – Logigramme de la procédure expérimental d’acquisition des images, de corrélation d’images numériques et du calcul de stabilité dimensionnelle des LCAs.

12. https://www.adept.net.au/lenses/schneider/pdf/CITRINE_19_35_C_1001960_datasheet.pdf

13. https://www.chromos.ch/industrial/wp-content/uploads/sites/4/2022/06/Datasheet_MULTILED_QX.pdf

Les différentes étapes du processus expérimental sont présentées de manière exhaustive ci-dessous et respectent les lignes directrices du guide de l'iDICs (International Digital Image Correlation Society) [261] :

1. La qualité de la luminosité est assurée par deux paramètres qui sont l'ouverture du diaphragme des objectifs et le temps d'exposition du capteur. Le temps d'exposition est respectivement de 1.3 ms pour les caméras 3D et de 1.1 ms pour la caméra 2D. Pour rappel, les ouvertures de diaphragme sont respectivement de $f/4.0$ pour les caméras 3D et de $f/14.0$ pour la caméra 2D. L'homogénéité de la luminosité sur toute la surface extérieure étudiée est assurée par le placement des 4 lumières blanches multi-LED. La qualité de la luminosité telle que affichée par le logiciel VIC-Snap est présentée sur la Fig. 3.14. Il est notable de remarquer que les défauts induits sur la caméra 2 baissent significativement la luminosité perçue par la caméra 2 en comparaison de la caméra 1 lors de la mesure 3D et plus précisément sur la partie gauche des images des LCAs.

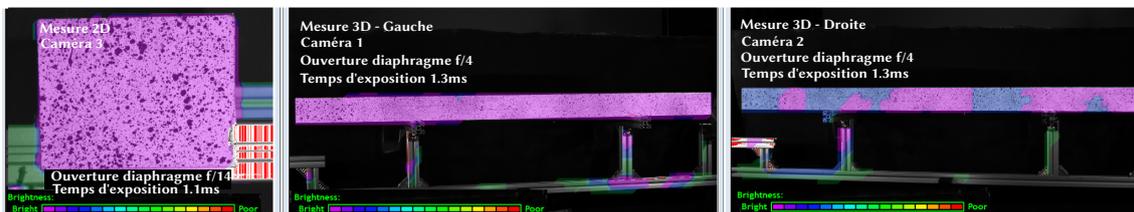


FIGURE 3.14 – Caractéristique et qualité de la luminosité selon l'évaluation du logiciel VIC-Snap des 3 caméras pour l'acquisition des images des LCAs.

2. Le bruit de mesures des caméras est défini sous la forme de ratio de déplacement par pixel. Le bruit est défini pour la caméra 2D par 0.021 pixel de bruit qui correspond à $1.59\mu\text{m}$ et pour les caméras 3D par un bruit de 0.015 pixel qui correspond à une incertitude de $9.4\mu\text{m}$. Ces estimations de bruit sont réalisées par le logiciel Vic-Snap et sont comparés aux bruits effectifs obtenus lors des mesures. La qualité de la mesure telle que affichée par le logiciel VIC-Snap est présentée sur la Fig. 3.15. L'acquisition des images de calibration ainsi que des 6 faces extérieures de chaque LCA est ensuite réalisée. Les mesures de la caméra 2 sont sensiblement plus incertaines que celles de la caméra 1.

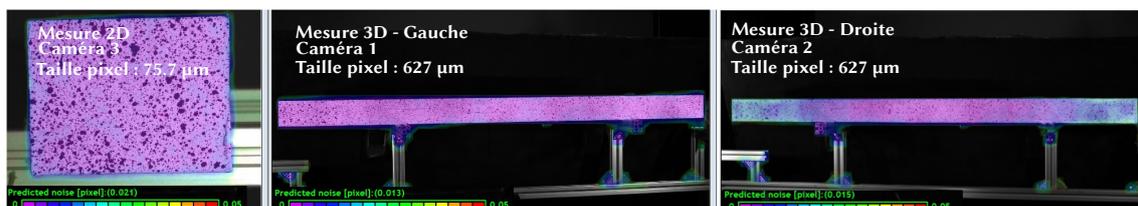


FIGURE 3.15 – Estimations respectives de 0.021 bruit/pixel et 0.013-0.015 bruit/pixel pour la CIN 2D et la stéro-corrélation et répartition du bruit de mesures selon l'évaluation du logiciel VIC-Snap des 3 caméras pour l'acquisition des images des LCAs.

3. La calibration est réalisée grâce à des mires d'étalonnage physiques compatibles avec les logiciels VIC-2D et VIC-3D. La présentation des mires d'étalonnage ainsi que de leurs paramètres géométriques est faite sur la Fig. 3.16. La calibration 2D est réalisée grâce à une seule image qui permet de définir l'échelle de longueur des images. La calibration 3D est réalisée sur 106 paires d'images issues des caméras 1 et 2 en permettant à la cible 3D de couvrir l'ensemble du champ de vision horizontal des caméras ainsi qu'en induisant des

rotations de la cible autour des trois directions du système de référence cartésien du LCA permettant d'améliorer la qualité de la stéréo-corrélation d'images. La qualité du calibrage 3D est définie grâce au score d'étalonnage ou écart-type résiduel de calibrage qui est défini comme un terme statistique utilisé pour décrire la différence entre les écarts-types des valeurs mesurées des dimensions de la cible de calibrage avec les valeurs prédites par régression avec un résultat de 0.040 pour la caméra numéro 1 et de 0.047 pour la caméra numéro 2. Ces résultats sont cohérents et acceptables selon les recommandations du logiciel VIC-3D qui accepte un maximum de 0.100 de score de calibration.

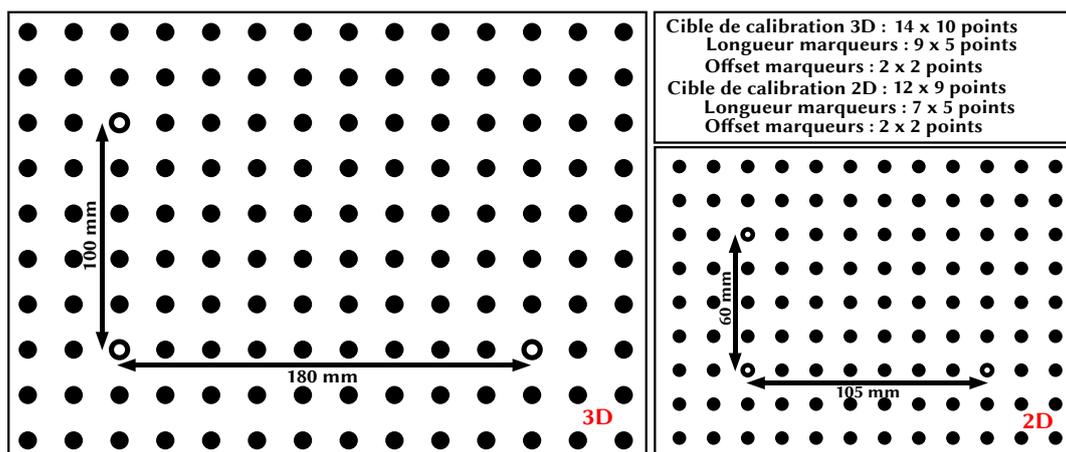


FIGURE 3.16 – Présentation des cibles destinées à la calibration des corrélations 2D et stéréo-corrélation 3D.

Les données de calibration pour la stéréo-corrélation sont présentées dans le Tab. 3.5. L'angle de stéréo-corrélation est de 26° qui est compris dans l'intervalle classique d'admissibilité de $[15^\circ, 35^\circ]$ recommandé par le guide des usages de CIN [261]. Pour des lentilles de distance focale de 12 mm, il est recommandé d'obtenir une valeur d'angle de stéréo-corrélation supérieure ou égale à 35° . Toutefois, les dimensions géométriques importantes des LCAs ainsi qu'une distance de mesure inférieure à 3 m pour maximiser la résolution des mesures ne permettent pas d'obtenir de telles valeurs d'angle de stéréo-corrélation sans que les spécimens ne sortent du champ de mesures horizontal.

TABLE 3.5 – Paramètres de calibration pour la stéréo-corrélations. Système de référence cartésien de la caméra 1 (X_1, Y_1, Z_1). Distorsion radiale (Seidel) d'ordre 2.

Paramètres	Caméra 1	Caméra 2	Paramètres	Stéréo-corrélation
Center (Ho)	pixel 1256.05	pixel 1268.47	Distance X_1 [mm]	1309.93
Center (Ve)	pixel 1064.09	pixel 1042.41	Distance Y_1 [mm]	0.18
Focal Length (Ho et Ve) [pixels]	4583.78	4620.97	Distance Z_1 [mm]	-315.61
Coefficients de distorsion radiale	$\kappa_1=-0.13$ $\kappa_2=0.29$	$\kappa_1=-0.10$ $\kappa_2=0.26$	Angle de corrélation [°]	26.06

4. Les zones d'études sont toutes les faces extérieures des LCAs dans leur intégralité. La faible

valeur du coefficient d'expansion hydrique dans la direction longitudinale (direction de la longueur des LCAs) assure que les dimensions des LCAs ne supplantent pas la dimension du champ de mesures horizontal. L'outil des logiciels VIC-2D et VIC-3D nommé « Initial Guess Selection » est ensuite utilisé. Cet outil est nécessaire dans ce travail de thèse pour pallier aux éventuelles hétérogénéités de la qualité du mouchetis (surfaces importantes d'application par aérosol pour 48 LCAs) et pour réaliser la CIN entre des images prises à des intervalles importants de l'ordre de la semaine où les déplacements des spécimens entre l'enceinte climatique et la zone de mesures ont induits des mouvements de corps rigides importants (notamment de rotation). Cet outil définit un motif facilement identifiable à partir de points de contrôles qui est successivement identifié et localisé pour chacune des images prises au cours de l'expérience. Le déplacement de ce motif qui est analogue au mouvement de corps rigide de la structure est ensuite utilisé pour réaliser la CIN sur toute la zone d'étude. Pour plus d'informations sur cet outil, le lecteur peut se référer au manuel d'utilisation du logiciel VIC-3D [262]. Cet outil permet également d'étudier la qualité des mesures des motifs réalisées par les caméras. Il permet notamment de comparer les qualités de mesures entre les deux caméras 1 et 2 de la stéréo-corrélation d'images et d'identifier les zones où les biais de mesures sont trop importants. La présentation et la comparaison des mesures des motifs entre les différentes caméras sur différentes zones de surfaces des LCAs sont réalisées en Fig. 3.17.

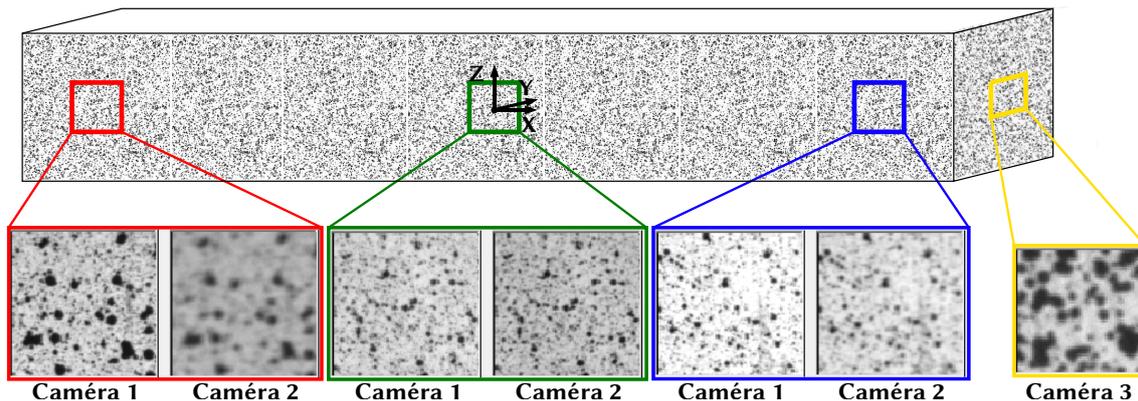


FIGURE 3.17 – Présentation et comparaison des motifs de mouchetis mesurés par les différentes caméras. Identification des zones de perte d'informations des mesures dûs aux défauts de la caméra 2.

Au centre des faces des LCAs, les deux caméras semblent mesurer la même qualité d'images de mouchetis. Cependant, il est visuellement possible de constater la perte d'informations induite par les défauts de la caméra 2 sur les bords des faces des LCAs. Dans la partie du LCA où $X \leq 0$, la perte d'informations est importante et ne sera pas prise en compte dans la suite de ce manuscrit. La partie du LCA où $X \geq 0$ semble conserver une qualité de motif suffisante. Ces mesures sont hypothétiquement conservées et sont étudiées dans les parties suivantes pour établir leur justesse.

5. Les paramètres de la CIN sont présentés dans le Tab. 3.6. La taille des imageries de mesures, c'est à dire les subsets, pour la CIN sont majorées pour obtenir un nombre suffisant de points de mesures tout en minimisant le bruit des mesures induits par les défauts de la caméra 2. Une augmentation de la taille des subsets résultent en l'apparition d'un lissage spatial des mesures et une augmentation de la résolution spatiale des mesures, c'est à dire la distance minimale entre deux entités localisées pouvant être résolues indépendamment. Dans ce travail de thèse, une augmentation de la résolution spatiale a une influence minime

sur les mesures de déplacements qui sont des phénomènes globaux sur les LCAs et dont la variabilité locale est faible.

TABLE 3.6 – Paramètres de la CIN pour les cas 2D et 3D en fonction des géométries des faces et du nombre de plis.

Paramètres	Faces 3D N° 1	Faces 3D N° 2	Faces 2D
Dimensions des Faces [mm x mm]	1500 x 86	1500 x 66 ou 70	86 x 66 ou 70
Taille subset [pixel]	101	77	51
Fonction de Pondération	Uniforme		
Taille du pas [pixel]	10	7	6
Nb de points de données	[3250,3500]	[4250,5400]	[19000,29000]
Résolution spatiale [pixel]	[9.65,10.0]	[6.55,7.60]	[5.84,7.43]
Interpolation des valeurs de gris	Optimized 8-tap spline		
Critère de corrélation	Méthode des résidus normalisés au sens des moindres carrés (NSSD)		
Options de corrélation	Interpolation des valeurs aux bords Auto-correction de calibration		
Marges maximum des seuils	Seuil de cohérence : 0.02 pixel Intervalle de confiance : 0.05 pixel Correspondance : 0.1 pixel		

L'erreur épipolaire est définie comme la distance entre la position d'un point de données (déterminée par la corrélation croisée d'une paire d'images de deux caméras d'un système stéréo de CIN) et la ligne épipolaire. On mesure dans ce travail de thèse l'erreur épipolaire sous la forme de moyenne et écart-type associé sur toutes les faces de 5 LCAs pour les 7 dates de mesures. L'outil d'auto-correction de la calibration du logiciel VIC-3D est utilisé pour réduire l'erreur épipolaire des mesures de stéréo-corrélation. L'erreur épipolaire est respectivement de 0.307 pixel avec un écart-type de 0.223 pixel dans le cas de la stéréo-corrélation et de $6.39 \cdot 10^{-3}$ pixel avec un écart-type de $7.44 \cdot 10^{-4}$ pixel dans le cas de la CIN 2D. L'erreur dans le cas de la stéréo-corrélation dépasse les recommandations du logiciel d'une erreur maximale de 0.100 pixel. Ce dépassement provient des déplacements répétés des LCAs entre l'enceinte climatique et les zones de mesures. L'influence de ces erreurs sur les résultats finaux est négligée et est considéré partiellement amorti par l'utilisation de l'outil « Initial Guess Selection ».

Les niveaux de bruits effectifs pour les mesures sont estimés en réalisant 5 mesures successives en début d'expérience sur 5 LCAs au même état de déformation hygroscopique. Les valeurs maximales en valeur absolue (sur les 25 mesures) des déplacements dans le système de repère cartésien du LCA permettent d'évaluer le niveau de bruit du système expérimentale de CIN. Les niveaux de bruits sont respectivement majorés par une incertitude de 0.055 mm dans le plan et 0.065 mm hors plan pour les faces traitées par stéréo-corrélation et de 0.02 mm dans le plan pour la CIN 2D.

6. L'outil des logiciels VIC-2D et VIC-3D « Remove Rigid Motion » permet de supprimer les mouvements de corps rigides des LCAs provoqués par le transport des LCAs entre l'enceinte

climatique et le banc expérimental lors des différentes sessions de mesures. La méthode utilisée est celle de la transformation moyenne qui est calculée pour chacune des images puis appliquée sous forme de transformation inverse pour obtenir une image traitée où la moyenne des déplacements et rotations de corps rigide comparée aux systèmes de référence des CINs 2D et 3D est de 0.

Un exemple de résultat de la CIN sur une des faces des LCAs est présenté en Fig. 3.18. Une augmentation du niveau de bruit et du biais de mesures est bien notable dans la zone identifiée où la perte d'informations induite par les défauts de la caméra 2 est la plus élevée. Cette zone est présente pour tous les LCAs et n'est donc pas prise en considération pour le calcul de la stabilité dimensionnelle.

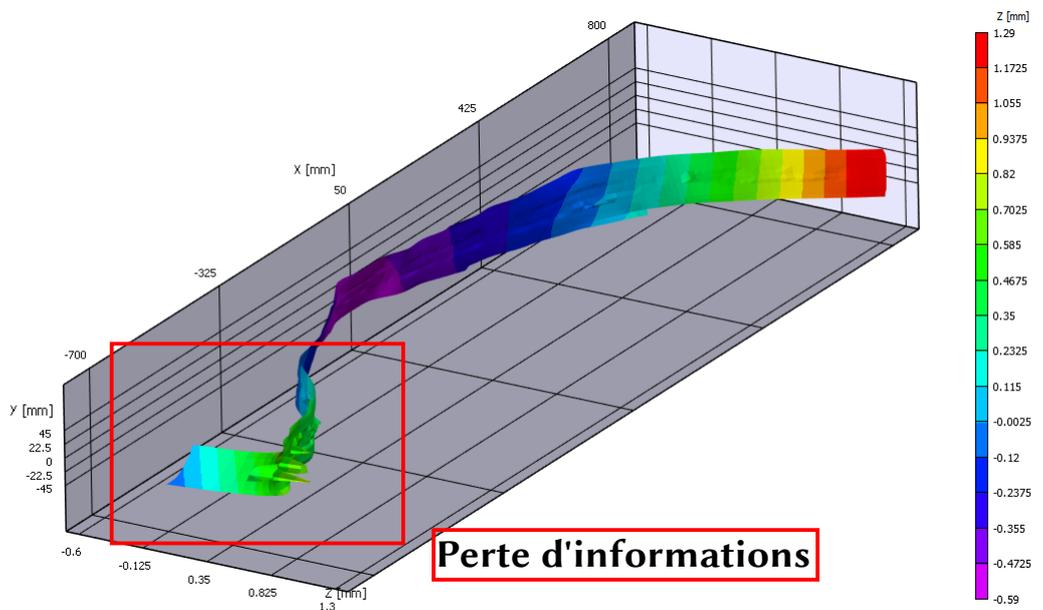


FIGURE 3.18 – Exemple de résultats de déplacements hors-plan pour une face latérale d'un LCA dans le repère global cartésien du LCA (o' ; X, Y, Z). La zone encadrée représente la perte d'informations de mesures la plus importante provoquée par les défauts de la caméra 2.

7. Les données de positions des points des 6 faces de chacun des LCAs sont importées dans le logiciel Matlab. Une représentation graphique de l'évolution des déplacements des faces des LCAs est ensuite réalisée. Un exemple de représentation graphique de l'évolution des déplacements des faces d'un LCA (code GE5-1b qui correspond à une configuration FD/D/Q/D/FD) est illustré en Fig. 3.19.

3.4.4 Évaluation de la stabilité dimensionnelle

La stabilité dimensionnelle d'un LCA est évaluée grâce à la mesure des positions relatives de points repères situées sur la surface extérieure de la structure étudiée. Les déplacements évalués sont généralement séparés en 3 catégories : les flèches, les tuilages et la torsion. Des illustrations graphiques de ces catégories sont présentées en Fig. 3.20.

Ces déplacements sont utilisés dans l'étude de Ormarsson *et al.* [263] pour étudier l'influence de la position d'origine comparée à la moelle de planches de bois sur leur stabilité dimensionnelle. Ces déplacements sont estimés à partir de la variation de la position relative de points repères

14. <https://www.woodmagazine.com>

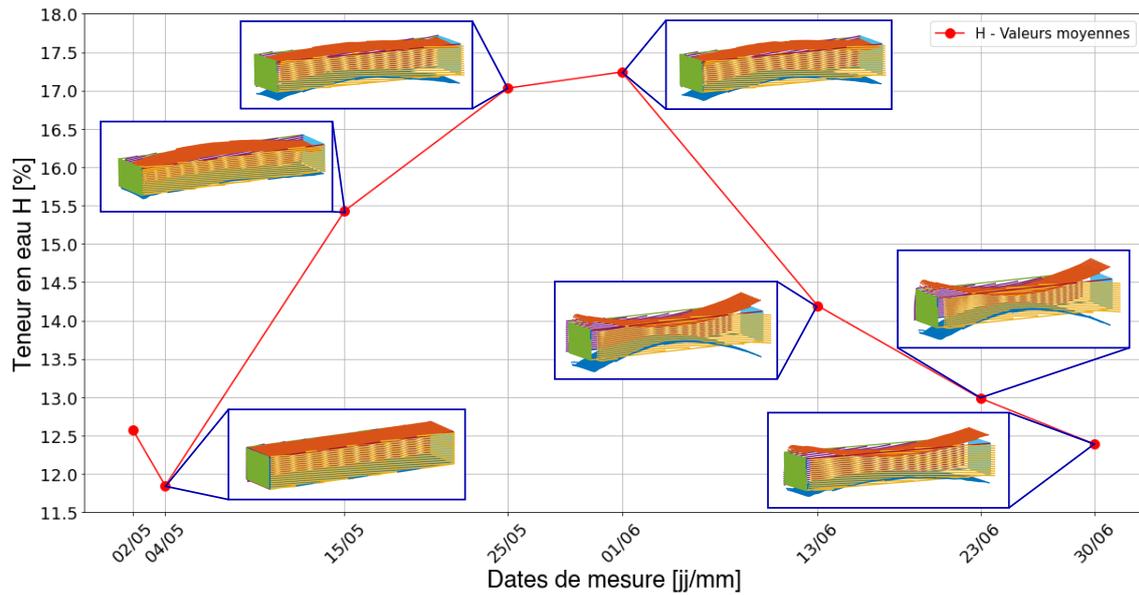


FIGURE 3.19 – Représentation graphique de l'évolution des déplacements des faces d'un LCA au cours de l'expérience. Le code du LCA est GE5-1b qui correspond à une empilement à 5 plis FD/D/Q/D/FD. Les déplacements sont magnifiés par un coefficient de 20.

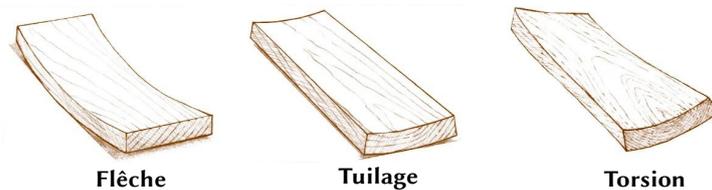


FIGURE 3.20 – Exemple graphique des déplacements classiques qui permettent d'évaluer la stabilité dimensionnelle d'un LCA, adapté du site Wood magazine ¹⁴.

propres à chaque déplacement dans le repère global cartésien de chaque LCA, comme schématiquement illustré sur la Fig. 3.21. Comme indiqué dans la sous-section précédente, les données situées à l'extrémité du LCA telles que les points de coordonnées $X = -\frac{L_x}{2}$ ne sont pas prises en compte dans l'étude à cause des défauts de la caméra 2.

Dans la sous-section 3.4.2, le procédé expérimental de CIN a permis d'obtenir les positions de points sur chacune des faces LCAs. Dans la suite de ce manuscrit, les positions des points repères sont définies comme la moyenne des positions de tous points situés dans une zone repère de dimension fixe dont les points repères associés sont les centres. Les positions de repères sont définis sous la forme de moyenne pour limiter les variations locales de positions et obtenir des informations à l'échelle globale de la face du LCA. Les positions des points repères permettent de calculer les déplacements suivants : flèches $\mathbf{F}l_i$ avec $i = \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_1$ l'indice des faces latérales, tuilages selon les directions Z et Y $\mathbf{T}u_i$ et $\mathbf{T}up_i$ des faces en bout $i = \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ et les déplacements de torsion $\mathbf{T}or_i$ avec $i = \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_1$. Le calcul explicite des déplacements en fonction des positions

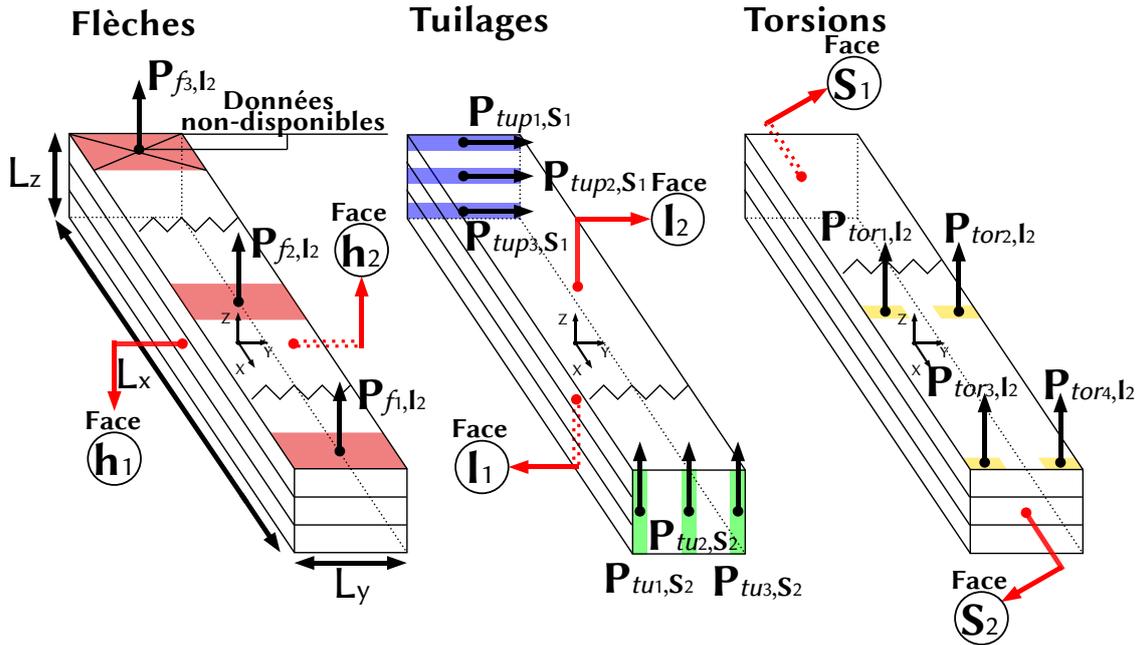


FIGURE 3.21 – Représentation schématique des positions des points repères pour le calcul des déplacements de flèches, de tuitages et de torsions. Les positions des repères sont estimées à partir de la moyenne des coordonnées des points de chacune des zones associées. Les données non-disponibles proviennent des défauts de la caméra 2 lors de la CIN. Les points repères en exemple permettent le calcul de la flèche et de la torsion de la face l_2 , du tuitage selon la direction Z de la face S_2 et du tuitage selon la direction Y de la face S_1 .

des points repères est réalisé de la manière suivante :

Calcul des flèches des faces h_1 :

$$Fl_i = -(\mathbf{P}_{f_1,i} - \mathbf{P}_{f_2,i}) \text{ pour } i = h_1 \text{ l'indice de la face,}$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{f_j,i} = \frac{1}{n_{f_j,i}} \sum_{k=1}^{n_{f_j,i}} Y(p_{f_j,i}[k]) \text{ avec } j = 1, 2,$$

$$\text{où } p_{f_1,i} = p_i(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y, Z) \text{ et } p_{f_2,i} = p_i(X = 0 \pm 10, Y, Z).$$

Calcul des flèches des faces h_2 :

$$Fl_i = \mathbf{P}_{f_1,i} - \mathbf{P}_{f_2,i} \text{ pour } i = h_2,$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{f_j,i} = \frac{1}{n_{f_j,i}} \sum_{k=1}^{n_{f_j,i}} Y(p_{f_j,i}[k]) \text{ avec } j = 1, 2,$$

$$\text{où } p_{f_1,i} = p_i(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y, Z) \text{ et } p_{f_2,i} = p_i(X = 0 \pm 10, Y, Z).$$

Calcul des flèches des faces l_1 :

$$Fl_i = -(\mathbf{P}_{f_1,i} - \mathbf{P}_{f_2,i}) \text{ pour } i = l_1,$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{f_j,i} = \frac{k=1}{n_{f_j,i}} \sum_1^{n_{f_j,i}} Z(p_{f_j,i}[k]) \text{ avec } j = 1, 2,$$

$$\text{où } p_{f_1,i} = p_i(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y, Z) \text{ et } p_{f_2,i} = p_i(X = 0 \pm 10, Y, Z).$$

Calcul des flèches des faces l_2 :

$$Fl_i = \mathbf{P}_{f_1,i} - \mathbf{P}_{f_2,i} \text{ pour } i = l_2,$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{f_j,i} = \frac{k=1}{n_{f_j,i}} \sum_1^{n_{f_j,i}} Z(p_{f_j,i}[k]) \text{ avec } j = 1, 2,$$

$$\text{où } p_{f_1,i} = p_i(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y, Z) \text{ et } p_{f_2,i} = p_i(X = 0 \pm 10, Y, Z).$$

(3.8)

où \mathbf{Fl}_i correspondent aux déplacements de flèches [mm] des faces $i = \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2$. $\mathbf{P}_{f_j,i}$ correspondent aux points repères numéro $j = 1, 2$ des flèches des faces i . p_i est l'ensemble des points mesurés par CIN sur la face i . $p_{f_j,i}$ est l'ensemble des points du repère numéro j de la face i avec $n_{f_j,i}$ le nombre de points total de la zone repère considérée.

Calcul des Tuilages direction Z :

$$\mathbf{Tu}_i = \frac{\mathbf{P}_{tu_{1,i}} + \mathbf{P}_{tu_{3,i}}}{2} - \mathbf{P}_{tu_{2,i}} \text{ avec } i = \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2,$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{tu_{j,i}} = \frac{1}{n_{tu_{j,i}}} \sum_{k=1}^{n_{tu_{j,i}}} Z(p_{tu_{j,i}}[k]) \text{ avec } j = 1, 2, 3 \text{ et } i = \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2,$$

$$\text{où } p_{tu_{1,i}} = p_i \left(X, Y = -\frac{L_y}{2} \pm 1, Z \right), \quad p_{tu_{2,i}} = p_i \left(X, Y = 0 \pm 1, Z \right), \quad p_{tu_{3,i}} = p_i \left(X, Y = \frac{L_y}{2} \pm 1, Z \right).$$

Calcul des Tuilages direction Y :

$$\mathbf{Tup}_i = \frac{\mathbf{P}_{tup_{1,i}} + \mathbf{P}_{tup_{3,i}}}{2} - \mathbf{P}_{tup_{2,i}} \text{ avec } i = \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2,$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{tup_{j,i}} = \frac{1}{n_{tup_{j,i}}} \sum_{k=1}^{n_{tup_{j,i}}} Y(p_{tup_{j,i}}[k]) \text{ avec } j = 1, 2, 3 \text{ et } i = \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2,$$

$$\text{où } p_{tup_{1,i}} = p_i \left(X, Y, Z = \frac{L_z}{2} \pm 1 \right), \quad p_{tup_{2,i}} = p_i \left(X, Y, Z = 0 \pm 1 \right), \quad p_{tup_{3,i}} = p_i \left(X, Y, Z = -\frac{L_z}{2} \pm 1 \right). \quad (3.9)$$

où \mathbf{Tu}_i et \mathbf{Tup}_i correspondent aux déplacements de tuilages [mm] des faces $i = \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$. $\mathbf{P}_{tu_{j,i}}$ et $\mathbf{P}_{tup_{j,i}}$ correspondent respectivement aux points repères numéro $j = 1, 2, 3$ des faces i . p_i est l'ensemble des points mesurés par CIN sur la face i . $p_{tu_{j,i}}$ et $p_{tup_{j,i}}$ sont respectivement les ensembles des points des repères j de la face i et $n_{tu_{j,i}}$ et $n_{tup_{j,i}}$ sont respectivement les nombres de points totaux des zones repères considérées.

Calcul des torsions des faces $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$:

$$\mathbf{Tor}_i = \arctan \left(-\frac{\mathbf{P}_{tor_{4,i}} - \mathbf{P}_{tor_{3,i}}}{L_z - 10} \right) - \arctan \left(-\frac{\mathbf{P}_{tor_{2,i}} - \mathbf{P}_{tor_{1,i}}}{L_z - 10} \right) \text{ avec } i = \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2,$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{tor_{j,i}} = \frac{1}{n_{tor_{j,i}}} \sum_{k=1}^{n_{tor_{j,i}}} Y(p_{tor_{j,i}}[k]) \text{ avec } j = 1, 2, 3, 4,$$

$$\text{où } p_{tor_{1,i}} = p_i \left(X = 0 \pm 10, Y, Z = -\frac{L_z - 10}{2} \pm 5 \right), \quad p_{tor_{2,i}} = p_i \left(X = 0 \pm 10, Y, Z = \frac{L_z - 10}{2} \pm 5 \right),$$

$$p_{tor_{3,i}} = p_i \left(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y, Z = -\frac{L_z - 10}{2} \pm 5 \right) \text{ et } p_{tor_{4,i}} = p_i \left(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y, Z = \frac{L_z - 10}{2} \pm 5 \right).$$

Calcul des torsions des faces $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2$:

$$\mathbf{Tor}_i = \arctan \left(\frac{\mathbf{P}_{tor_{4,i}} - \mathbf{P}_{tor_{3,i}}}{L_y - 10} \right) - \arctan \left(\frac{\mathbf{P}_{tor_{2,i}} - \mathbf{P}_{tor_{1,i}}}{L_y - 10} \right) \text{ avec } i = \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2$$

$$\text{avec } \mathbf{P}_{tor_{j,i}} = \frac{1}{n_{tor_{j,i}}} \sum_{k=1}^{n_{tor_{j,i}}} Z(p_{tor_{j,i}}[k]) \text{ avec } j = 1, 2, 3, 4,$$

$$\text{où } p_{tor_{1,i}} = p_i \left(X = 0 \pm 10, Y = -\frac{L_y - 10}{2} \pm 5, Z \right), \quad p_{tor_{2,i}} = p_i \left(X = 0 \pm 10, Y = \frac{L_y - 10}{2} \pm 5, Z \right),$$

$$p_{tor_{3,i}} = p_i \left(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y = -\frac{L_y - 10}{2} \pm 5, Z \right) \text{ et } p_{tor_{4,i}} = p_i \left(X = \frac{L_x - 20}{2} \pm 10, Y = \frac{L_y - 10}{2} \pm 5, Z \right). \quad (3.10)$$

où \mathbf{Tor}_i correspondent aux déplacements en torsion [°] des faces $i = \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2$. $\mathbf{P}_{tor_{j,i}}$ correspondent aux points repères numéro $j = 1, 2, 3, 4$ de torsion de la face i . p_i est l'ensemble des points mesurés par CIN de la face i . $p_{tor_{j,i}}$ est l'ensemble des points du repère numéro j de la face i avec $n_{tor_{j,i}}$ est le nombre de points total de la zone repère considérée.

La norme AFNOR NF EN 13307-1 [134] définit un maximum admissible pour les déplacements principaux de LCAs destinés à la menuiserie, c'est à dire pour les flèches de face \mathbf{Fl}_{l_1} et \mathbf{Fl}_{l_2} , les flèches de rive \mathbf{Fl}_{h_1} et \mathbf{Fl}_{h_2} et les tuilages \mathbf{Tu}_{S_1} et \mathbf{Tu}_{S_2} (pas de normes sur la torsion ou le

tuilage selon la direction Y), et se traduit sous la forme :

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{F}l_i| &\leq \max \left[\left(\frac{L_x - 20}{4000} \right)^2 = 0.5625 \text{ mm}, 1 \text{ mm} \right] \text{ avec } i = \mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \\
 |\mathbf{F}l_i| &\leq \max \left[\frac{L_x}{1000} \frac{L_y}{100} = 1.29 \text{ mm}, 1 \text{ mm} \right] \text{ avec } i = \mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \\
 |\mathbf{T}u_i| &\leq \max \left[\frac{L_y}{200} = 0.43 \text{ mm}, 0.2 \text{ mm} \right] \text{ avec } i = \mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2.
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Les déplacements de flèches, de tuilages et de torsions sont calculés à partir du déplacement relatif des points repères qui sont définis sur la même face et selon le même système de coordonnées. La comparaison de ces déplacements entre les différents LCAs est ainsi réalisable. De plus, le biais de mesures n'est pas évalué dans ce travail de thèse. En effet, le calcul des flèches, des tuilages et des torsions par déplacement relatif permet d'annuler l'impact du biais de mesures sur les résultats finaux. La comparaison des différents déplacements entre les différents groupes de LCAs permet d'étudier l'effet des configurations de LCAs et spécifiquement des paramètres de conception sur les déplacements induits par les variations hygroscopiques dans l'enceinte climatique.

3.5 Conclusions

L'objectif du Chapitre 3 est de proposer une conception de produits LCAs en *Pinus pinaster* (*Ait.*) présentant une meilleure stabilité dimensionnelle aux variations climatiques. La démarche expérimentale de validation mise en place est également présentée. Dans un premier temps, l'introduction de la notion d'empilements QT étendue aux produits LCAs a permis de réaliser la conception de LCAs théoriquement hygro-thermo-mécaniquement stables. Cette conception s'appuie sur une répartition des lamelles en GS qui repose sur une différenciation des lamelles selon l'orientation de leurs cernes dans le plan transversal. Cette répartition permet, avec la connaissance des pourcentages des orientations des lamelles issues de la chaîne de production, de proposer une famille de solutions d'empilement QT applicables aux LCAs de l'entreprise GB. Plusieurs autres paramètres ont également été pris en compte dans la conception comme la notion de « quasi-identité » des lames qui est respectée grâce à la fabrication de lames par l'aboutage de lamelles de typologies de cernes identiques, l'orientation des lamelles dans l'empilement, la symétrie des empilements et le nombre de plis des LCAs. Les configurations étudiées sont réparties en groupes de nombres différents qui permettent d'estimer les moyennes et les écarts-types de déplacements des LCAs et d'observer l'influence des paramètres de conception sur la stabilité dimensionnelle des LCAs.

Dans un second temps, la mesure expérimentale de la stabilité dimensionnelle des LCAs est réalisée à partir de la mesure des déplacements relatifs de points repères sur les surfaces extérieures des LCAs. L'acquisition des images nécessaires à une méthode de contrôle non-destructif de CIN est réalisée grâce au logiciel Vic-Snap. Les positions de ces points sont calculées grâce aux logiciels Vic-3D et Vic-2D qui permettent respectivement le calcul des positions tri-dimensionnelle des faces latérales grâce à une méthode de stéréo-corrélation à 2 caméras et des positions bi-dimensionnelles des dernières faces grâce à la troisième caméra. Le calcul des déplacements est réalisé grâce au logiciel MATLAB® qui permet un calcul rapide et efficace de grande quantité de données. Les déplacements sont répartis sous la forme de flèches et de torsions pour les faces latérales et de tuilages pour les deux dernières faces.

L'utilisation de la méthode de CIN permet d'obtenir la position relative des points sur les faces extérieures de tous les LCAs nécessaire à l'évaluation de leur stabilité dimensionnelle. Toutefois,

les contraintes de cette méthode dans le contexte de cette expérience sont nombreuses. Premièrement, la durée totale des expériences de 57 jours et la nécessité du déplacement des LCAs entre l'enceinte climatique et le banc d'essai rentrent en opposition avec la méthode CIN en introduisant des déplacements et ainsi une modification du repère des caméras entre les différentes mesures. Deuxièmement, les 7 mesures au cours de l'expériences des 6 faces de chacun des 48 LCAs entraînent un très grand nombre de données à traiter. Finalement, la géométrie des LCAs, $L_x = 1500$ mm, $L_y = 86$ mm et $L_z = [66, 70]$ mm pour cette expérience, représente des zones d'intérêts à mesurer conséquentes pour une méthode de CIN qui entraînent une baisse de la résolution et de la précision des mesures.

Dans le chapitre suivant, les déplacements relatifs des différents groupes de conception sont comparés pour identifier l'effet des différents paramètres de conception sur la stabilité dimensionnelle des LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) et en extraire une ou plusieurs configurations dimensionnellement stables aux variations climatiques.

Résultats et comparaisons des mesures de stabilité dimensionnelle

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la comparaison des mesures des déplacements des faces extérieures des LCAs conçus dans le Chapitre 3. L'objectif est l'estimation de la stabilité dimensionnelle des différentes configurations de LCAs aux variations climatiques subies lors de l'entreposage des produits bois en post-production. L'influence des différents paramètres de conception, à savoir la condition de lames « quasi-identiques », les empilements QT, l'orientation des lamelles, la symétrie des empilements et le nombre de lamelles dans l'empilement des LCAs, sur la stabilité dimensionnelle des LCAs de GB est également étudiée.

4.1 Présentation des empilements de l'intégralité des LCAs

La présentation de tous les empilements des LCAs de chacun des groupes de conception est réalisée sur les Tabs. 4.1-4.4.

4.2 Présentation de la stratégie de comparaisons des groupes de LCAs

Les résultats sont présentés sous la forme de trois graphiques représentant les moyennes et écarts-types des déplacements mesurés grâce au processus expérimentale du Chapitre 3 :

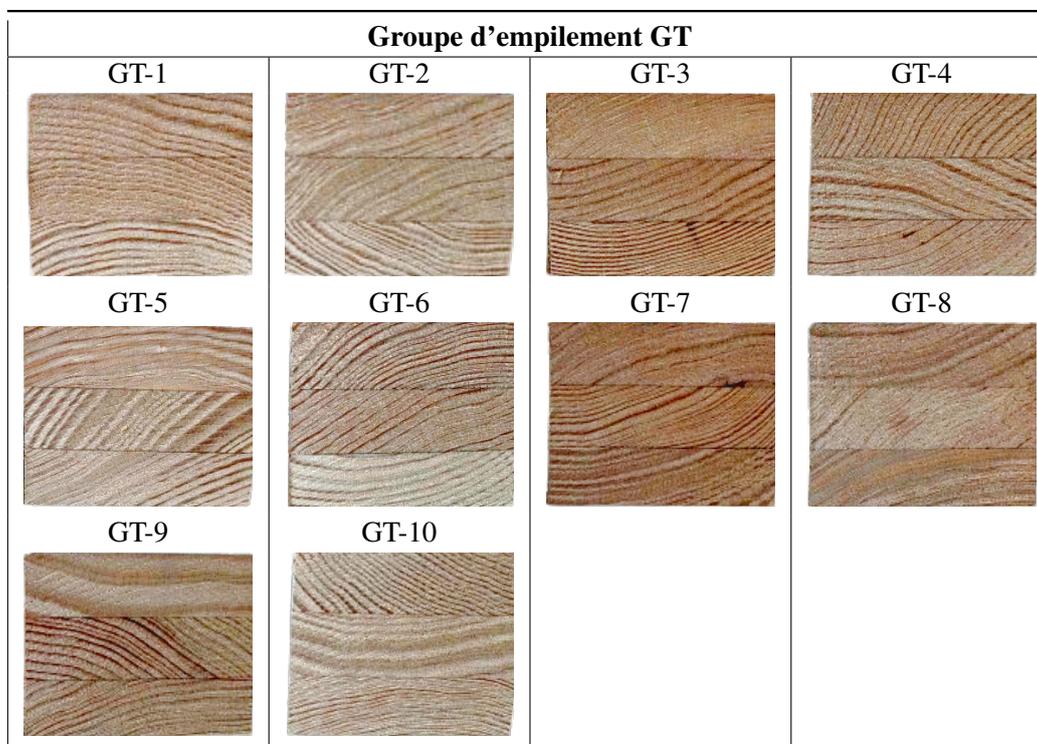
1. Déplacements des flèches des 4 faces latérales, c'est-à-dire :
 - les faces \mathbf{l}_1 et \mathbf{l}_2 - faces d'aboutage - de normal de direction Z qui correspondent aux faces où les mesures sont réalisées sur une lame aboutée composant le LCA ;
 - les faces \mathbf{h}_1 et \mathbf{h}_2 - faces d'empilement - de normal de direction Y qui correspondent aux faces où les mesures sont réalisées sur l'empilement de 3 ou 5 plis ;
2. les tuilages des 2 faces des LCAs \mathbf{S}_1 , \mathbf{S}_2 - faces en bout - de normal de direction X ;
3. les torsions des 4 faces latérales des LCAs.

Les résultats finaux de déplacements en fin d'essai sont comparés aux résultats de la norme présentée en Eq. (3.11). Les déplacements sont également comparés entre les différents groupes et notamment en termes d'écarts-types. La comparaison entre les différents groupes de LCAs est réalisée de la manière suivante :

Le groupe GT qui correspond aux LCAs produits usuellement sur la chaîne de production de l'entreprise GB sert de point de départ du processus de comparaison.

↳ **1.** La comparaison des résultats entre le groupe tampon GT et le groupe GA qui permet d'illustrer l'influence de lames aboutées par des lamelles de même classe de comportement sur la stabilité dimensionnelle des LCAs à empilements aléatoires est présentée sur les Figs. 4.1-4.3.

TABLE 4.1 – Présentation des empilements des 10 LCAs du groupe d’empilement GT qui représentent les configurations complètement aléatoires. La coupe qui permet l’observation des empilements est réalisée à la moitié de la longueur des LCAs.

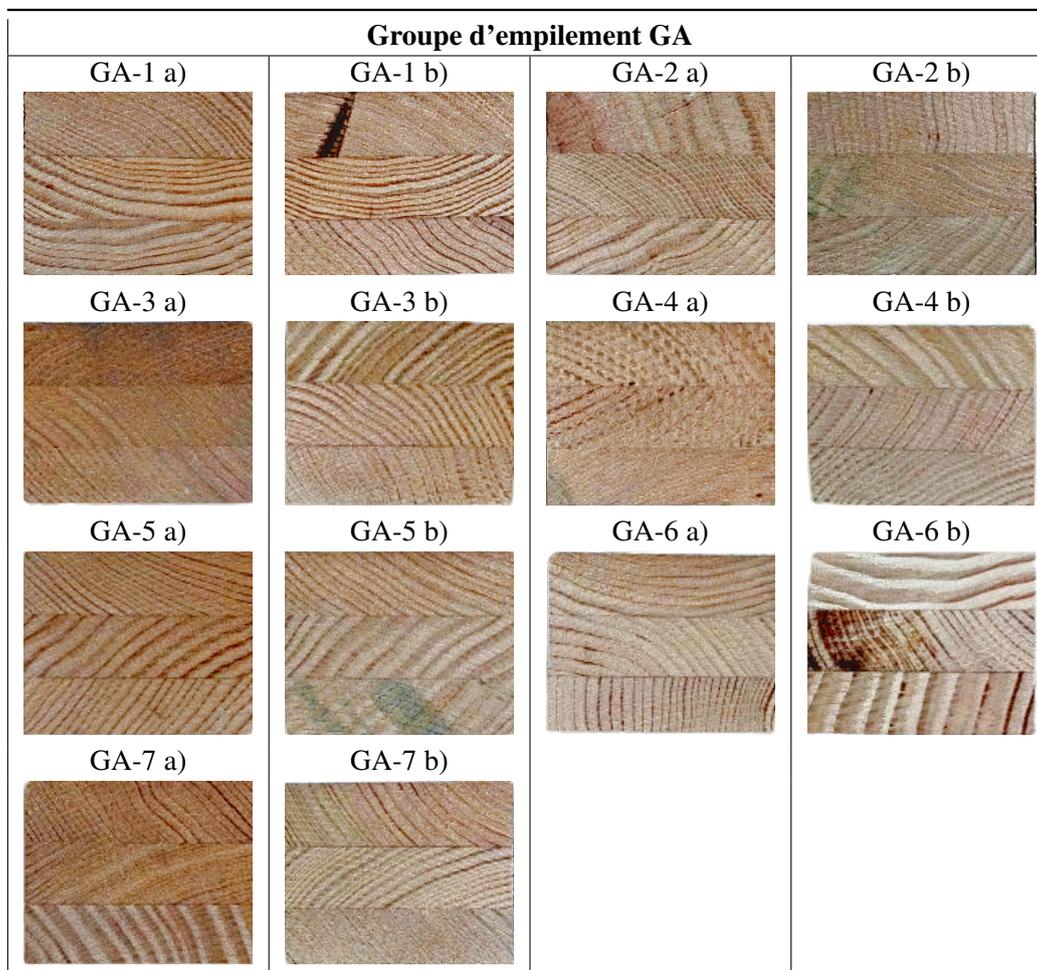


↳ **2.** La comparaison des résultats entre le groupe aboutage GA et les configurations d’empilements 3 plis du groupe GE3 qui permet d’illustrer l’influence des séquences d’empilement symétriques à 3 plis sur la stabilité dimensionnelle des LCAs est présentée sur les Figs. 4.5-4.7 dans le cas de la configuration D/Q/D et Figs. 4.9-4.11 dans le cas de la configuration FD/Q/FD.

↳ **3.** La comparaison des résultats entre le groupe aboutage GA et les différentes configurations d’empilements 5 plis du groupe GE5 qui permet d’illustrer l’influence du nombre de plis et des séquences QT sur la stabilité dimensionnelle des LCAs est présentée sur les Figs. 4.13-4.15 dans le cas de la configuration FD+/FD-/Q/FD+/FD- (non-symétrique), Figs. 4.17-4.19 dans le cas de la configuration FD/FQ/Q/FQ/FD, Figs. 4.21-4.23 dans le cas de la configuration FD/D/Q/D/FD et Figs. 4.25-4.27 dans le cas de la configuration D/FD/Q/FD/D. Les deux dernières configurations permettent également de mettre évidence l’influence de l’ordre des lames dans un empilement.

Plus précisément, ces comparaisons permettent d’isoler l’influence sur la stabilité des lames de même classes de comportements (GT \longleftrightarrow GA), de l’utilisation d’empilements symétriques (GA \longleftrightarrow GE3), du nombre de plis associé aux empilements QT ainsi que des séquences d’empilement QT à 5 plis (GA \longleftrightarrow GE5). Les valeurs de déplacements en termes de moyennes et d’écart-types sont comparées via plusieurs paramètres comme les variations maximales et finales dans le cas des flèches et des torsions et les intervalles des déplacements moyens et variations maximales et finales des écarts-types dans le cas des tuilages. Avant de comparer les résultats des différents groupes, il est important de remarquer que ce travail de thèse ne représente qu’un travail pionnier dans

TABLE 4.2 – Présentation des empilements des 14 LCAs du groupe d'empilement GA qui représentent les configurations avec lames « quasi-identiques » et empilement aléatoire. La coupe qui permet l'observation des empilements est réalisée à la moitié de la longueur des LCAs. Non-respect de la classe demandée pour une lamelle des empilements GA-1 b), GA-2 b) GA-6 b).



l'utilisation de séquences symétriques et QT pour la conception de LCAs. De plus, l'utilisation de seulement quatre LCAs d'une même séquence symétrique ou QT reste faible pour obtenir une estimation fidèle des moyennes et écarts-types des déplacements (groupe GE3 et GE5). Pour rappel, dans le cas des groupes GT et GA, leur nombre respectif de LCAs est respectivement de 10 et 14. En conséquence, le lecteur doit garder en considération un manque de précisions des résultats en termes de moyennes et d'écarts-types de déplacements pour les groupes de LCAs de type GE3 et GE5.

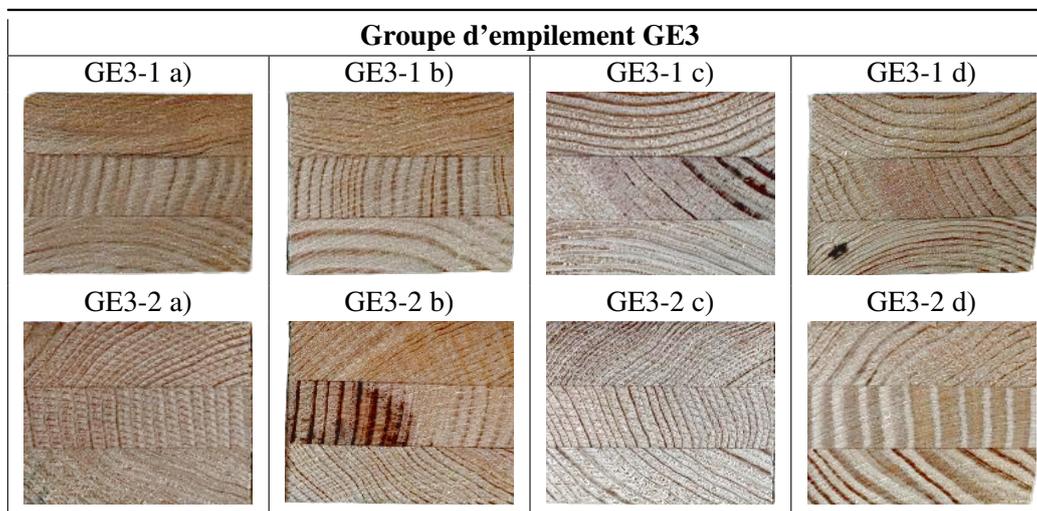
Les comparaisons des valeurs de déplacements des différents groupes étudiés par rapport au groupe de référence respectent la nomenclature suivante :

— Déplacements de flèches :

1. Variations maximales des valeurs de déplacements, moyennes et écarts-types, par rapport au groupe de référence pour toutes les faces h_1 , h_2 , l_1 et l_2 .
2. Variations finales des valeurs de déplacements, c'est-à-dire à la fin de l'expérience.

Ces variations sont présentées sous la forme d'intervalle de variations maximales pour toute

TABLE 4.3 – Présentation des empilements des 8 LCAs du groupe d’empilement GE3 qui représentent les configurations avec lames « quasi-identiques » pour des empilements balancés et symétriques 3 plis. La coupe qui permet l’observation des empilements est réalisée à la moitié de la longueur des LCAs. Non-respect de la classe demandée pour une lamelle des empilements GE3-1 c) et GE3-1 d).



la durée de l’expérience.

— Déplacements de tuilages :

1. Valeurs des déplacements moyens par rapport au groupe de référence. Ces valeurs sont présentées sous la forme d’intervalle de valeurs de déplacements pour toute la durée de l’expérience.
2. Valeurs finales de déplacements moyen par rapport au groupe de référence.
3. Variations maximales des écarts-types de déplacements. Ces variations sont présentées sous la forme d’intervalle de variations maximales pour toute la durée de l’expérience.

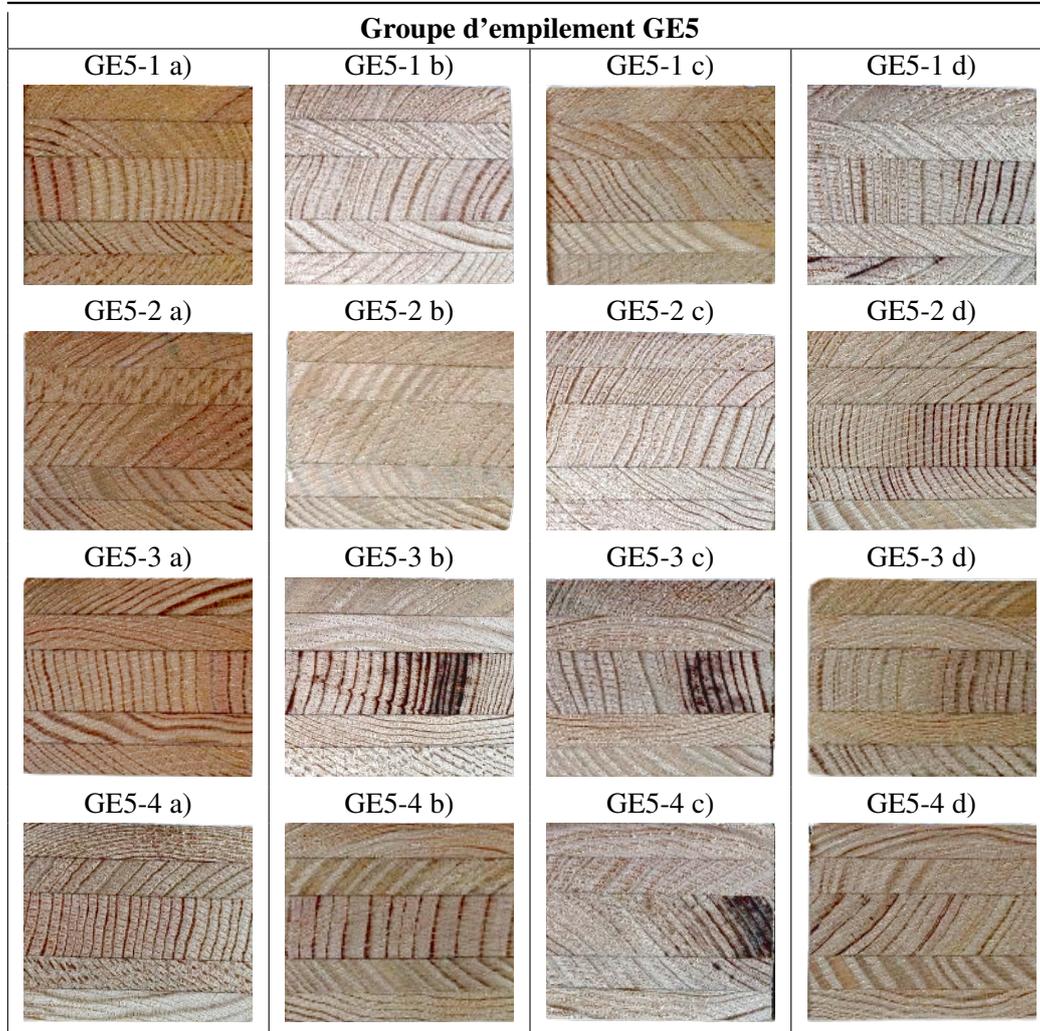
— Déplacements de torsions : similaire au cas des déplacements de flèches.

4.3 Comparaison du groupe GA avec le groupe GT

Premièrement, on réalise la comparaison entre les groupes GA et GT. Les remarques suivantes sont issues de l’étude des Figs. 4.1-4.3.

- Dans le cas des déplacements de flèches en Fig. 4.1, le groupe GA montre une diminution des moyennes de déplacements en comparaison du groupe GT pour toutes les faces latérales durant les deux phases d’adsorption et de désorption (hormis phase d’adsorption de la face I_2) avec une diminution maximale des valeurs moyennes comprise entre $[-81.2, -43.2] \%$ pour toutes les faces. De plus, le groupe GA montre une diminution des valeurs finales en comparaison du groupe GA avec une diminution finale comprise entre $[-27.0, -17.0] \%$. Dans le cas des écarts-types, il est possible de remarquer une forte diminution de la variabilité pour les faces d’aboutage I_1 et I_2 avec une diminution maximale comprise entre $[-73.0, -47.2] \%$ et une diminution finale comprise dans l’intervalle $[-44.0, -10.6] \%$. Toutefois, dans le cas des faces h_1 et h_2 , la variabilité des déplacements de flèches augmentent par rapport au groupe GT avec une augmentation maximale comprise entre $[52.6, 64.2] \%$ et une augmentation finale comprise entre $[0.62, 26.0] \%$.

TABLE 4.4 – Présentation des empilements des 16 LCAs du groupe d'empilement GE5 qui représentent les configurations avec lames « quasi-identiques » pour des empilements QT. La coupe qui permet l'observation des empilements est réalisée à la moitié de la longueur des LCAs. Non-respect de la classe demandée pour une lamelle des empilements GE5-2 d), GE5-4 c) GE5-4 d).



- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.2, les intervalles des moyennes de déplacements sont inférieurs dans le cas du groupe GA $[-0.48, 0.39]$ mm en comparaison du groupe GT pour toutes les faces S_1 et S_2 . En addition, les valeurs finales de déplacements de tuilage Tu_{S_1} et Tu_{S_2} qui sont respectivement -0.19 mm et 0.29 mm respectent la valeur maximale imposée par la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134]. De plus, la variabilité des déplacements de tuilages dans le cas du groupe GA est également diminuée en comparaison des LCAs GT pour toutes les faces latérales (exception pour la valeur finale du tuilage Tu_{S_2}). En effet, le groupe GA permet une diminution maximale des écarts-types comprise entre $[-74.6, -45.1]$ % et une variation des valeurs finales comprise entre $[-53.2, 20.5]$ % par rapport au groupe GT.
- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.3, il est possible d'identifier une diminution des valeurs moyennes dans le cas du groupe GA pour toutes les faces latérales sur la quasi-totalité des essais avec une diminution maximale comprise entre $[-77.3, -16.3]$ % et

une diminution finale comprise entre $[-77.3, -15.2]$ % en comparaison du groupe GT. Cependant, une augmentation générale des écarts-types (sauf la face h_2) est notable avec une augmentation maximale comprise dans l'intervalle $[17.8, 58.0]$ % (-43.4 % pour la face h_2) et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-40.1, 40.0]$ %.

L'étude des déplacements des LCAs du groupe GA permet de mettre en évidence l'effet des lames de même classe de comportement sur la stabilité dimensionnelle des LCAs en comparaison du groupe GT et en particulier sur les faces I_1 et I_2 . La diminution des valeurs de déplacements de flèches et de torsions moyens sur ces faces permet de mettre en évidence l'impact des lames de même classe de comportement sur toute leur longueur. L'homogénéité des classes de comportement des lames et notamment des lames extérieures des LCAs permet de limiter la variabilité des déplacements des flèches. Toutefois, la variabilité des torsions de ces faces est augmentée. Dans le cas des faces d'empilement h_1 et h_2 , une diminution des valeurs moyennes pour tous les déplacements de flèches et de torsions est identifiée. Dans le cas des écarts-types, les effets sont variables entre les différents types de déplacements avec une augmentation de la variabilité dans le cas des déplacements de flèches et une variabilité constante ou inférieure dans le cas des torsions. Finalement, dans le cas des faces en bout S_1 et S_2 , les moyennes de déplacements de tuilage pour le groupe GA restent dans un ordre de grandeur similaire au cas du groupe GT mais avec une forte diminution des écarts-types. En conclusion, les LCAs du groupe GA présentent déjà une amélioration de la stabilité dimensionnelle en comparaison des LCAs du groupe GT et principalement sur les déplacements de flèches et de tuilages. Le groupe GA est utilisée dans la suite de ce manuscrit comme nouveau groupe de comparaison.

4.4 Résultats de la comparaison du groupe GE3 avec le groupe GA

Deuxièmement, une comparaison est réalisée entre les groupes GA (Groupe aboutage) et GE3 (Groupe empilement 3 plis) qui correspond aux LCAs 3 plis avec des lames de même classe de comportement combinées avec des séquences symétriques. Deux configurations GE3 sont étudiées, c'est à dire la configuration GE3-1 : D/Q/D et GE3-2 : FD/Q/FD qui sont respectivement comparées au groupe GA sur les Figs. 4.5-4.7 et Figs. 4.9-4.11. Les variations reportées dans les sous-sections suivantes sont à considérer par rapport au groupe GA.

(a) Configuration GE3-1 - D/Q/D :

Quatre échantillons de la configuration GE3-1 sont comparés au groupe GA. La configuration D/Q/D avec les lames en dosse orientées vers l'extérieur du LCA est référencée dans la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134] comme un empilement de LCAs 3 plis non-stable, voir Fig. 4.4. Les remarques suivantes sont issues de l'étude des Figs. 4.5-4.7.

- Dans le cas des déplacements de flèches en Fig. 4.5, les déplacements moyens sont supérieurs dans le cas de GE3-1 en comparaison du groupe GA (exception durant la phase de désorption de la face I_2) avec des augmentations maximales comprise entre $[9.34, 348]$ % et des variations finales comprise entre $[-9.81, 50.9]$ %. De plus, la configuration GE3-1 possède une variabilité plus importante des déplacements de flèches pour les faces d'aboutage I_1 et I_2 notamment lors de la phase d'adsorption avec des augmentations maximales respectivement de 141% et 41.0% et une variation finale respectivement de -2.84% et 8.55% . Cependant, la variabilité des déplacements de flèches est moins importante pour les faces d'empilement h_1 et h_2 avec des diminutions maximales respectivement de -65.4% et -85.3% et des diminutions finales respectivement de -46.1% et -85.3% .
- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.6, les intervalles de déplacements moyens pour la configuration GE3-1 de $[-0.55, 0.81]$ mm sont supérieurs à ceux du groupe GA

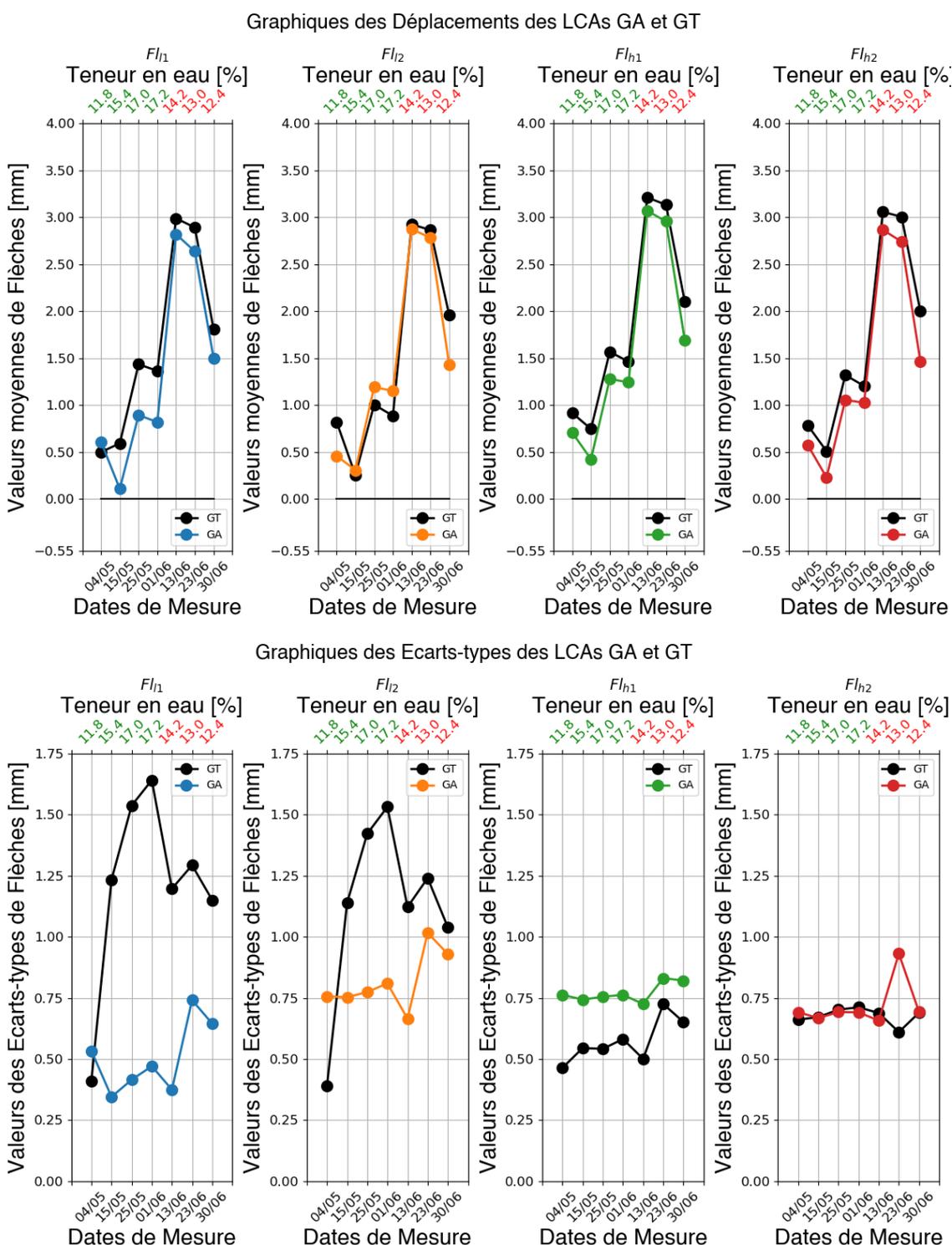


FIGURE 4.1 – Résultats des flèches de déplacements F_{I_i} des faces h_1, h_2, I_1, I_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GA et comparaison avec le groupe GT.

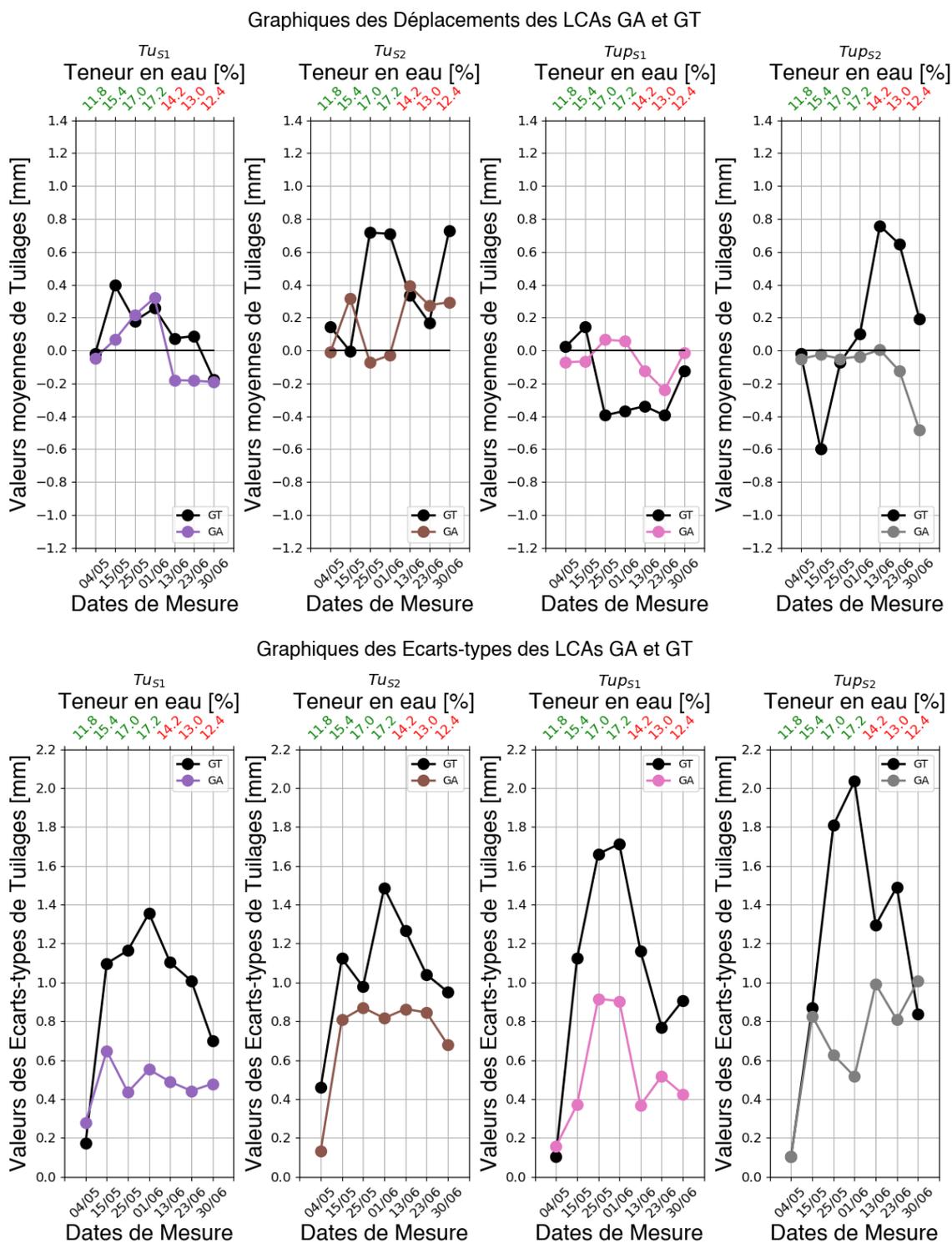


FIGURE 4.2 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GA et comparaison avec le groupe GT.

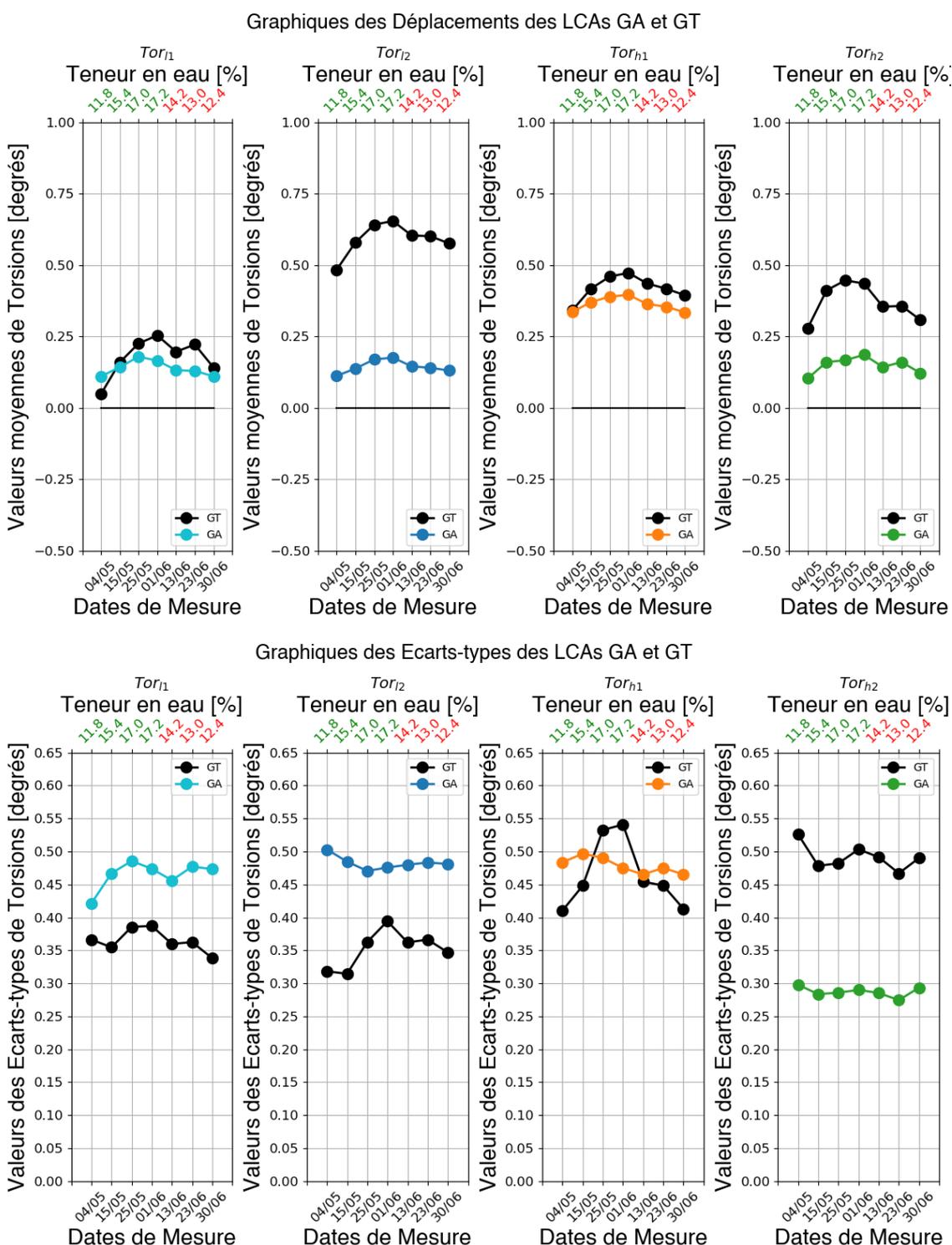


FIGURE 4.3 – Résultats de déplacements de torsion Tor_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GA et comparaison avec le groupe GT.

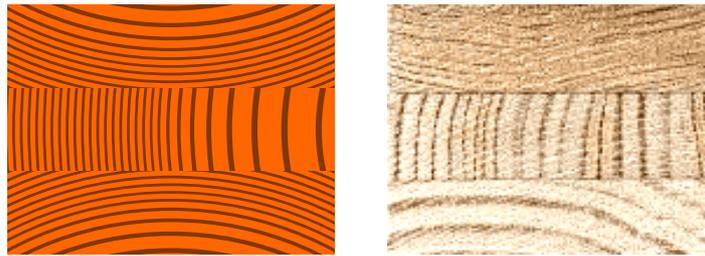


FIGURE 4.4 – Rappel de la séquence d'empilements de la configuration GE3-1 : D/Q/D.

$[-0.48, 0.39]$ m. Concernant les écarts-types, les variations maximales sont comprises dans l'intervalle $[-76.1, 47.7]$ % tandis que les variations finales sont comprises dans l'intervalle $[-47.9, 3.00]$ %

- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.7, les déplacements moyens du GE3-1 sont supérieurs à ceux du groupe GA (hormis la face I_2) avec une augmentation maximale des valeurs moyennes comprises dans l'intervalle $[49.2, 543]$ % (variation maximale de -172% pour la face I_2) et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-118, 543]$ %. Concernant les écarts-types, une diminution générale est observée avec des variations maximales comprises entre $[-54.1, -31.2]$ % et des variations finales comprises entre $[-45.4, -8.77]$ %.

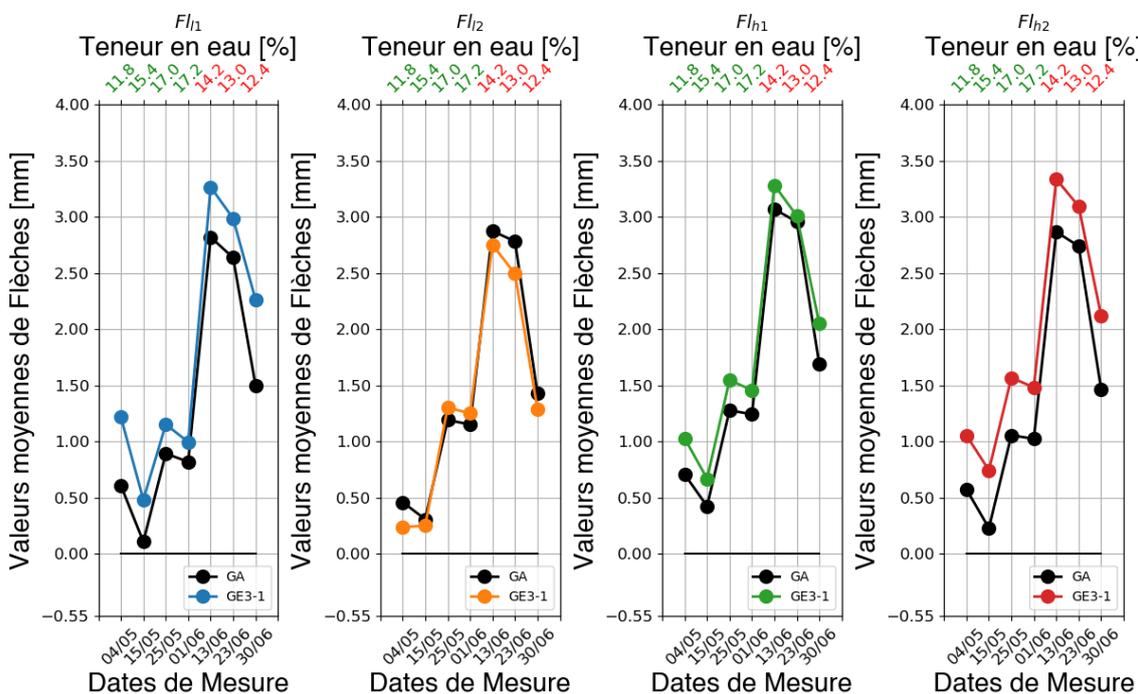
L'étude et comparaison des déplacements des LCAs GE3-1 avec le groupe GA permet de mettre en évidence l'influence des séquences symétriques sur les déplacements des faces d'empilement h_1 et h_2 et particulièrement sur les écarts-types avec une diminution des valeurs pour les déplacements de flèches et de torsions. Cependant, en adéquation avec la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134], l'empilement D/Q/D avec les dosses orientées vers l'extérieur du LCA ne représente pas une bonne configuration pour la conception des LCAs. En effet, les déplacements moyens de flèches et de torsions sont généralement plus importants que ceux du groupe GA avec une augmentation des écarts-types des flèches des faces d'aboutage I_1 et I_2 et une plus grande instabilité dimensionnelle en termes de moyennes et d'écarts-types de déplacements dans le cas des tuilages.

(b) Configuration GE3-2 - FD Q FD :

Quatre échantillons de la configuration GE3-2 : FD/Q/FD sont comparés au groupe GA. La configuration GE3-2 est conçue avec les lames orientées vers l'intérieur du LCA, voir Fig. 4.8. Elle permet d'étudier l'influence de l'utilisation de lames de classes FD qui ne sont pas traditionnellement utilisées dans la conception des LCAs de l'industrie qui privilégie les multiples configurations de lames en dosse ou en quartier. Les remarques suivantes sont issues de l'étude des Figs. 4.9-4.11.

- Dans le cas des déplacements de flèches en Fig. 4.9, il est possible d'observer une grande variabilité des moyennes et écarts-types entre les faces symétriques. Les moyennes montrent des variations maximales, pour les faces I_1 et I_2 , respectivement de 508% et 20.8% avec des variations finales de 34.5% et 12.1%. Pour les faces symétriques h_1 et h_2 des variations maximales respectivement de -35.8% et 416% avec des variations finales respectivement de -4.81% et 74.2% sont enregistrées. Concernant les écarts-types, cette tendance est conservée avec pour les faces symétriques h_1 et h_2 des variations maximales de respectivement -23.3% et -85.8% et des variations finales de -1.55% et -37.6%.
- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.10, les intervalles des moyennes sont supérieures pour la configuration GE3-2 avec $[-0.75, 0.48]$ mm en comparaison du groupe GA $[-0.48, 0.39]$ mm et particulièrement pour les faces d'empilement h_1 et h_2 . Toutefois,

Graphiques des Déplacements des LCAs GE3-1 et GA



Graphiques des Ecart-types des LCAs GE3-1 et GA

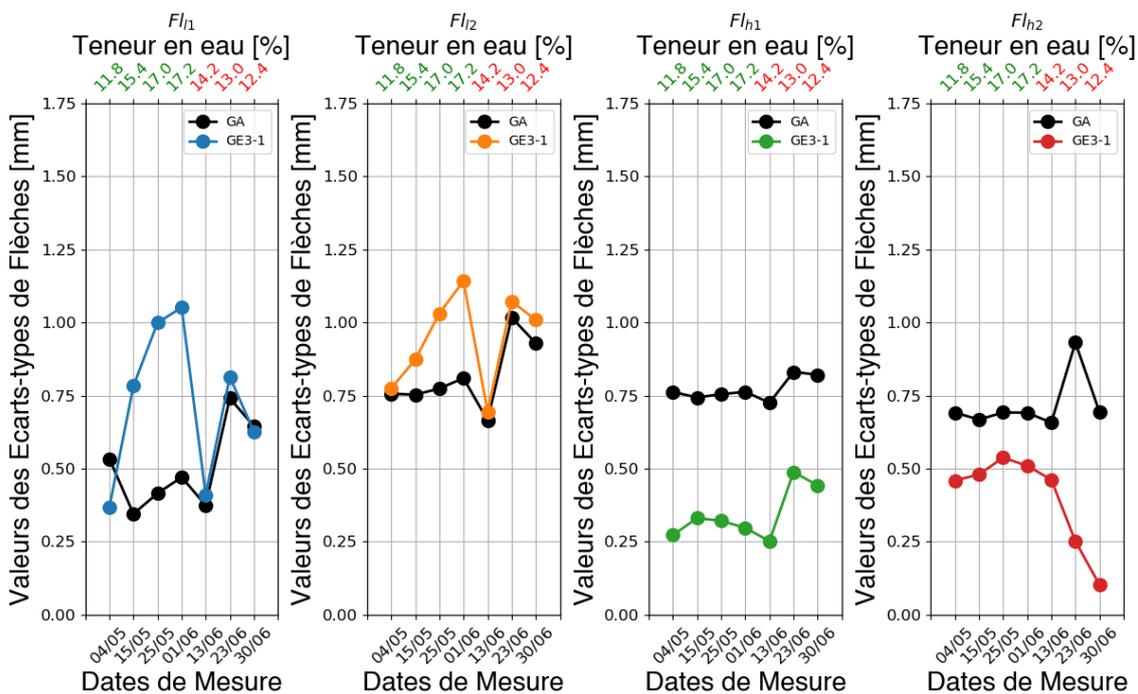


FIGURE 4.5 – Résultats des flèches de déplacements Fl_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE3-1 qui correspond à une configuration D/Q/D et comparaison avec le groupe GA.

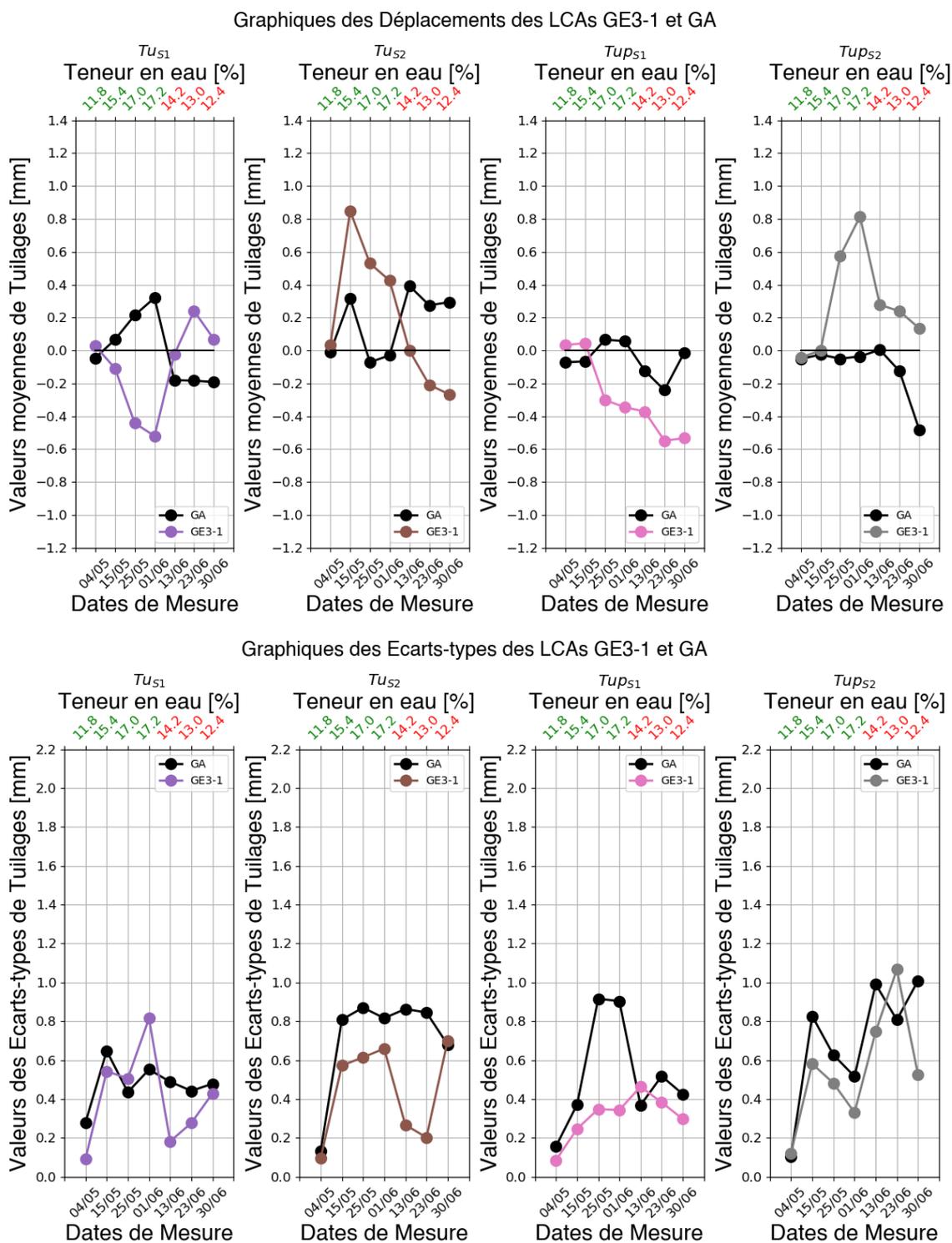


FIGURE 4.6 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE3-1 qui correspond à une configuration D/Q/D et comparaison avec le groupe GA.

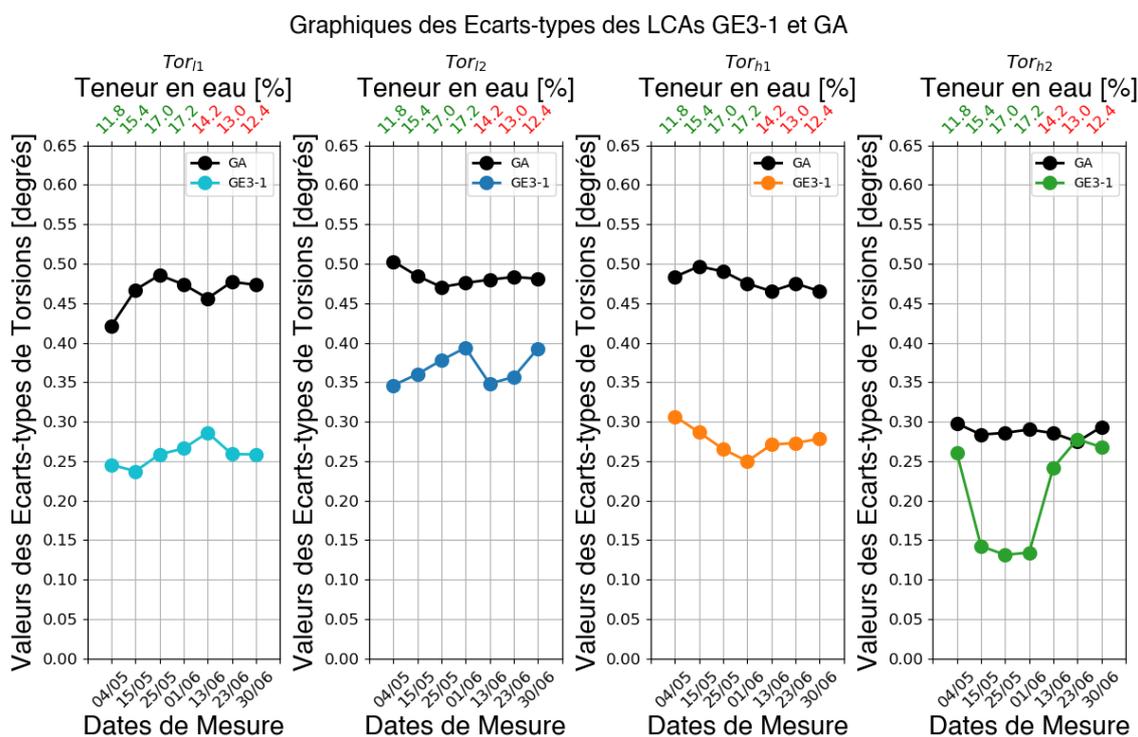
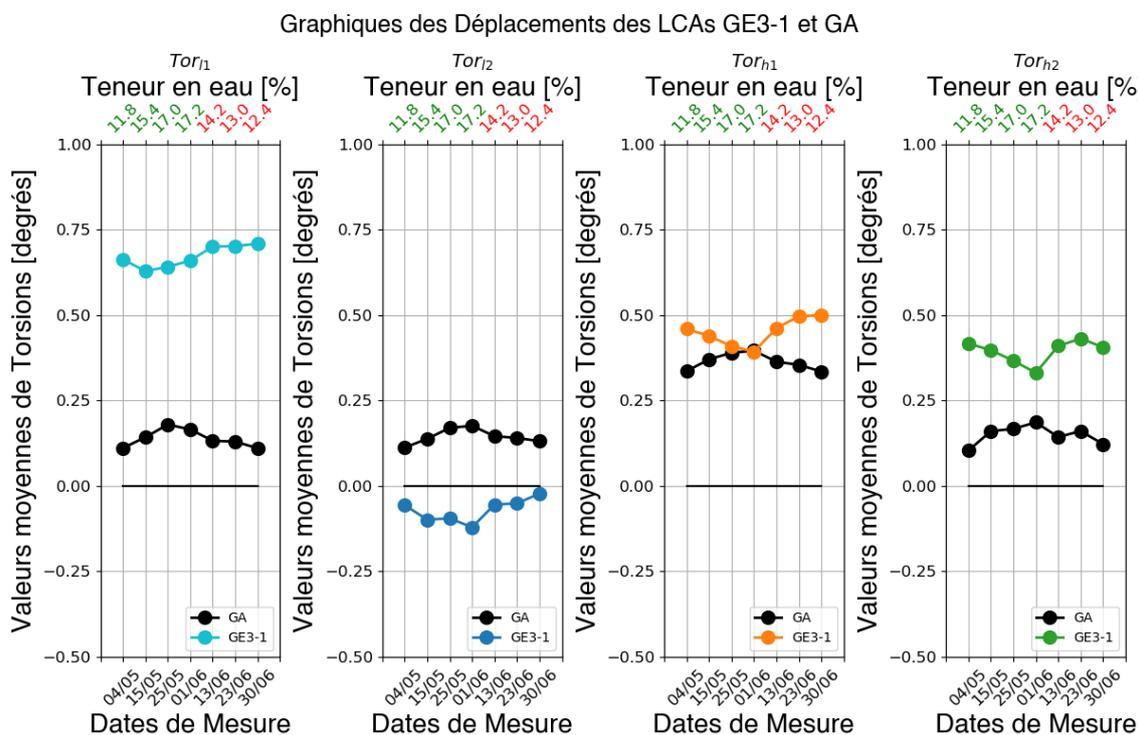


FIGURE 4.7 – Résultats de déplacements de torsion Tor_{11} des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE3-1 qui correspond à une configuration D/Q/D et comparaison avec le groupe GA.

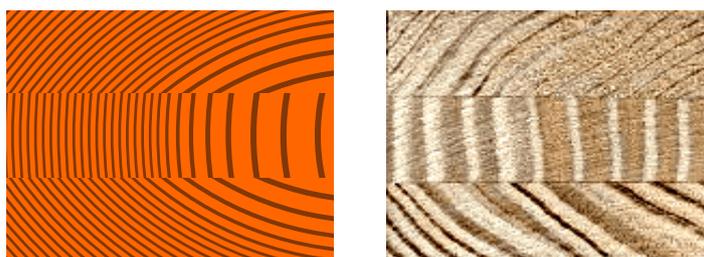


FIGURE 4.8 – Rappel de la séquence d'empilements de la configuration GE3-2 : FD/Q/FD.

il est possible d'observer des déplacements moyens finaux en termes de tuilages \mathbf{Tu}_{S_1} et \mathbf{Tu}_{S_2} qui respectent la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134]. Concernant les écarts-types, les variations maximales sont comprises dans l'intervalle $[-82.6, 108]\%$ et les variations finales sont comprises dans l'intervalle $[-76.5, 42.1]\%$.

- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.11, une tendance similaire au cas des flèches peut être observée avec une variabilité importante des moyennes pour les faces symétriques \mathbf{l}_1 et \mathbf{l}_2 avec des variations maximales en comparaison du groupe GA de respectivement 122% et -33.2% et des variations finales de respectivement 122% et -32%. Pour les faces symétriques \mathbf{h}_1 et \mathbf{h}_2 , les variations maximales sont respectivement de -63.2% et 479% et de -35.7% et 408% pour les variations finales. Concernant les écarts-types, une diminution des valeurs est notable avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-91.9, -7.33]\%$ et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-86.6, 0.05]\%$.

Finalement, même pour la configuration GE3-2 on n'observe pas d'améliorations par rapport aux séquences GA avec distribution aléatoire des types de coursons. La variabilité importante enregistrée est possiblement due aux définitions de classes de comportement trop laxiste. Contrairement à la classe de dosse D, la classe de FD possède une plus grande hétérogénéité des profils de cernes d'accroissement et donc de leur orientation qui peut être un paramètre important pouvant expliquer la variabilité des déplacements. Toutefois, l'orientation des lames vers le centre ou l'extérieur des LCAs est un paramètre de conception qui peut être étudiée dans des études ultérieures pour leur bénéfice possible sur les moyennes et écarts-types des déplacements.

4.5 Résultats de la comparaison du groupe GE5 avec le groupe GA

Finalement, une comparaison est réalisée entre les groupes GA (Groupe aboutage) et GE5 (Groupe empilement 5 plis) qui correspond aux LCAs 5 plis avec des lames de même classe de comportement combinées avec des séquences d'empilement QT. Quatre configurations sont étudiées, c'est à dire la configuration GE5-1 : FD+/FD-/Q/FD+/FD- (non-symétrique), GE5-2 : FD/FQ/Q/FQ/FD, GE5-3 : FD/D/Q/D/FD et GE5-4 : D/FD/Q/FD/Q qui sont respectivement comparées au groupe GA sur les Figs. 4.13-4.15, Figs. 4.17-4.19, Figs. 4.21-4.23 et Figs. 4.25-4.27. Les variations reportées sont à considérer par rapport au groupe GA.

(a) Configuration GE5-1 - FD+/FD-/Q/FD+/FD- :

Quatre échantillons de la configuration GE5-1 : FD+/FD-/Q/FD+/FD- ont été comparés au groupe GA. La configuration GE5-1 est la seule configuration où l'empilement est non-symétrique mais équilibré et permet de tester de nouvelles configurations d'empilement qui sortent des conceptions communes des LCAs, voir Fig. 4.12. Les remarques suivantes sont issues de l'étude des Figs. 4.13-4.15.

- Dans le cas des déplacements de flèches en Fig. 4.13, une tendance similaire à la configuration d'empilement GE3-2 est observable pour les moyennes de déplacements entre les

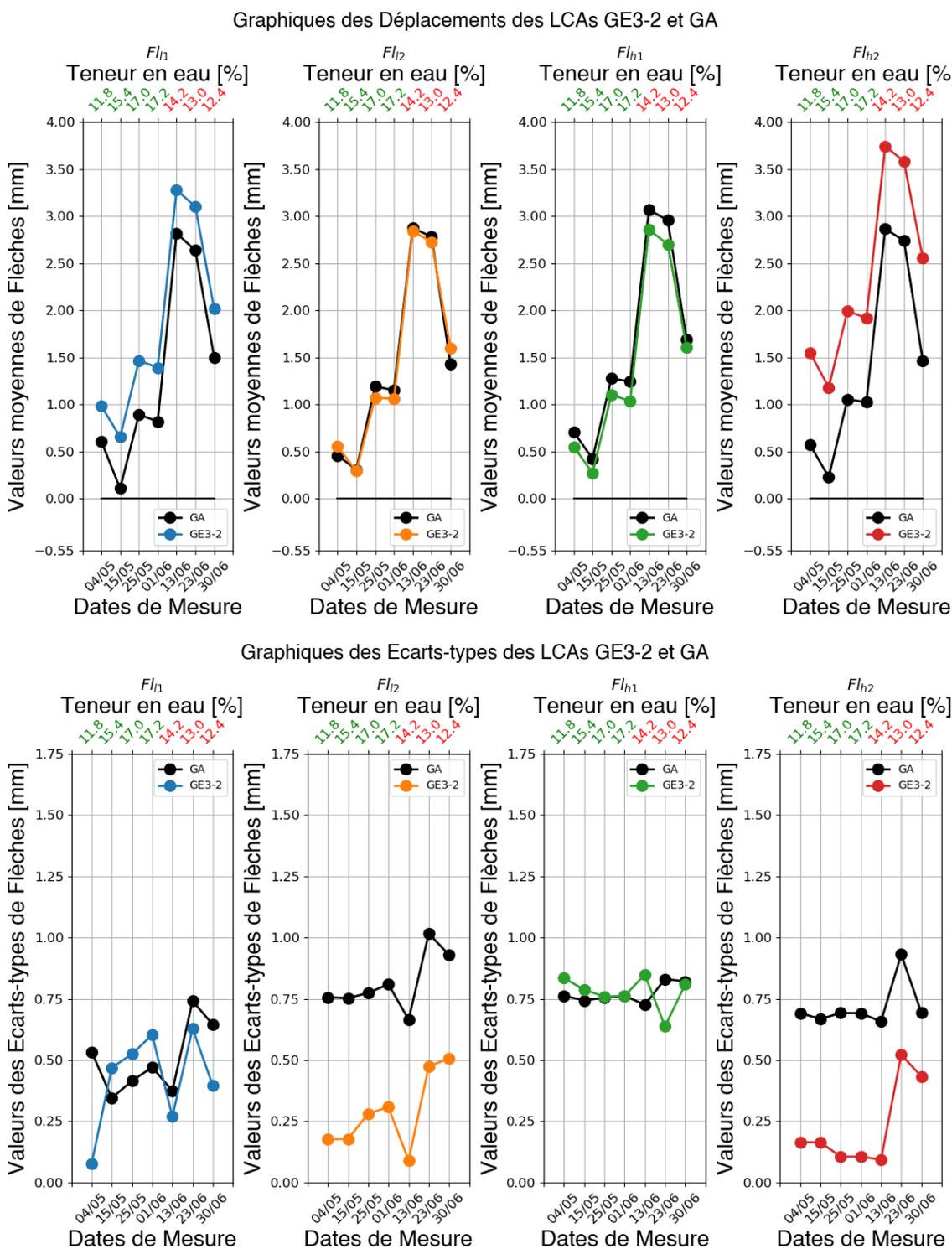


FIGURE 4.9 – Résultats des flèches de déplacements FI_i des faces h_1, h_2, I_1, I_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE3-2 qui correspond à une configuration FD/Q/FD et comparaison avec le groupe GA.

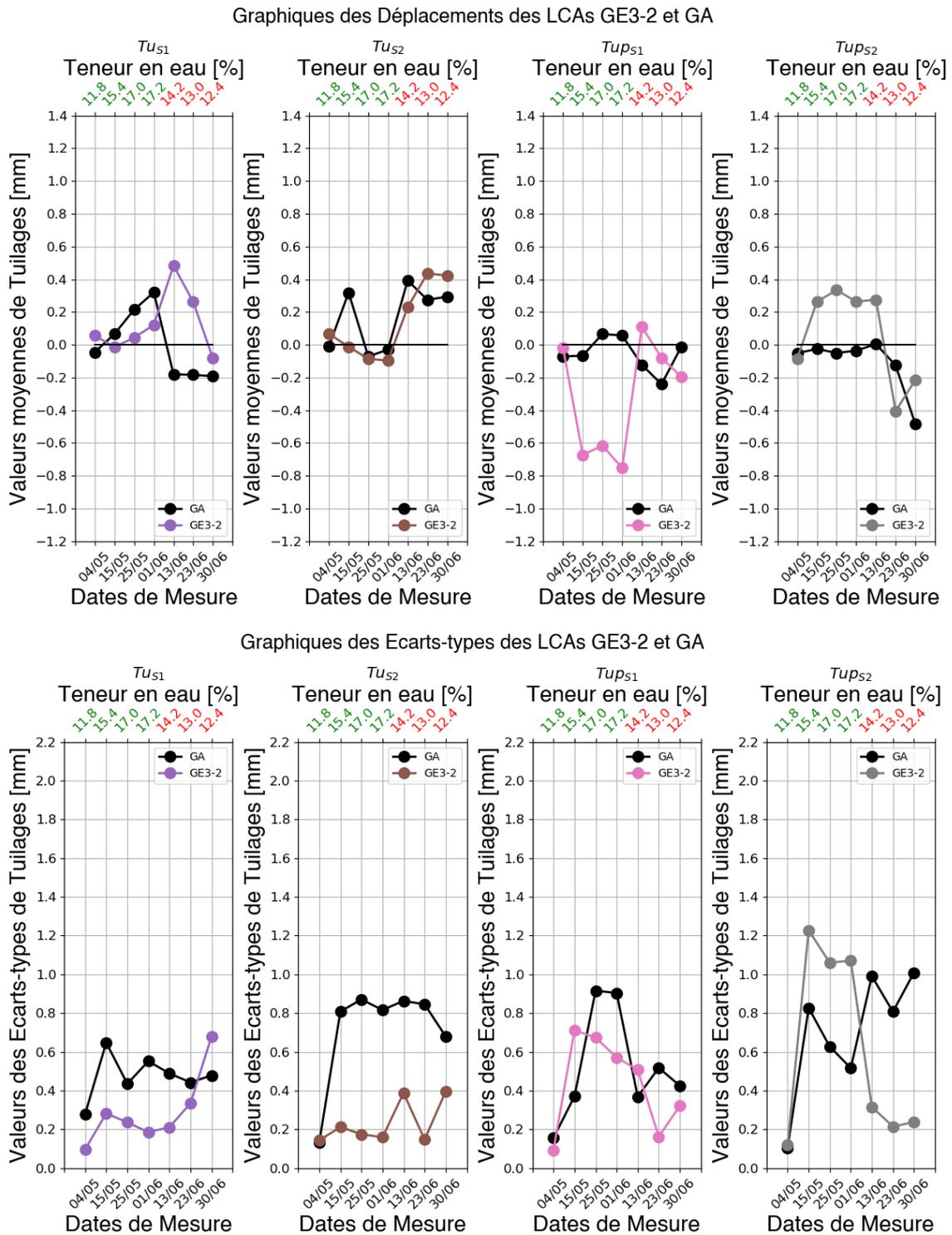


FIGURE 4.10 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE3-2 qui correspond à une configuration FD/Q/FD et comparaison avec le groupe GA.

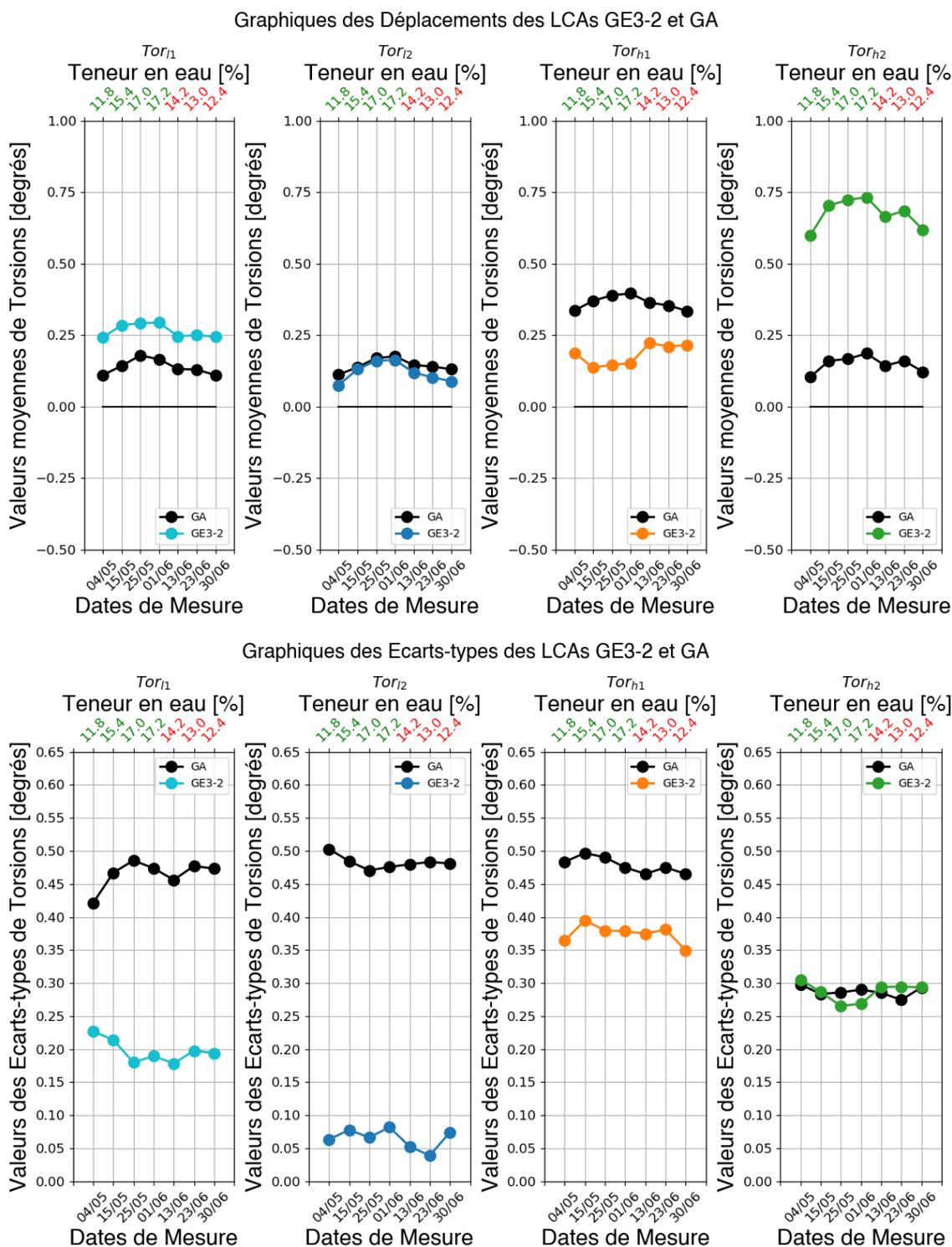


FIGURE 4.11 – Résultats de déplacements de torsion Tor_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE3-2 qui correspond à une configuration FD/Q/FD et comparaison avec le groupe GA.



FIGURE 4.12 – Rappel de la séquence d'empilements de la configuration GE5-1 : FD+/ FD-/Q/FD+/FD-.

faces latérales symétriques. Pour les faces I_1 et I_2 , des variations maximales des moyennes de déplacements respectivement de -480% et 184% sont enregistrées. Pour les faces h_1 et h_2 , les moyennes montrent des variations respectivement de -51.1% et 349%. De plus, les variations finales des moyennes de déplacements sont respectivement de 34.5% et 12.1% pour les faces symétriques I_1 et I_2 et de -4.81% et 74.2% pour les faces symétriques h_1 et h_2 . Concernant les écarts-types, les variations maximales sont respectivement pour les faces symétriques I_1 et I_2 de -65.9% et -60.8% et pour les faces symétriques h_1 et h_2 de -24.4% et -56.0%. Pour les variations finales, les valeurs sont respectivement de -65.9% et -60.8% pour les faces I_1 et I_2 et respectivement de 7.56% et -54.3% pour les faces h_1 et h_2 . Les valeurs des écarts-types sont généralement inférieurs pour la configuration GE5-1.

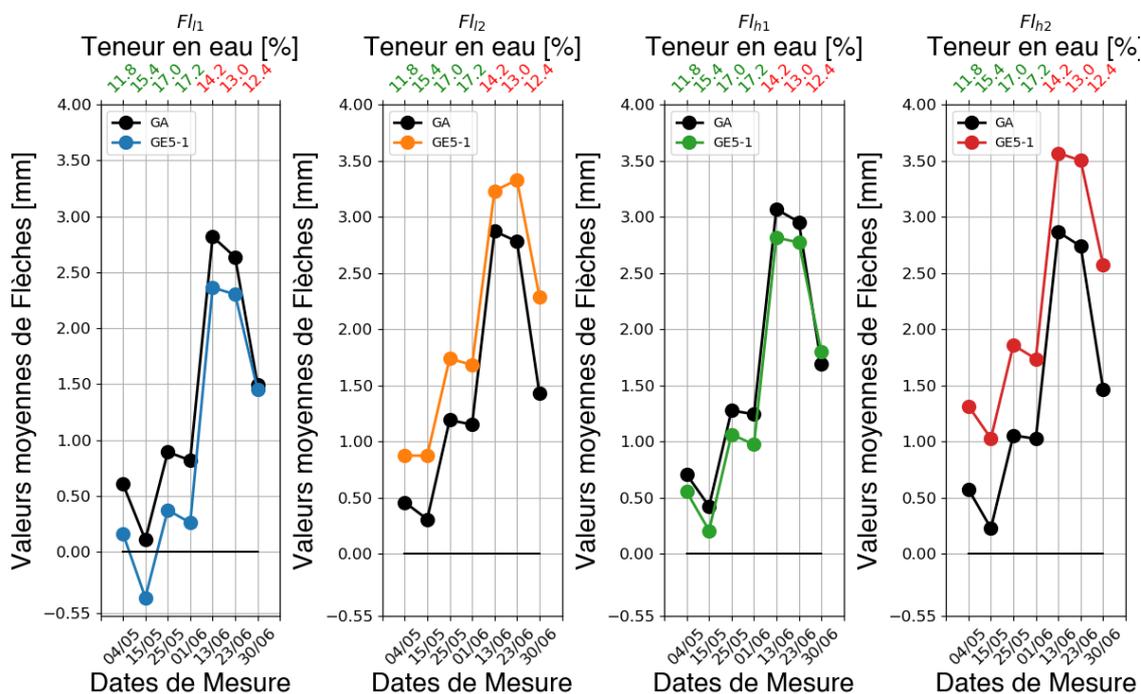
- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.14, les intervalles de moyennes pour la configuration GE5-1 $[-1.1, 0.81]$ mm sont supérieurs aux résultats obtenus pour le groupe GA de $[-0.48, 0.39]$ mm. Concernant les écarts-types, les variations maximales sont comprises dans l'intervalle $[-76.7, 283]$ % et les variations finales sont comprises dans l'intervalle $[-58.4, 283]$ %.
- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.15, les moyennes de déplacements de GE5-1 sont supérieures en valeurs absolues en comparaison du groupe GA (hormis la face I_1) avec des augmentations maximales comprises dans l'intervalle $[20.4, 443]$ % (diminution maximale de -241% pour la face I_1) et des augmentations finales comprises dans l'intervalle $[2.87, 374]$ % (diminution finale de -231% pour la face I_1). Les écarts-types sont du même ordre dans le cas des faces h_1 et h_2 avec des variations maximales respectivement de -10.2% et 16.5% avec des variations finales respectivement de 4.35% et -2.92% et sont inférieurs dans le cas des faces I_1 et I_2 avec des variations maximales respectivement de -80.1% et -50.7% et des variations finales respectivement de -80.1% et -42.5%.

L'étude et comparaison des déplacements des LCAs GE5-1 avec le groupe GA permet d'étudier l'influence d'une configuration d'empilement QT non-symétrique sur la stabilité dimensionnelle des LCAs. De la même manière que la configuration d'empilement GE3-2, l'instabilité dimensionnelle est plus importante en comparaison du groupe GA pour les déplacements de tuilages et pour les moyennes de déplacements de flèches et de torsions avec une variabilité importante entre les faces symétriques. Cependant, il est possible de remarquer une diminution des écarts-types de ces déplacements et notamment sur les faces d'aboutage I_1 et I_2 . Cette tendance peut mettre en évidence l'influence de l'utilisation d'un nombre de plis supérieur avec des épaisseurs de lames plus faibles sur la variabilité des déplacements des faces d'aboutage I_1 et I_2 des LCAs.

(b) Configuration GE5-2 - FD/FQ/Q/FQ/FD :

Quatre échantillons de la configuration GE5-2 : FD/FQ/Q/FQ/FD ont été comparés au groupe GA. Cette configuration permet de mettre en évidence l'effet combiné de lames constituées de lamelles de même classe, des empilements QT et du nombre de classes de comportement sur

Graphiques des Déplacements des LCAs GE5-1 et GA



Graphiques des Ecart-types des LCAs GE5-1 et GA

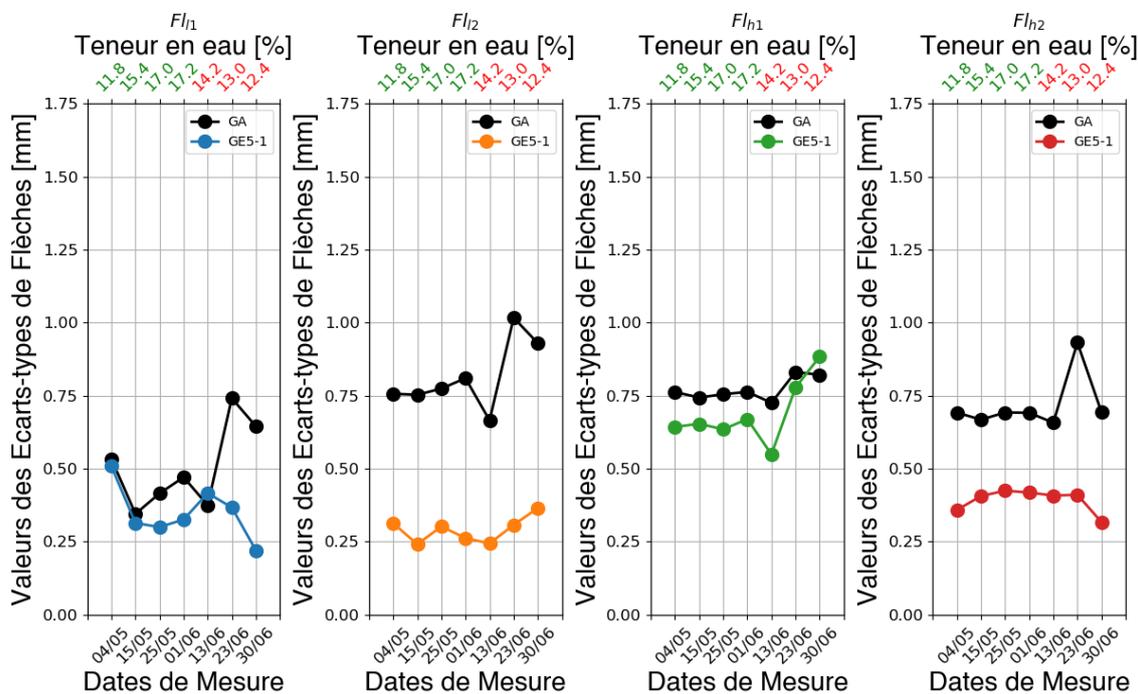
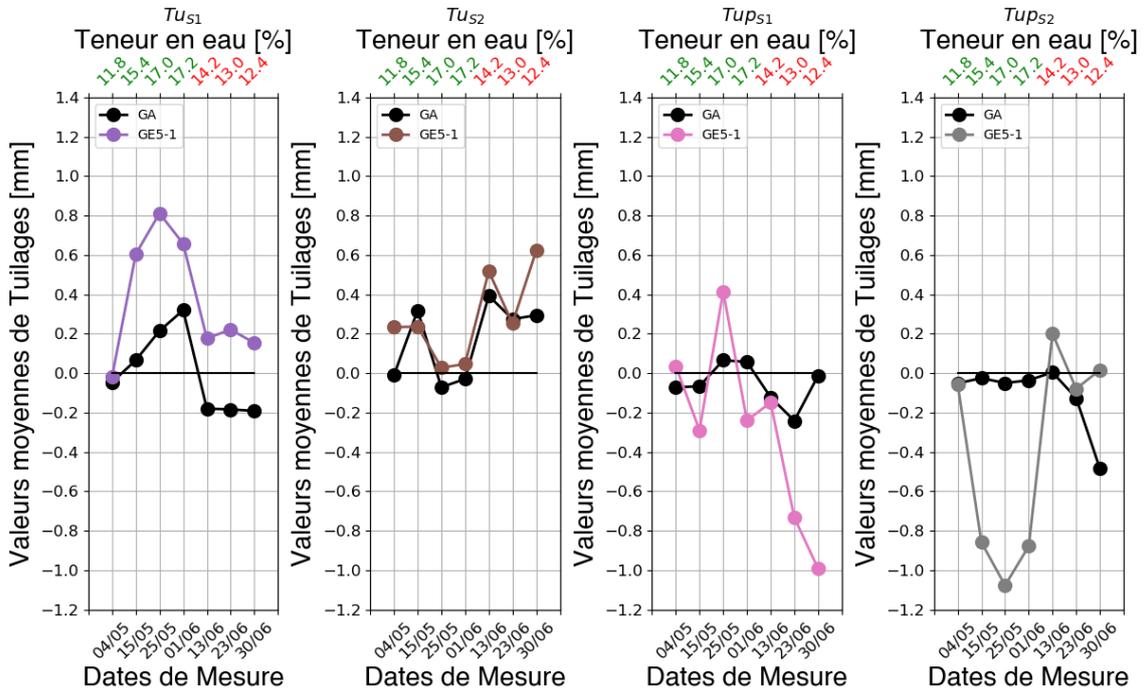


FIGURE 4.13 – Résultats des flèches de déplacements Fl_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-1 qui correspond à une configuration FD+/FD-/Q/FD+/FD- et comparaison avec le groupe GA.

Graphiques des Déplacements des LCAs GE5-1 et GA



Graphiques des Ecart-types des LCAs GE5-1 et GA

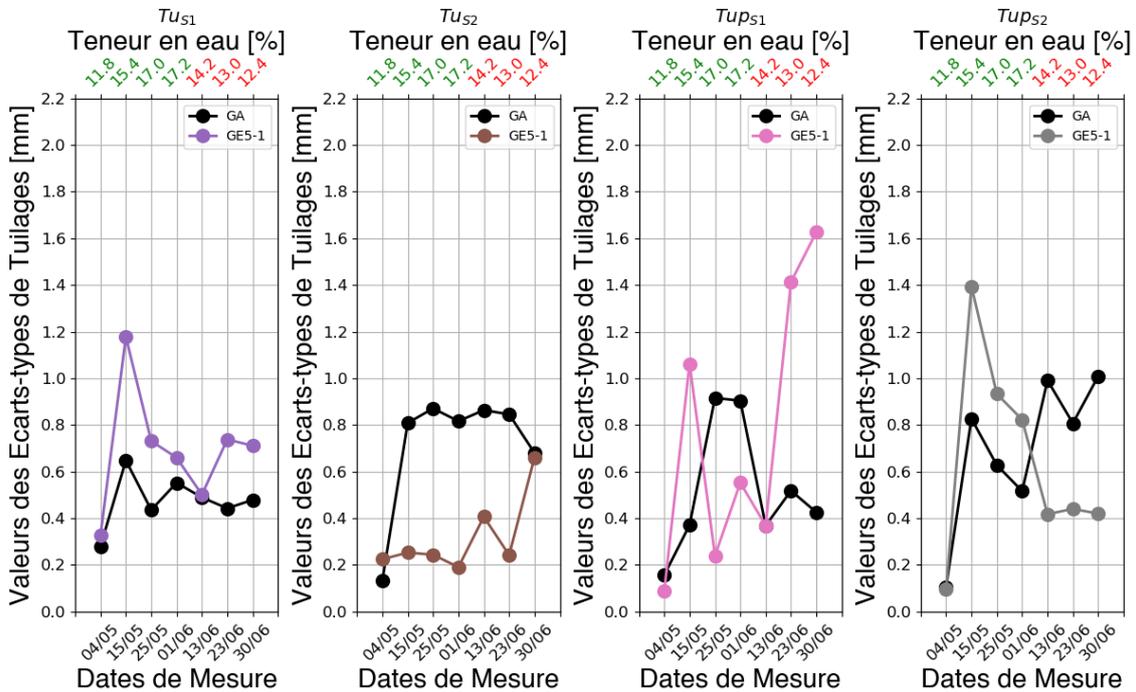


FIGURE 4.14 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-1 qui correspond à une configuration FD+/FD-/Q/FD+/FD- et comparaison avec le groupe GA.

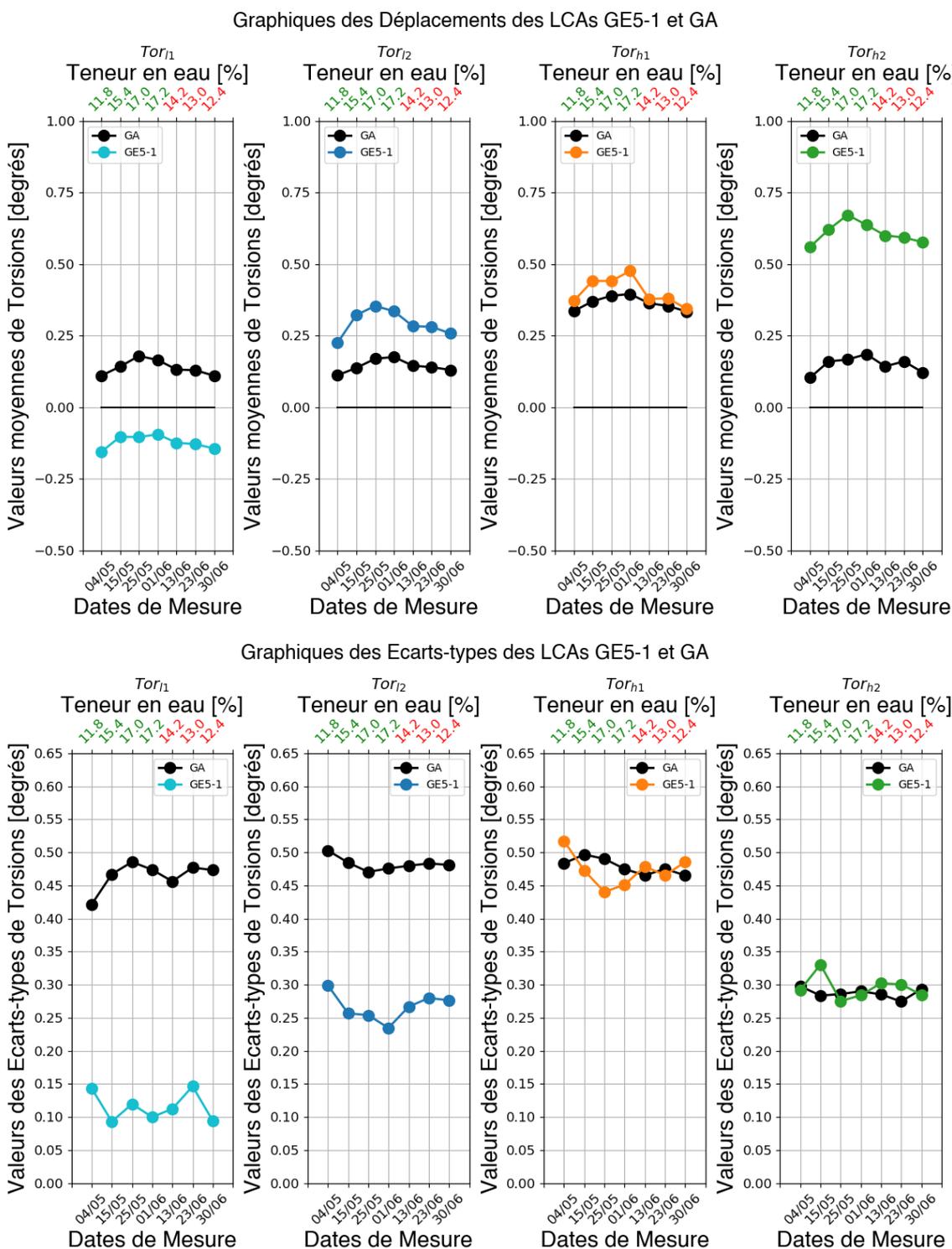


FIGURE 4.15 – Résultats de déplacements de torsion Tor_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-1 qui correspond à une configuration FD+/FD-/Q/FD+/FD- et comparaison avec le groupe GA.

la stabilité dimensionnelle des LCAs dans le cas d'un empilement symétrique. Les remarques suivantes sont issues de l'étude des Figs. 4.17-4.19.



FIGURE 4.16 – Rappel de la séquence d'empilements de la configuration GE5-2 : FD/FQ/Q/FQ/FD.

- Dans le cas des déplacements de flèches en Fig. 4.17, une variabilité des moyennes est notable entre les faces d'empilement symétriques. Pour les faces I_1 et I_2 , des variations maximales respectivement de -176% et 37.0% ont été enregistrées avec des variations finales respectivement de 12.8% et 36.9%. Également pour les faces h_1 et h_2 , les variations maximales sont respectivement de -156% et 91.3% avec des variations finales respectivement de -19.0% et 47.6%. De plus, les valeurs finales de déplacements moyens des GE5-2 sont supérieures à ceux de la configuration GA (hormis la face h_1). Cependant une diminution des écarts-types est notable pour toutes les faces latérales avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-82.2, -24.1]$ % et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-65.0, 0.39]$ %.
- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.18, la variabilité du comportement des faces symétriques en termes de moyennes et écarts-types de déplacements est conservée. Les intervalles des déplacements moyens pour la configuration GE5-2 sont de $[-0.79, 0.25]$ mm en comparaison de l'intervalle plus faible du groupe GA de $[-0.48, 0.39]$ mm. Concernant les écarts-types, les variations maximales sont comprises dans l'intervalle $[-60.6, 158]$ % et les variations finales sont comprises dans l'intervalle $[-61.5, 148]$ %.
- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.19, une diminution des moyennes en valeurs absolues est remarquable (hormis la face I_2) avec des diminutions maximales comprises dans l'intervalle $[-193, -78.9]$ % (augmentation maximale de 31.4% pour la face I_2) et des diminutions finales comprises dans l'intervalle $[-193, -73.2]$ % (augmentation finale de 27.7% pour la face I_2). Concernant les écarts-types, les valeurs diminuent dans le cas de la configuration GE5-2 (hormis la face h_1) avec des diminutions maximales comprises dans l'intervalle $[-47.4, -20.6]$ % (augmentation maximale de 21.2% pour la face h_1) et des diminutions finales comprises dans l'intervalle $[-41.5, -20.6]$ % (augmentation finale de 8.27% pour la face h_1).

L'étude des déplacements des LCAs de configuration GE5-2 avec le groupe GA permet de mettre en évidence l'utilisation de lames de classes de comportements fortement hétérogène en termes de motifs et donc d'orientation de cernes sur les déplacements dans une configuration d'empilement QT. L'utilisation de ces classes provoquent une variabilité dans les déplacements moyens en flèches et torsions des LCAs. Toutefois, l'utilisation des séquences d'empilement QT permet une diminution générale des écarts-types des déplacements de flèches et de torsions pour les faces d'aboutage I_1 et I_2 . Aucune tendance générale n'est extraite de l'étude du tuilage qui semble plus instable dimensionnement que le groupe GA.

(c) **Configuration GE5-3 - FD/D/Q/D/FD** : Quatre échantillons de la configuration GE5-3 : FD/D/Q/D/FD ont été comparés au groupe GA. Cette configuration permet de mettre en évidence

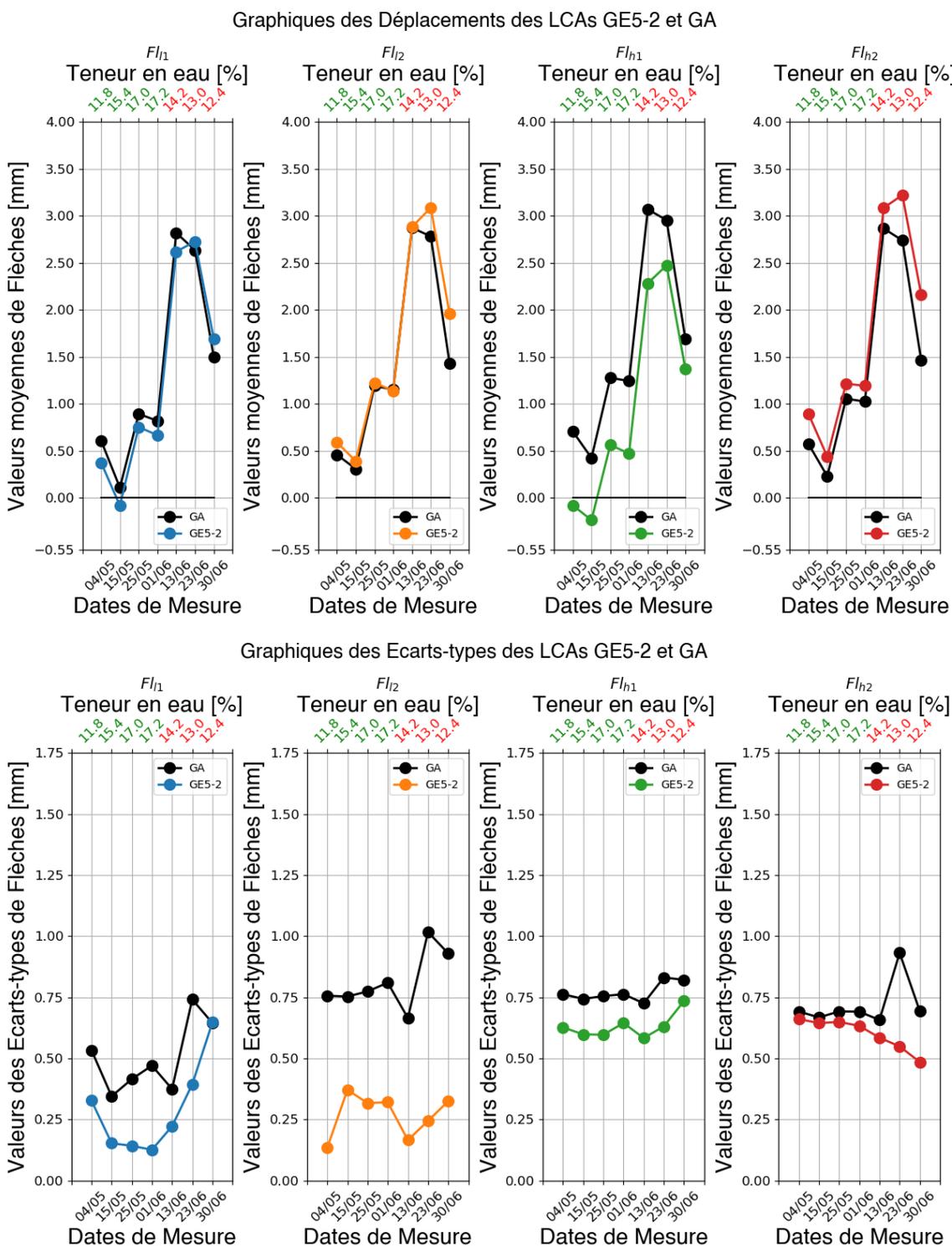


FIGURE 4.17 – Résultats des flèches de déplacements Fl_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-2 qui correspond à une configuration FD/FQ/Q/FQ/FD et comparaison avec le groupe GA.

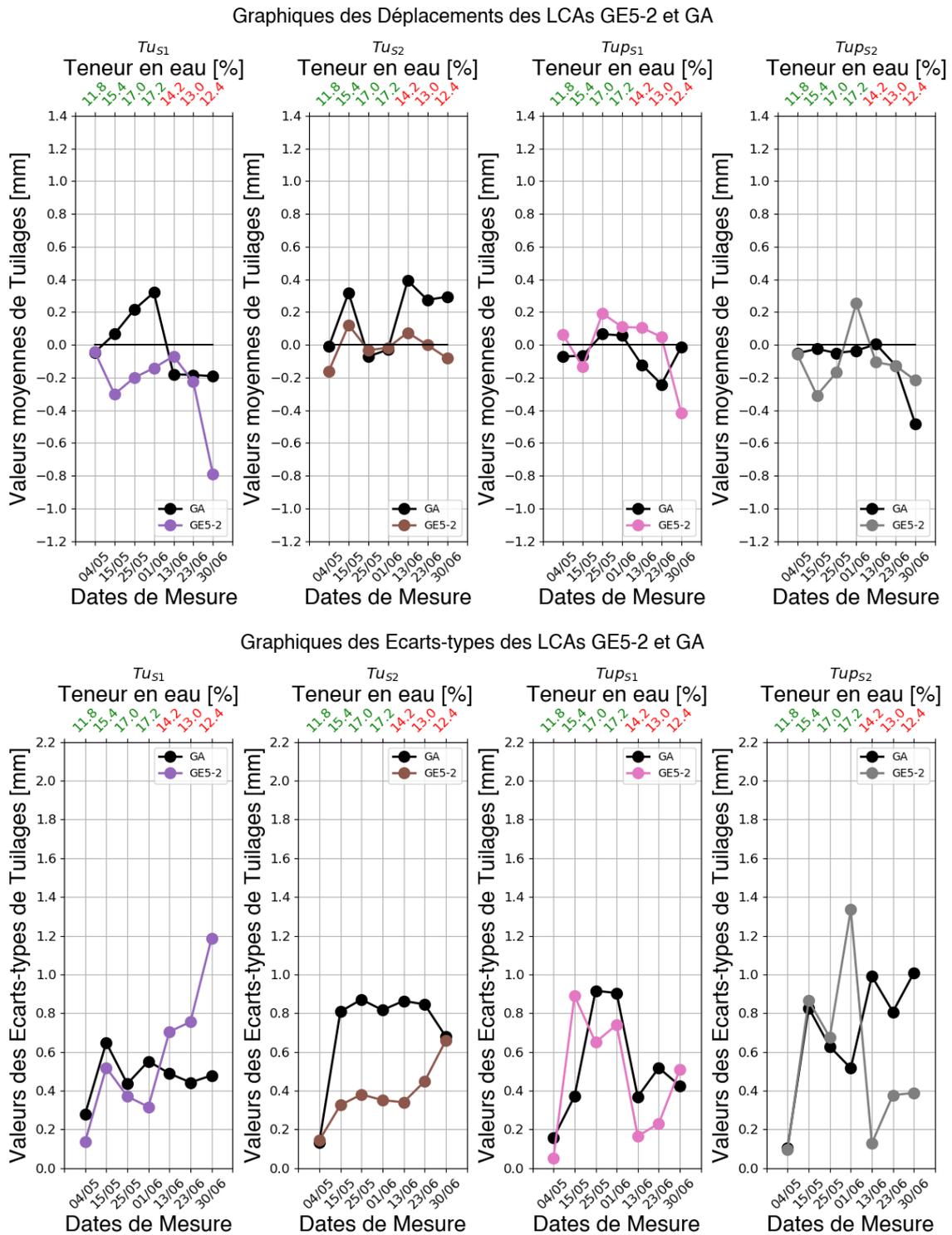


FIGURE 4.18 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-2 qui correspond à une configuration FD/FQ/Q/FQ/FD et comparaison avec le groupe GA.

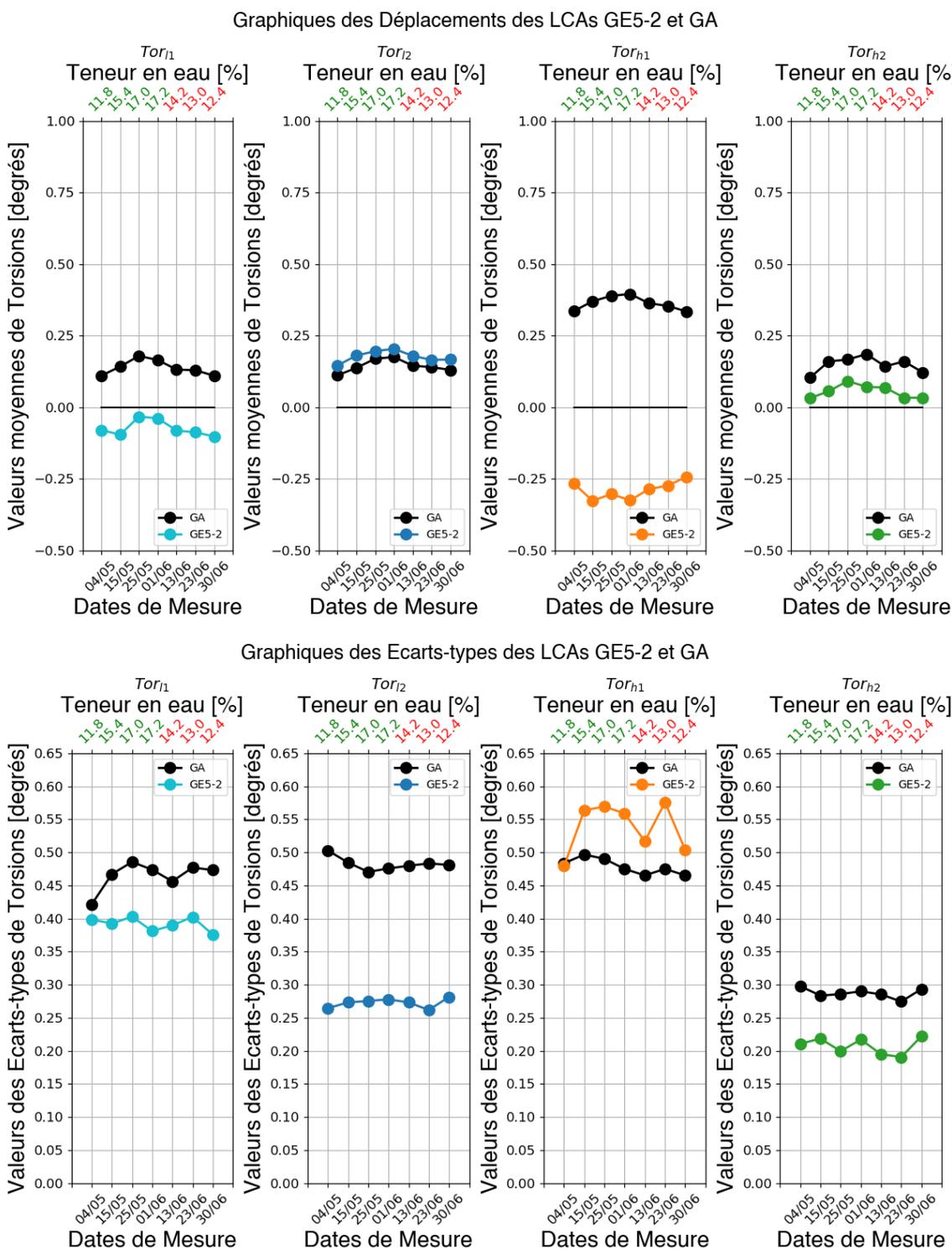


FIGURE 4.19 – Résultats de déplacements de torsion Tor_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-2 qui correspond à une configuration FD/FQ/Q/FQ/FD et comparaison avec le groupe GA.

l'utilisation de classes de comportement faiblement hétérogène comme les lamelles doses D en combinaison des lamelles fortement hétérogène de FD en termes d'orientation de cernes dans une configuration de séquence d'empilement QT avec les lames FD situées sur les extérieures des LCAs, voir Fig. 4.20. Les remarques suivantes sont issues de l'étude des Figs. 4.21-4.23.



FIGURE 4.20 – Rappel de la séquence d'empilements de la configuration GE5-3 : FD/D/Q/D/FD.

- Dans le cas des déplacements de flèches de faces en Fig. 4.21, il est possible de remarquer une augmentation générale des moyennes avec des augmentations maximales comprises dans l'intervalle $[12.9, 260]$ % et des augmentations finales comprises dans l'intervalle $[5.69, 35.3]$ %. Concernant les écarts-types, une diminution générale est notable (hors phase d'adsorption de la face I_1) avec des diminutions maximales comprises dans l'intervalle $[-74.8, -23.7]$ % et des diminutions finales comprises dans l'intervalle $[-73.2, -3.12]$ %.
- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.22, il est possible de remarquer une augmentation des intervalles de valeurs des moyennes pour la configuration GE5-3 de $[-0.30, 0.96]$ mm de $[-0.48, 0.39]$ mm. De plus, les valeurs finales des tuilages Tu_{S_1} et Tu_{S_2} ne respectent pas les valeurs de la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134]. Concernant les écarts-types, une diminution générale des valeurs est observable avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-91.2, -56.1]$ % et des diminutions finales comprises dans l'intervalle $[-83.9, -13.3]$ %.
- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.23, le comportement en termes de déplacements moyens semble être variable entre les faces symétriques avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-44.4, 105]$ % et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-38.1, 221]$ %. Concernant les écarts-types, les valeurs semblent inférieures dans le cas de la configuration GE5-3 (hormis la face h_2) avec des diminutions maximales comprises dans l'intervalle $[-45.9, -20.9]$ % (augmentation maximale de 51.7% pour la face h_2) et des diminutions finales comprises dans l'intervalle $[-38.6, -15.9]$ % (augmentation finale de 51.7% pour la face h_2).

L'étude des déplacements des LCAs de configuration GE5-3 avec le groupe GA permet d'étudier l'influence des configurations d'empilement QT combiné avec une augmentation du nombre de plis et couplé avec l'utilisation de classes de comportement faiblement hétérogène en termes d'orientation de cernes. La combinaison de ces paramètres de conception permet une diminution générale des écarts-types des déplacements de flèches, de tuilages et de torsions. Toutefois, l'utilisation des lames de classe de comportement FD sur les extérieures de l'empilement beaucoup plus hétérogène en termes d'orientation de cernes entraîne une variabilité des déplacements des faces symétriques notamment en torsion et une augmentation des valeurs moyennes de tuilages et de flèches.

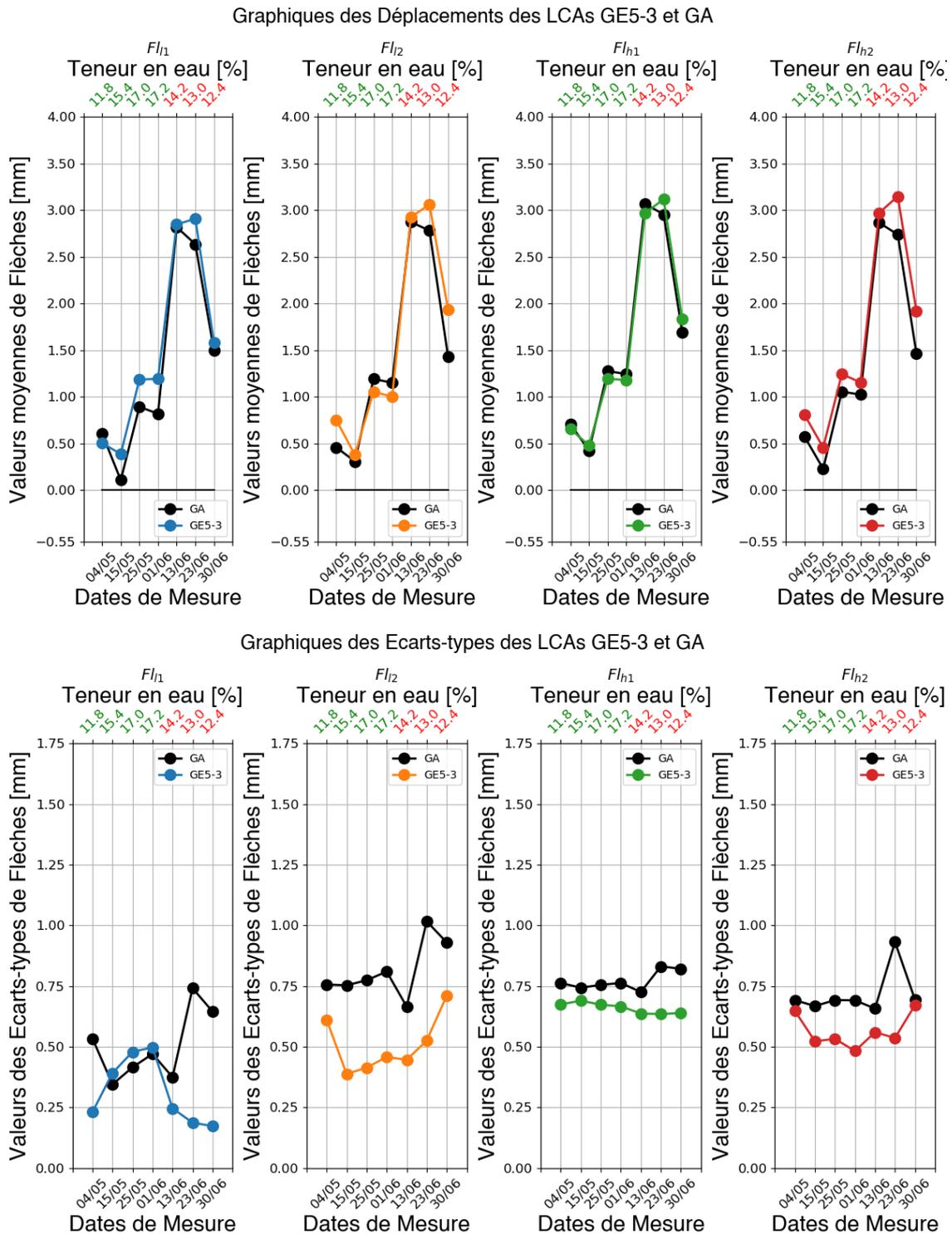


FIGURE 4.21 – Résultats des flèches de déplacements FI_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-3 qui correspond à une configuration FD/D/Q/D/FD et comparaison avec le groupe GA.

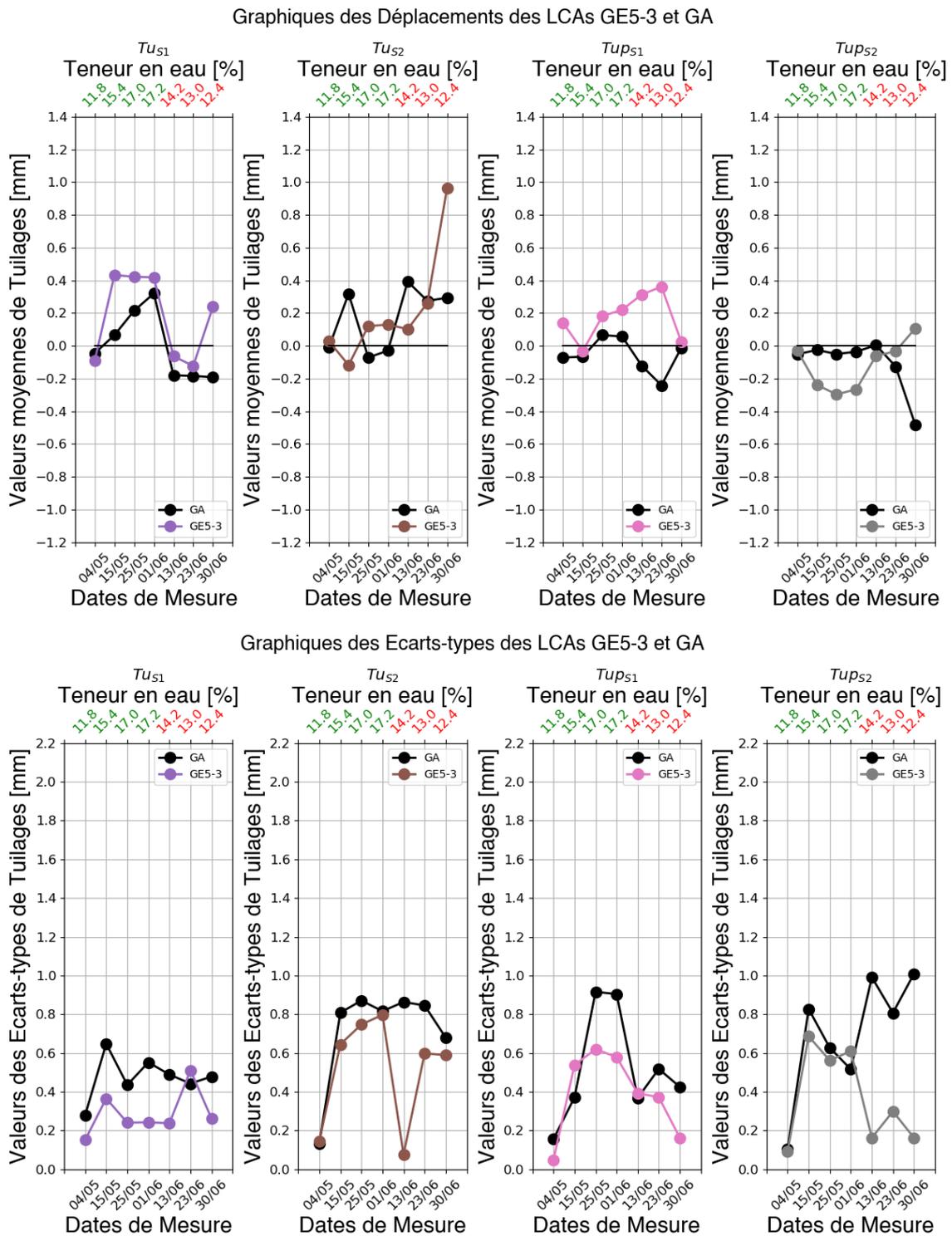


FIGURE 4.22 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-3 qui correspond à une configuration FD/D/Q/D/FD et comparaison avec le groupe GA.

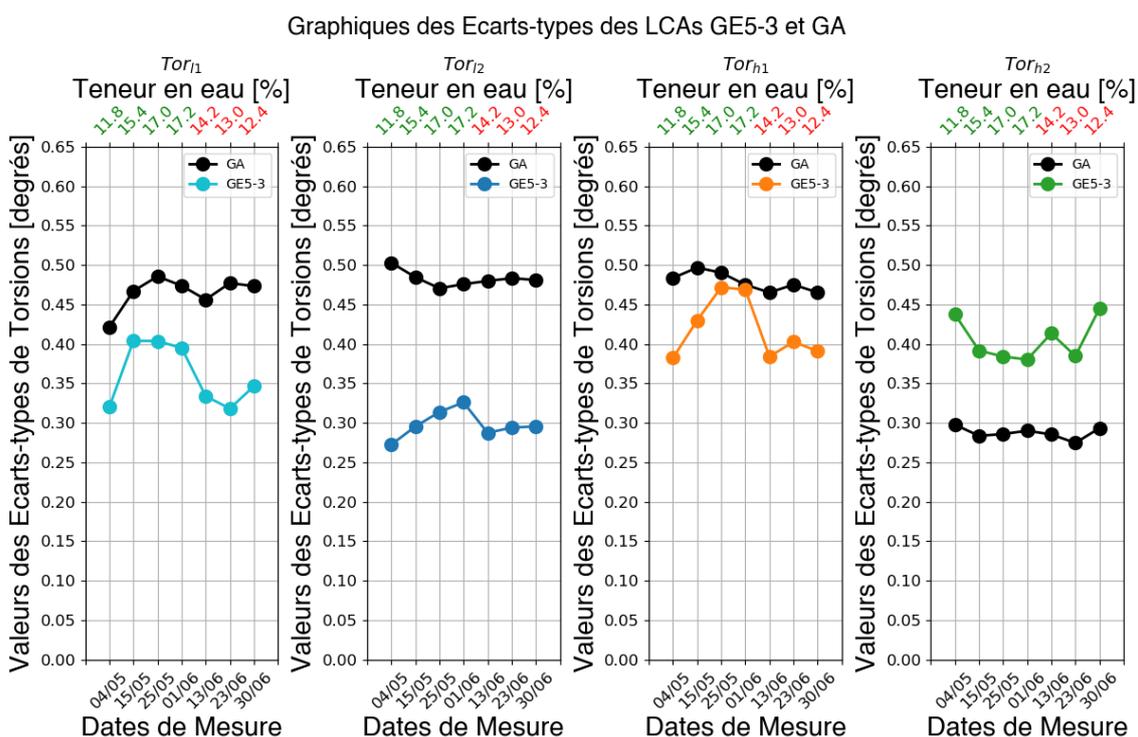
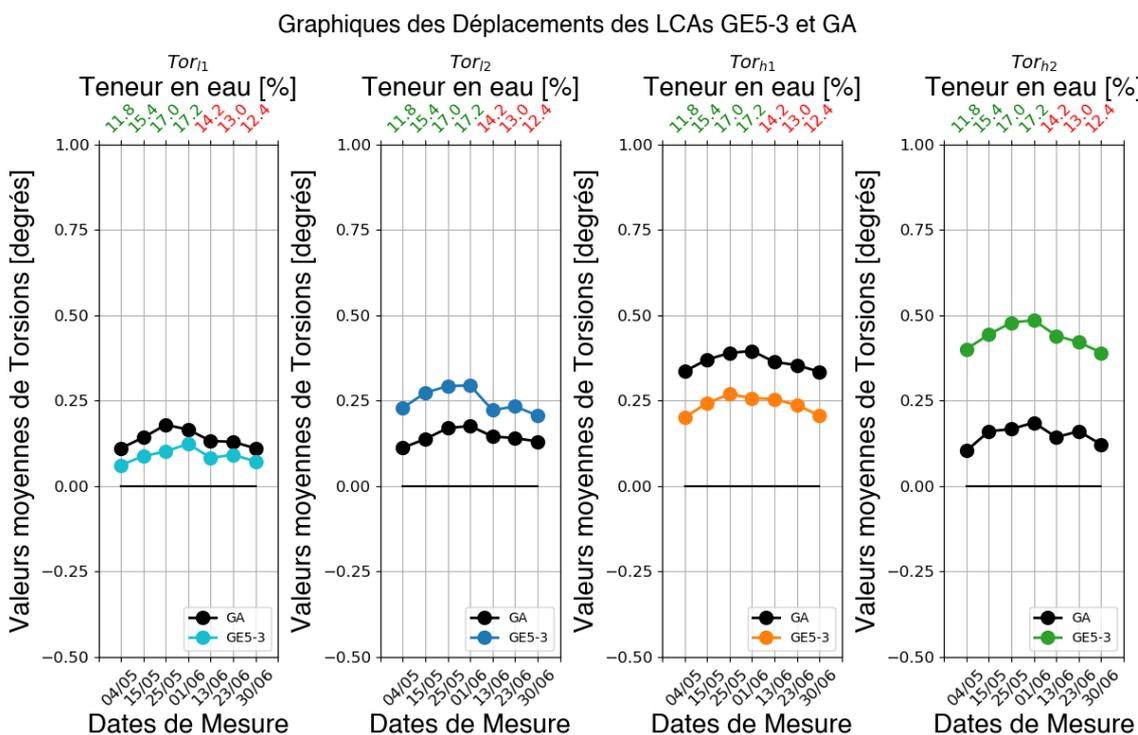


FIGURE 4.23 – Résultats de déplacements de torsion Tor_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-3 qui correspond à une configuration FD/D/Q/D/FD et comparaison avec le groupe GA.

(d) **Configuration GE5-4 - D/FD/Q/FD/D** : Enfin, quatre échantillons de la configuration GE5-4 : D/FD/Q/FD/D sont comparés au groupe GA. Cette configuration permet d'étudier l'influence d'une modification de l'ordre des lames sur la stabilité dimensionnelle des LCAs (en comparaison de la configuration GE5-3) en utilisant des lamelles en dosses sur les lames extérieures tout en conservant l'influence positive sur la stabilité dimensionnelle du nombre de plis avec une séquence d'empilement QT, voir Fig. 4.24. Les remarques suivantes sont issues de l'étude des Figs. 4.25-4.27.



FIGURE 4.24 – Rappel de la séquence d'empilements de la configuration GE5-4 : D/FD/Q/FD/D.

- Dans le cas des déplacements de flèches en Fig. 4.25, il est possible de constater que les moyennes ne présentent pas d'amélioration significative comparées à celles du groupe GA avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-106, 45.3] \%$ tandis qu'on observe une augmentation des valeurs finales en comparaison du groupe GA avec des augmentations finales comprises dans l'intervalle $[-3.04, 28.9] \%$. Concernant les écarts-types, les valeurs sont généralement inférieures à celles du groupe GA avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-77.2, -35.9] \%$ et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-71.5, -22.4] \%$.
- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.26, les intervalles des valeurs des déplacements moyens sont diminués pour la face S_2 avec un intervalle de $[-0.17, 0.28] \text{ mm}$ mais sont supérieurs pour la face S_1 avec un intervalle de $[-0.71, 0.15] \text{ mm}$ en comparaison de l'intervalle de déplacements du groupe GA de $[-0.48, 0.39] \text{ mm}$. Cette différence de comportement entre les faces S_1 et S_2 est conservée pour les écarts-types. Pour la face S_2 , des diminutions maximales de -54.7% et -86.2% et des diminutions finales de -42.5% et -65.7% sont enregistrées. Pour la face S_1 , des augmentations maximales de 51.7% et 88.0% et des augmentations finales de 33.3% et 22.2% sont enregistrées. Cependant, les valeurs finales des tuilages moyens Tu_{S_1} et Tu_{S_2} respectent la valeur maximale imposée par la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134].
- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.27, il est notable de constater une diminution des moyennes en valeurs absolues (légère augmentation pour la face I_2) avec des variations maximales des valeurs en comparaison du groupe GA comprises dans l'intervalle $[-219, -62.3] \%$ (augmentation maximale de 37.5% pour la face I_2) et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-170, -62.3] \%$ (augmentation finale de 13.2% pour la face I_2). Concernant les écarts-types, on note une diminution générale des valeurs avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-59.9, -18.5] \%$ et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-59.9, -9.45] \%$.

L'étude des déplacements des LCAs de configuration GE5-4 avec le groupe GA permet d'étudier l'influence des configurations d'empilement QT sur la stabilité dimensionnelle tout en regardant l'influence de la position des lames dans les séquences d'empilement en fonction de leur classe

de comportement. En effet, par rapport à la configuration GE5-3, le caractère variable du comportement en déplacements de faces symétriques n'est pas retrouvé dans le cas de la configuration GE5-4. De plus, cette configuration permet une diminution des valeurs des écarts-types pour les flèches et les torsions qui est une conséquence de l'utilisation d'une séquence d'empilement QT combinée avec une augmentation du nombre de plis. En addition, les valeurs des moyennes en torsions sont inférieures aux valeurs obtenues pour le groupe GA. Cependant, dans le cas des flèches, les valeurs finales moyennes sont augmentées. En définitif, cette configuration permet une amélioration de la stabilité dimensionnelle des LCAs en comparaison du groupe GA dans le cas des torsions, des tuilages de la face S_2 et des écarts-types des flèches. Dans le cas des valeurs moyennes de flèches et des tuilages de la face S_1 , cette configuration est moins stable que le groupe GA. Il est possible que les mesures réalisées sur le nombre peu important de 4 LCAs pour cette configuration transcrive des résultats de cas extrêmes de déplacements sur la face S_1 . Une étude sur cette configuration peut être réalisée dans le futur avec un nombre plus important de LCAs pour retranscrire plus fidèlement le comportement des déplacements.

Comparaison de toutes les configurations du groupe GE5 : Finalement, les quatre échantillons de chacune des configurations du groupe GE5 sont comparées entre elles et sont présentées sur les Figs. 4.28-4.30.

4.6 Comparaison de l'empilement GE5-4 avec les LCAs du groupe GT

La configuration GE5-4 semble être la plus appropriée pour améliorer la stabilité dimensionnelle des LCAs du groupe GB. Une comparaison entre les déplacements de la configuration GE5-4 et le groupe GT est réalisée ci-dessous grâce aux Figs. 4.31-4.33.

- Dans le cas des déplacements de flèches en Fig. 4.31, une amélioration des valeurs moyennes de déplacements est observable en comparaison du groupe GT des LCAs du groupe GB avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-104, 76.0] \%$ et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-22.1, -1.02] \%$. Concernant les écarts-types, les valeurs pour la configuration GE5-4 sont inférieures aux valeurs du groupe GT avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-89.0, -26.5] \%$ et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-74.5, -15.1] \%$.
- Dans le cas des déplacements de tuilages en Fig. 4.32, les intervalles de déplacements moyens sont inférieurs dans le cas de la configuration GE5-4 avec un intervalle de $[-0.71, 0.26]$ mm en comparaison du groupe GT $[-0.60, 0.76]$ mm malgré des valeurs extrêmes enregistrées pour la face S_1 . Concernant les écarts-types, les valeurs sont inférieures dans le cas de la configuration GE5-4 en comparaison du groupe GT avec des diminutions maximales comprises dans l'intervalle $[-92.8, -53.4] \%$ et des diminutions finales comprises dans l'intervalle $[-58.9, -8.80] \%$;
- Dans le cas des déplacements de torsions en Fig. 4.33, les valeurs de moyennes de déplacements sont inférieures pour la configuration GE5-4 en comparaison du groupe GT avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-144, -70.5] \%$ et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-128, -70.5] \%$. Concernant les écarts-types, on note une diminution générale des valeurs pour la configuration GE5-4 en comparaison du groupe GT (hormis la face I_1) avec des variations maximales comprises dans l'intervalle $[-53.9, -37.0] \%$ (augmentation maximale de 23.7% pour la face I_1) et des variations finales comprises dans l'intervalle $[-45.8, -10.3] \%$ (augmentation finale de 23.7% pour la face I_1).

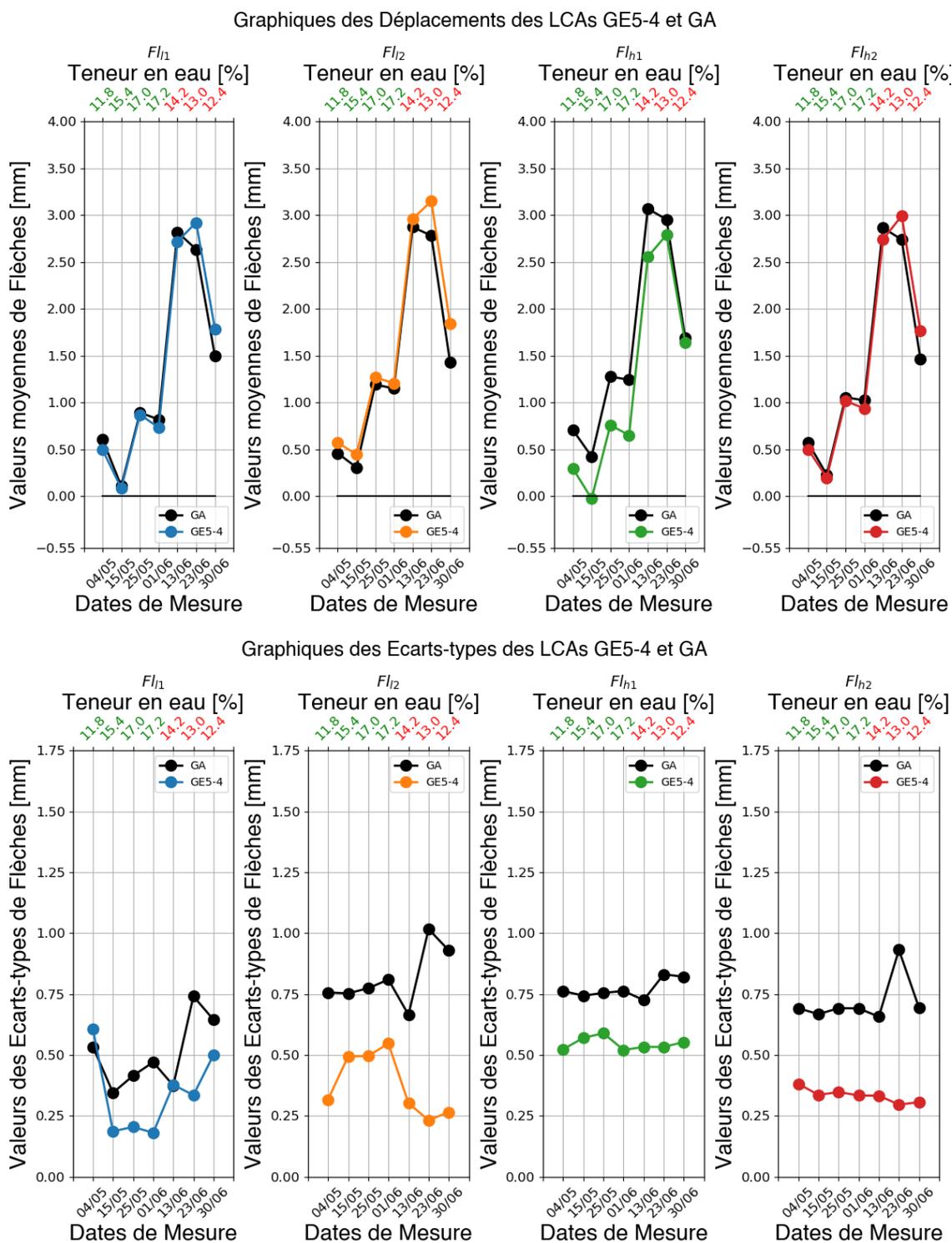
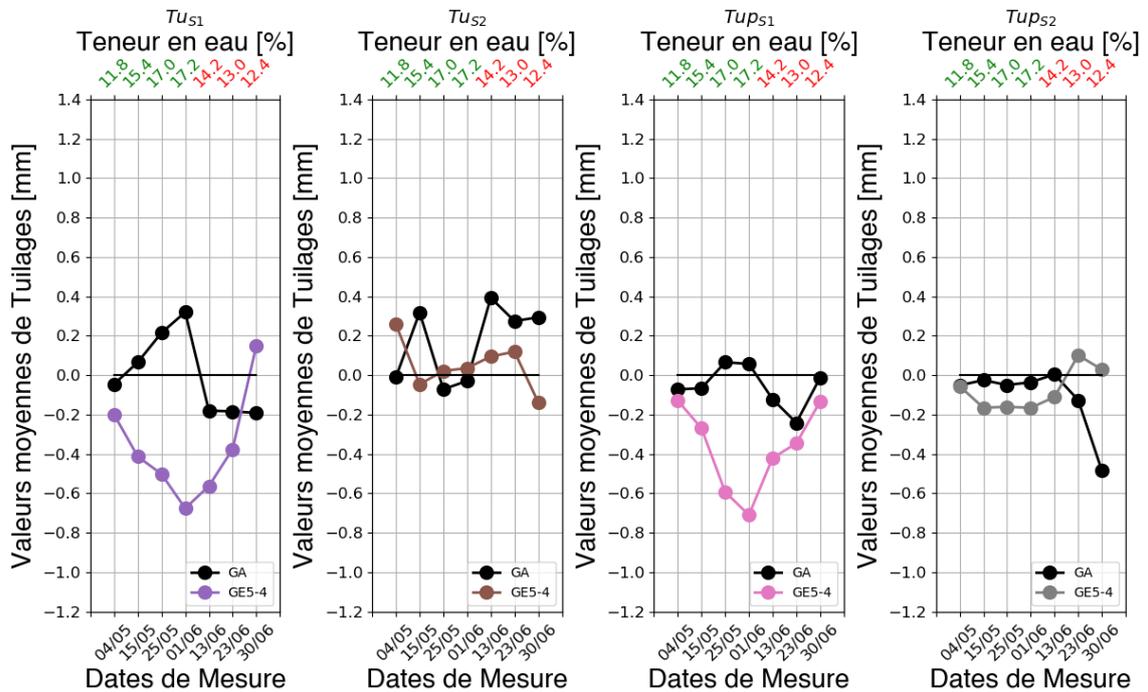


FIGURE 4.25 – Résultats des flèches de déplacements Fl_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-4 qui correspond à une configuration D/FD/Q/FD/D et comparaison avec le groupe GA.

Graphiques des Déplacements des LCAs GE5-4 et GA



Graphiques des Ecart-types des LCAs GE5-4 et GA

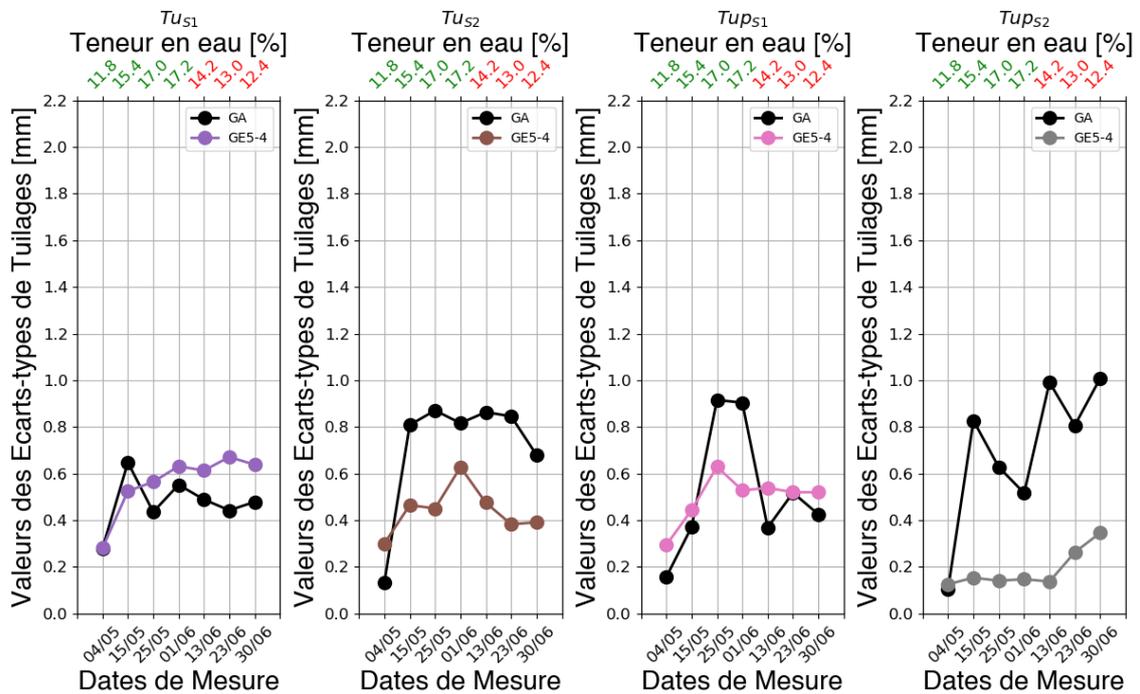


FIGURE 4.26 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-4 qui correspond à une configuration D/FD/Q/FD/D et comparaison avec le groupe GA.

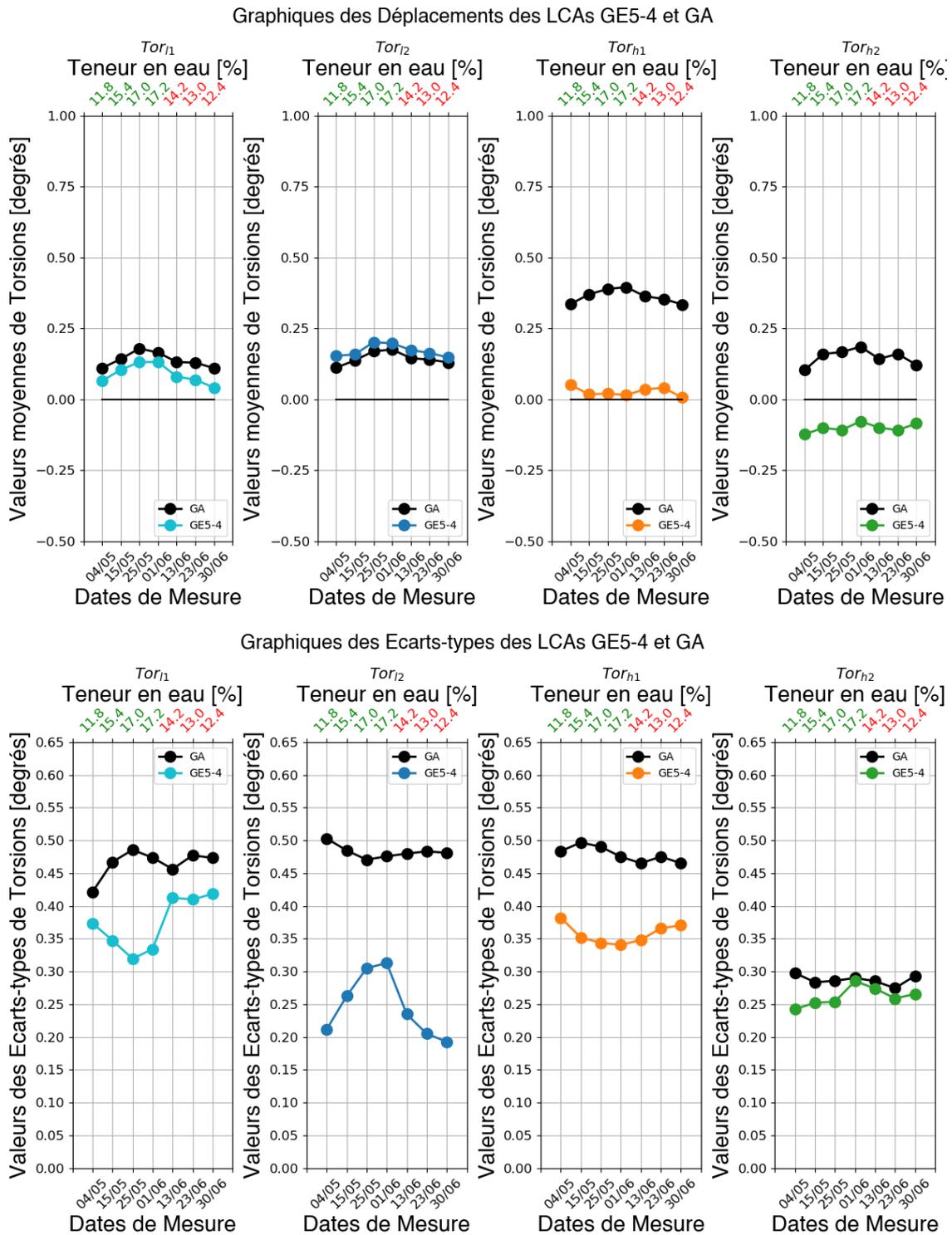
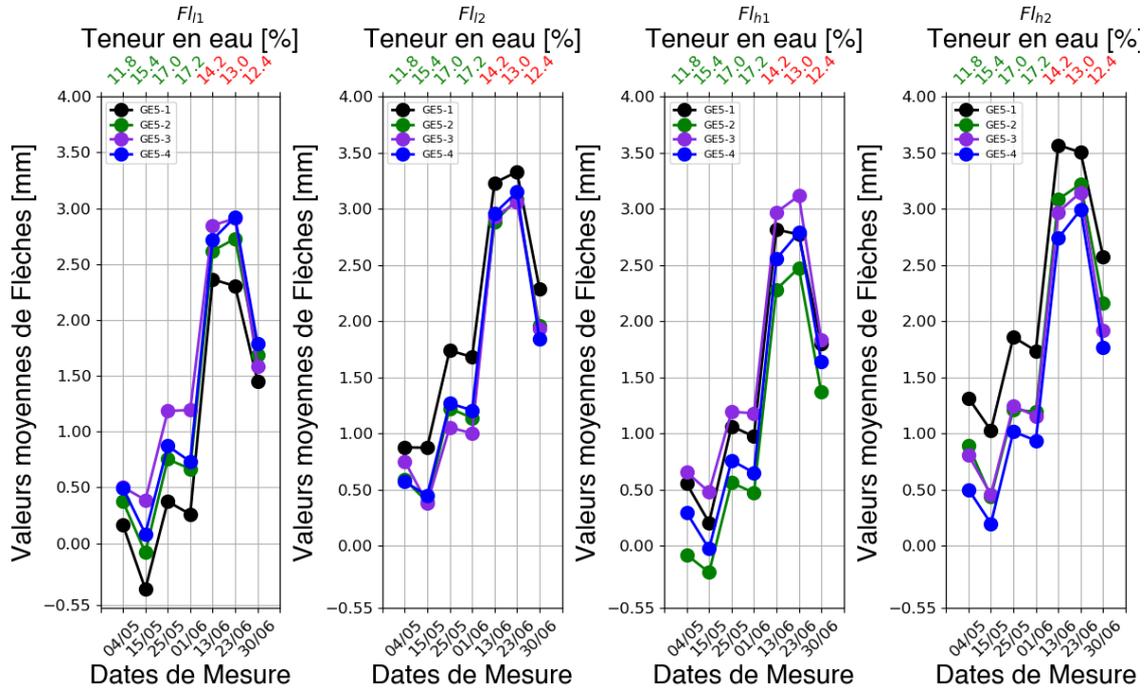


FIGURE 4.27 – Résultats de déplacements de torsion Tor_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-4 qui correspond à une configuration D/FD/Q/FD/D et comparaison avec le groupe GA.

Graphiques de comparaison des Déplacements des LCAs GE5



Graphiques de comparaison des Ecart-types des LCAs GE5

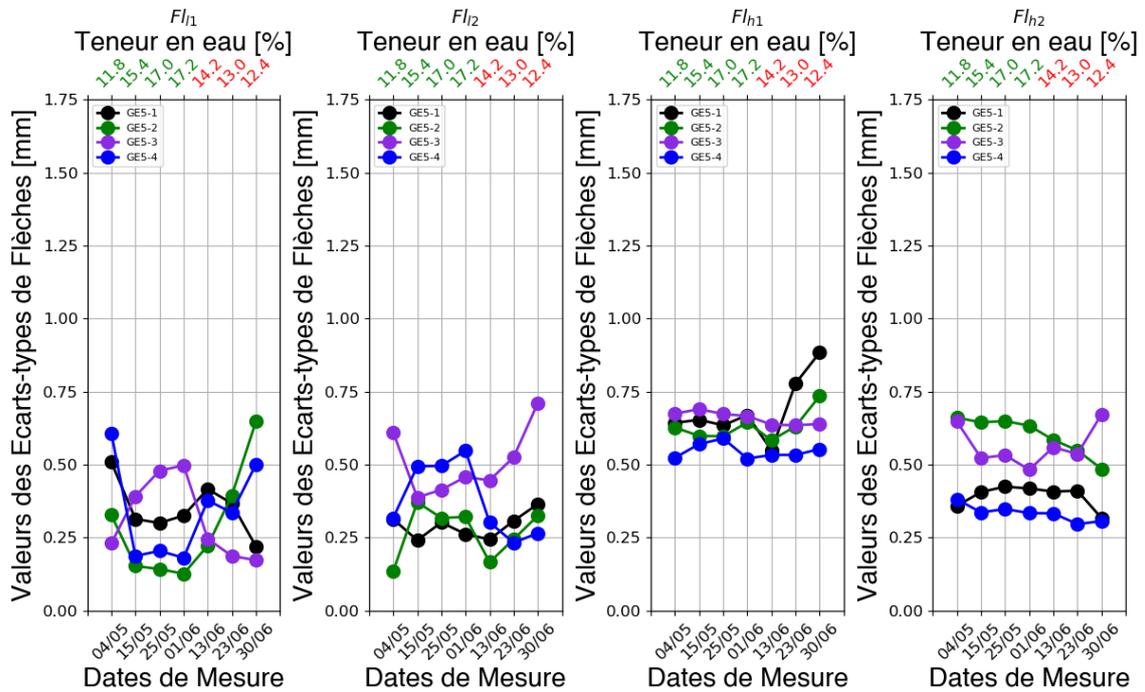
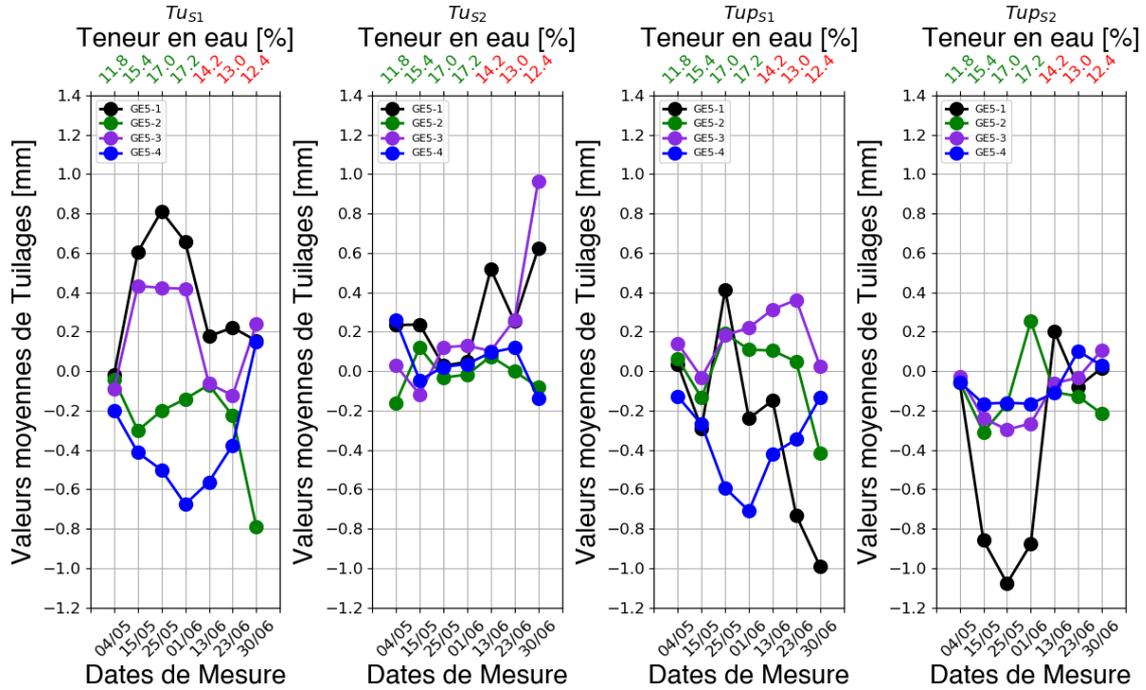


FIGURE 4.28 – Comparaison des valeurs des flèches de déplacements F_{l_i} des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour toutes les configurations du groupe GE5.

Graphiques de comparaison des Déplacements des LCAs GE5



Graphiques de comparaison des Ecart-types des LCAs GE5

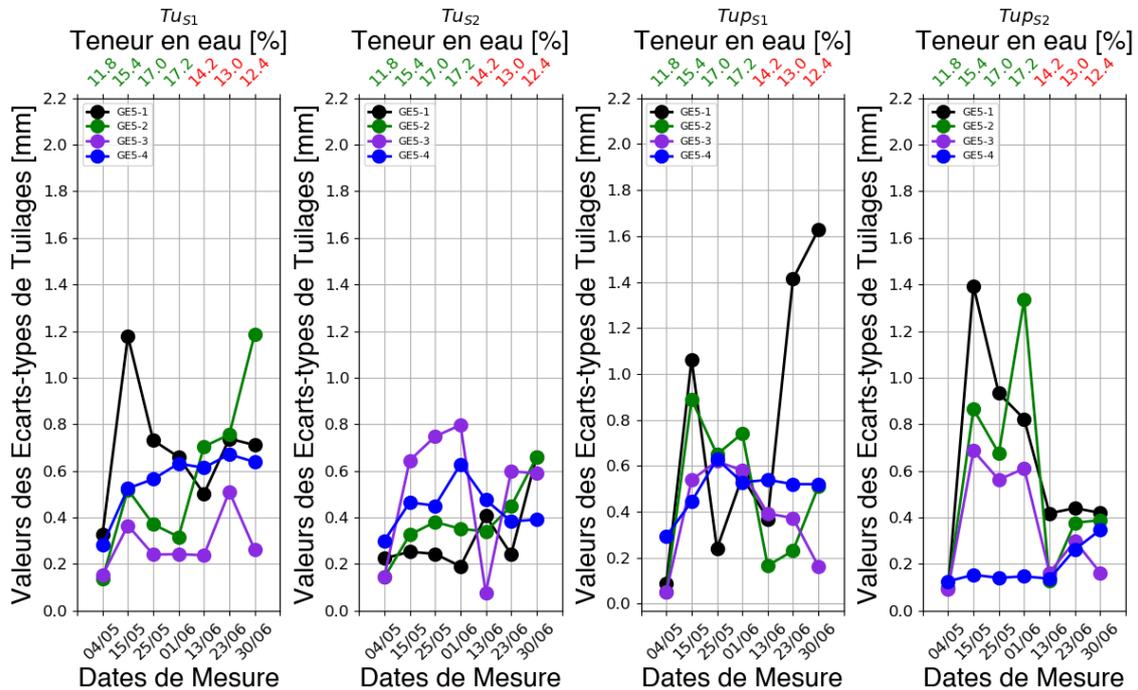
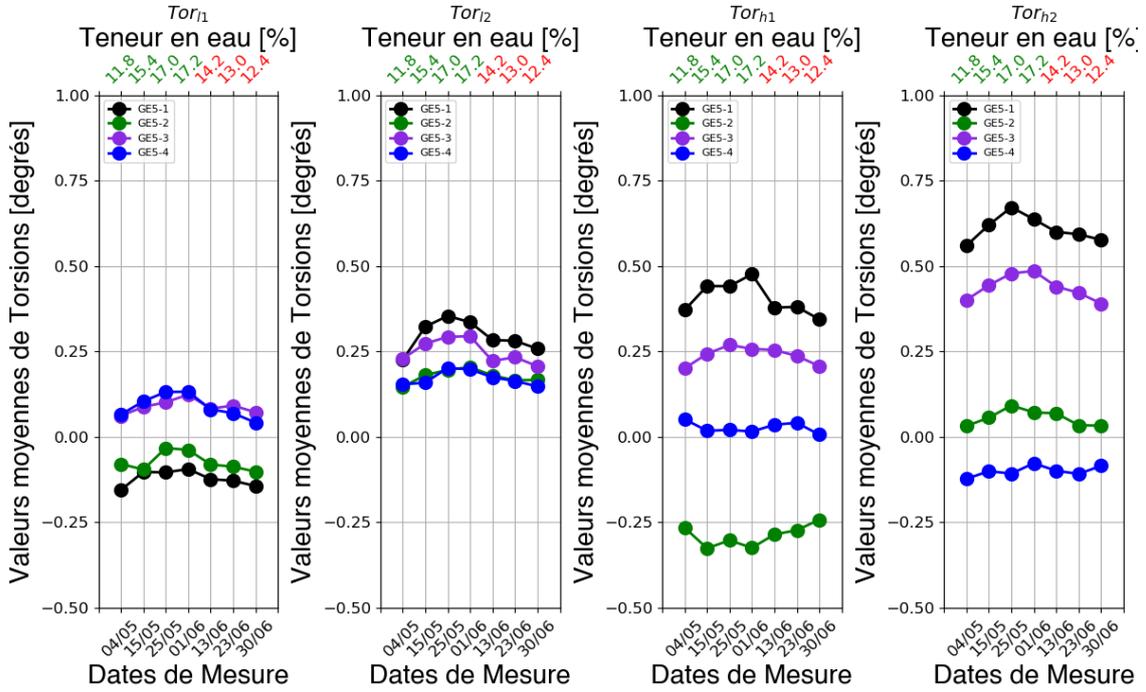


FIGURE 4.29 – Comparaison des valeurs des tuilages de déplacements F_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour toutes les configurations du groupe GE5.

Graphiques de comparaison des Déplacements des LCAs GE5



Graphiques de comparaison des Ecart-types des LCAs GE5

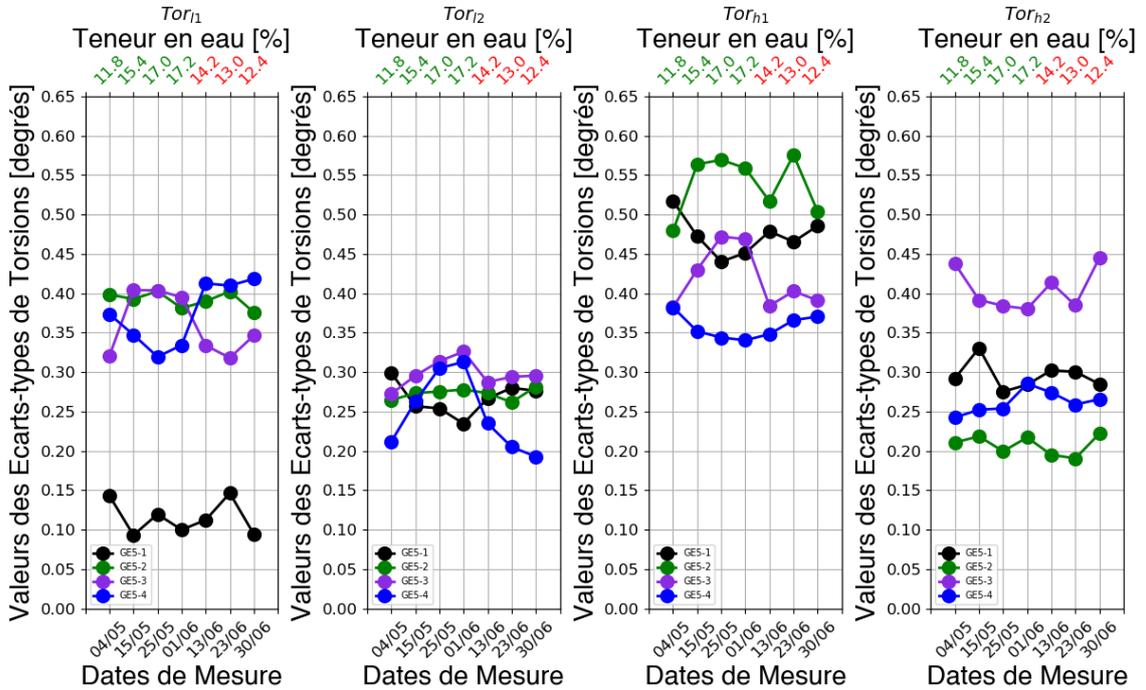


FIGURE 4.30 – Comparaison des valeurs des torsions de déplacements F_{li} des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour toutes les configurations du groupe GE5.

L'empilement GE5-4 : D/FD/Q/FD/D représente la meilleure configuration parmi celles étudiées dans ce travail de thèse pour une amélioration de la stabilité dimensionnelle des LCAs du groupe GB pour les valeurs finales moyennes des déplacements ainsi que pour la variabilité des déplacements. Une analyse de la stabilité dimensionnelle de cette configuration peut être réalisée dans le futur avec un nombre de LCAs beaucoup plus important (nombre de 4 LCAs par configuration dans ce travail de thèse) pour estimer fidèlement les résultats de stabilité de cet empilement.

4.7 Conclusions sur la stabilité dimensionnelle des LCAs

Plusieurs conclusions peuvent être tirées des résultats et comparaisons des déplacements des groupes de LCAs :

1. Toutes les moyennes de déplacements de flèches en fin d'essai pour chaque face latérale de chaque groupe de LCAs sont supérieures à la limite imposée par la norme AFNOR NF EN 13307-1 [134].
2. Les déplacements de flèches semblent être impactés par la cinétique de sorption des LCAs en addition de l'influence des valeurs de teneurs en eau des LCAs. Une étude supplémentaire de stabilisation des LCAs à une teneur en eau de référence de 12% doit être réalisée dans des études ultérieures pour étudier l'évolution induite des déplacements de flèches.
3. L'influence des lames aboutées par des lamelles de même classes de comportement est importante notamment sur les faces d'aboutage I_1 et I_2 et représente un paramètre majeur de conception qui permet d'obtenir une amélioration de la stabilité dimensionnelle des LCAs.
4. L'influence des empilements symétriques choisis dans ce travail de thèse pour des LCAs à 3 plis ne permet pas une amélioration de la stabilité dimensionnelle significative et constante et semble provoquer une variabilité du comportement entre les faces symétriques de par la définition des classes de comportement. Une définition plus fine des classes de comportement en fonction de l'orientation des cernes semble nécessaire dans des études postérieures. Cependant, l'utilisation des empilements symétriques montrent une influence positive sur la variabilité de certains déplacements, c'est à dire les flèches et les torsions, localisés sur les faces h_1 et h_2 .
5. L'impact de l'orientation des lames vers l'intérieur ou l'extérieur des LCAs est un paramètre non-négligeable de conception qui mérite d'être étudié dans des études ultérieures.
6. L'utilisation des empilements QT pour des LCAs permet une diminution de la variabilité des écarts-types de déplacements. L'influence du nombre de plis est plus importante sur les faces d'aboutage I_1 et I_2 grâce à une diminution des épaisseurs des lames des faces extérieures tandis que l'influence des empilements QT est plus concentrée sur les faces d'empilement h_1 et h_2 . Toutefois, l'utilisation de lames de classes de comportements hétérogènes en termes d'orientation de cernes induit, de la même manière que pour les LCAs à 3 plis, une variabilité du comportement en déplacements des faces symétriques et une augmentation des valeurs des moyennes et écarts-types des tuilages.
7. L'ordre des empilements est un paramètre important de la stabilité dimensionnelle des LCAs et particulièrement le choix des classes de comportement des lames extérieures. L'utilisation de classes de comportement fortement hétérogène en termes d'orientation de cernes sur les faces extérieures induit une augmentation de la variabilité des déplacements des faces symétriques pour les tuilages et les torsions.

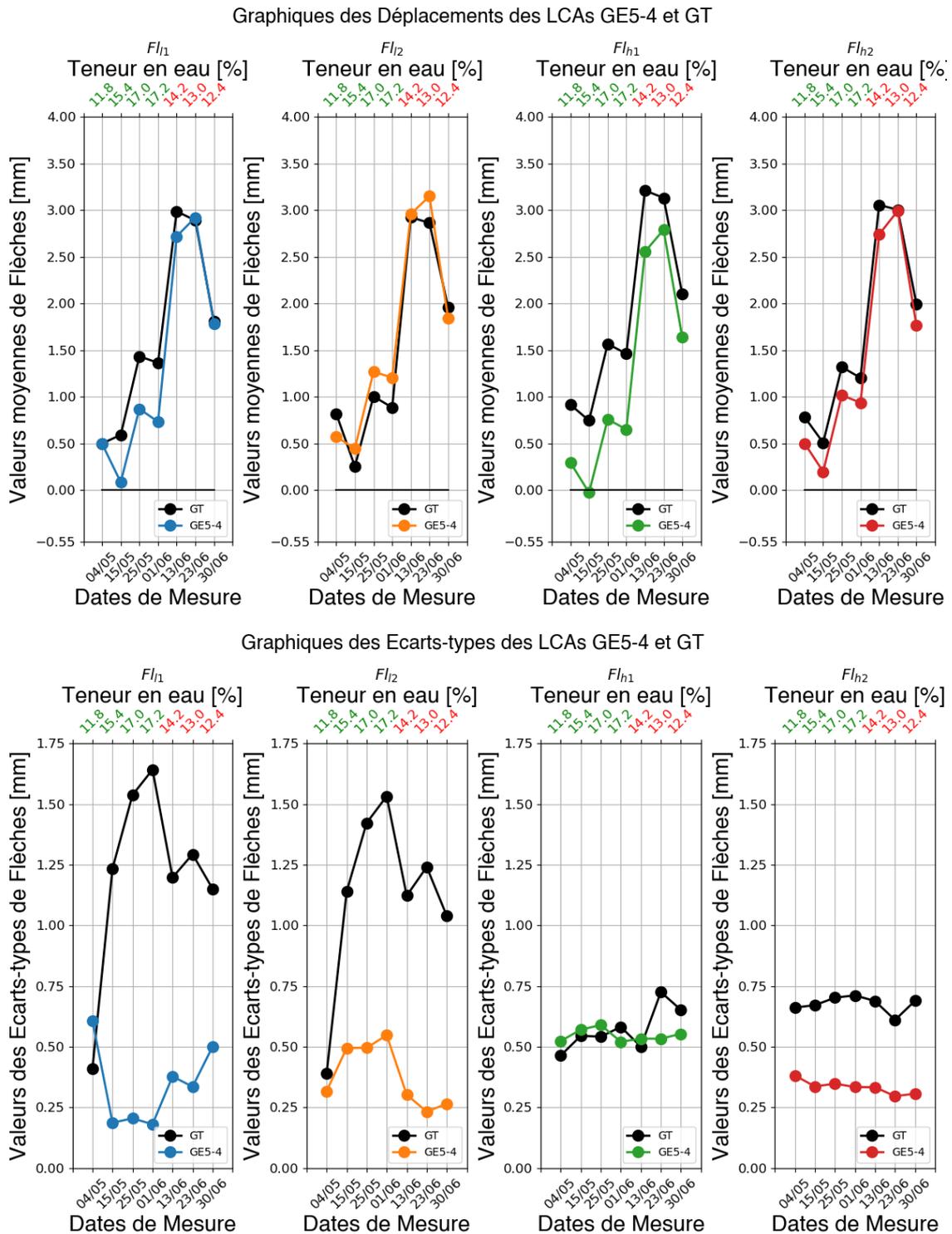


FIGURE 4.31 – Résultats des flèches de déplacements Fl_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-4 qui correspond à une configuration D/FD/Q/FD/D et comparaison avec le groupe GT des LCAs de l'entreprise GB.

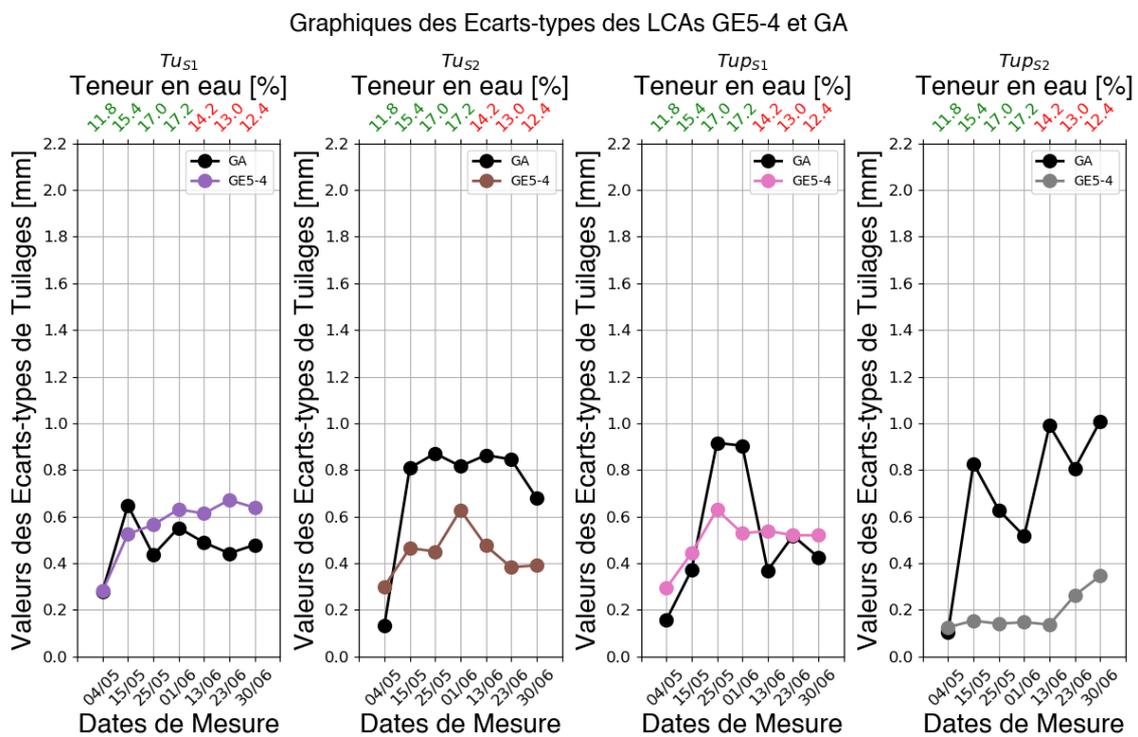
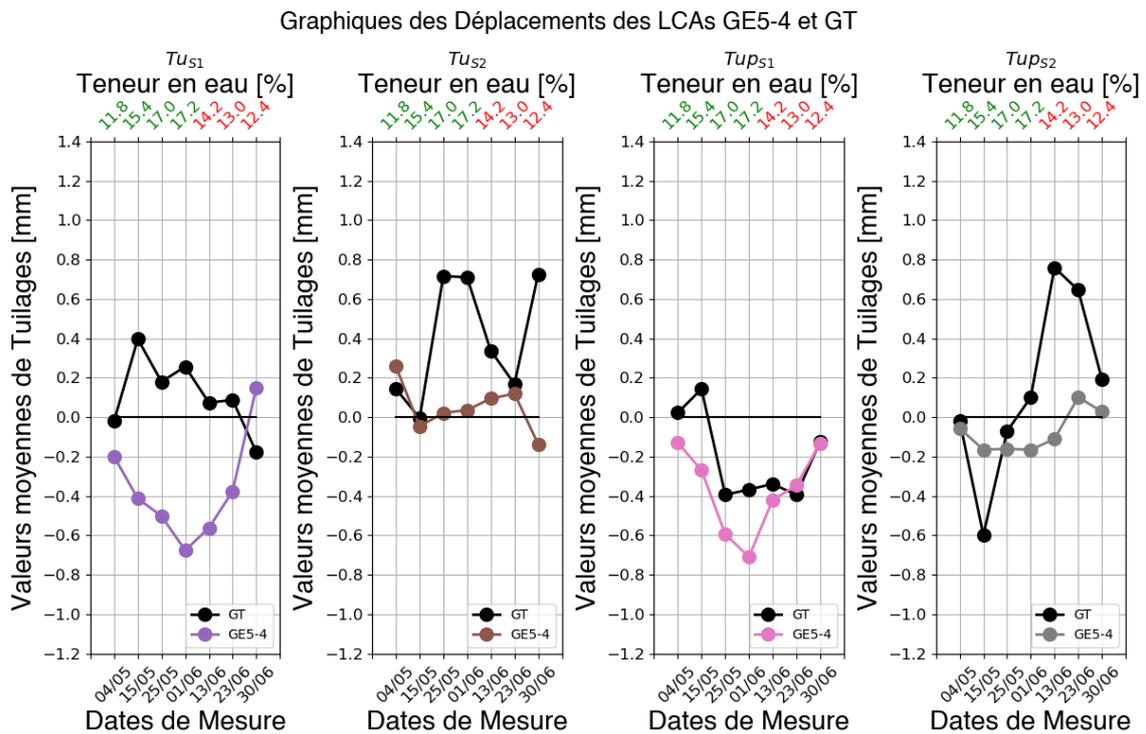


FIGURE 4.32 – Résultats des déplacements de tuilages Tu_i et Tup_i respectivement selon les directions Z et Y des faces S_1, S_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-4 qui correspond à une configuration D/FD/Q/FD/D et comparaison avec le groupe GT des LCAs de l'entreprise GB.

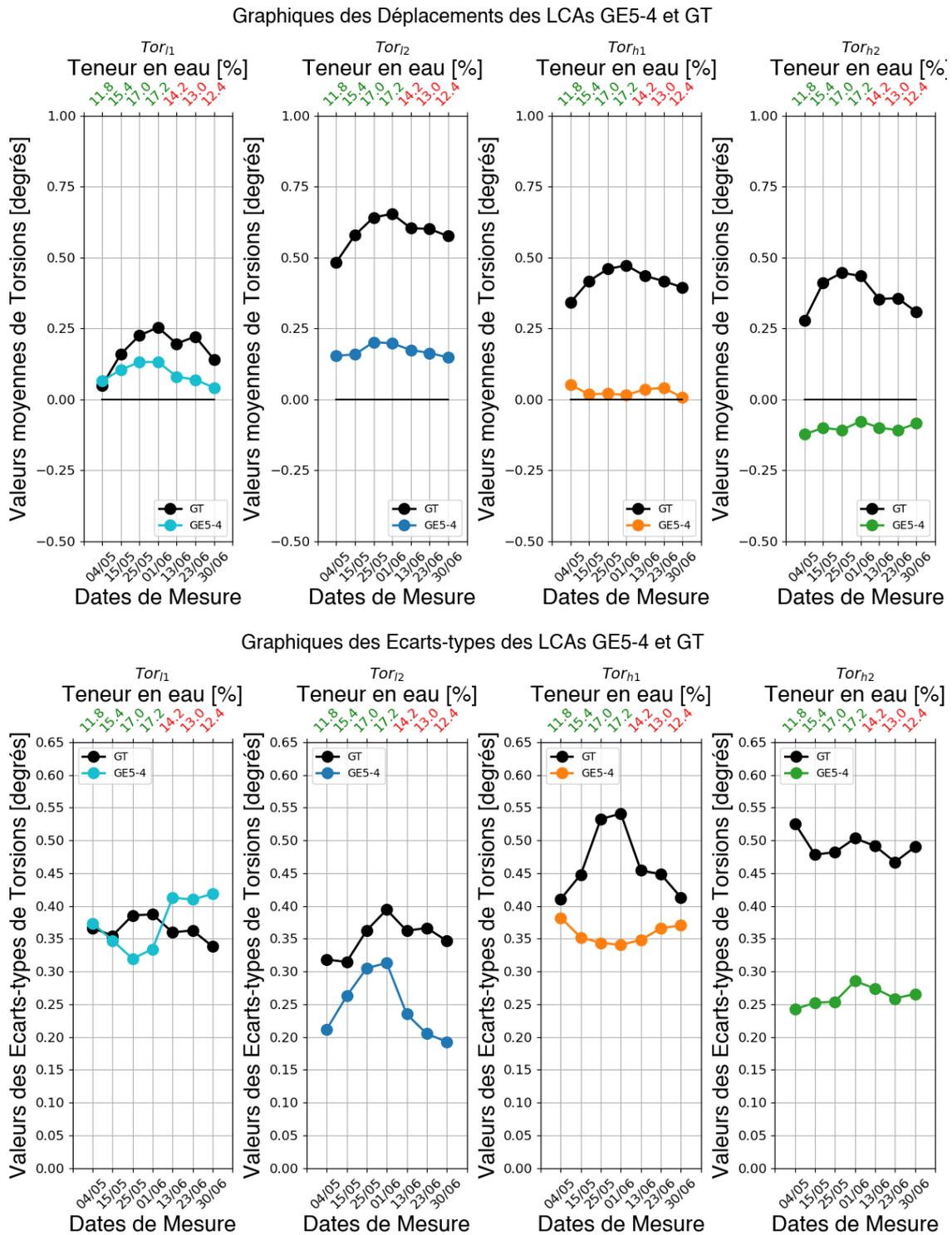


FIGURE 4.33 – Résultats de déplacements de torsion Tor_i des faces h_1, h_2, l_1, l_2 sous la forme de moyenne et d'écart-type pour le groupe de LCAs GE5-4 qui correspond à une configuration D/FD/Q/FD/D et comparaison avec le groupe GT des LCAs de l'entreprise GB.

Finalement, dans le cas des configurations à 3 plis étudiées, le groupe GA permet la plus grande amélioration de stabilité dimensionnelle notamment au niveau des moyennes et écarts-types des déplacements de flèches et de tuilages en comparaison des LCAs du groupe GB et représente une évolution de production industrielle viable.

Dans le cas des configurations à 5 plis étudiées, le groupe GE5-4 : D/FD/Q/FD/D permet la plus grande amélioration de la stabilité dimensionnelle pour les écarts-types de tous les déplacements ainsi que les moyennes des déplacements de torsions et valeurs finales moyennes de tuilages en comparaison des LCAs du groupe GA notamment au niveau des variabilités des déplacements et des moyennes de déplacements de torsion. Toutefois, l'impact positif sur les moyennes de déplacements des flèches et des tuilages reste incertain et une comparaison avec un nombre plus importants de LCAs notamment pour la configuration GE5-4 semble obligatoire pour des études ultérieures.

Conclusion générale et perspectives

Ce manuscrit traite de la stabilité dimensionnelle de carrelots de menuiseries en LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) soumis à des variations climatiques post-production. Le travail de thèse a permis la modélisation du comportement hygro-élastique de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) et également de la conception de LCAs dont la stabilité dimensionnelle a été améliorée en comparaison des LCAs produits chez l'entreprise GB.

Dans le premier chapitre, un état de l'art du *Pinus pinaster* (Ait.) utilisée par l'entreprise GB est réalisé en présentant la taxonomie, l'histoire des populations et une liste exhaustive des propriétés physiologiques, géométriques, physiques, hygriques et mécaniques de cette essence. Ce premier chapitre a permis de rassembler et de classer les propriétés nécessaires au développement d'un premier modèle multi-échelles de comportement du *Pinus pinaster* (Ait.) qui prend également compte de la variabilité des propriétés. Le travail permet également de mettre en évidence l'insuffisance des informations sur l'évolution des propriétés géométriques, physiques, mécaniques et hygriques de *Pinus pinaster* (Ait.) en fonction des propriétés physiologiques et de la position intra-arbre qui limite la complexité des modélisations.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation des propriétés de lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.) qui sont nécessaires à la prédiction du comportement de LCAs. Une stratégie de modélisation multi-échelles est appliquée qui permet de décomposer le problème en multiples échelles de travail de l'échelle microscopique des phases de IW et FW des cernes de bois à l'échelle des lamelles de *Pinus pinaster* (Ait.). Premièrement, les propriétés géométriques et physiques à l'échelle microscopique sont extraites de la littérature scientifique et permettent la modélisation paramétrique de grumes « synthétiques » en *Pinus pinaster* (Ait.). Ensuite, les propriétés de volumes équivalents homogènes de *Pinus pinaster* (Ait.) sont obtenues à l'échelle mésoscopique grâce à des méthodes d'homogénéisations numériques basées sur l'équivalence de l'énergie de déformation des milieux périodiques couplée et sur une loi des mélanges. Les volumes hétérogènes de *Pinus pinaster* (Ait.) sont générés en fonction de leur position relative dans les grumes grâce à un script paramétrique codé dans l'environnement Python[®]. Les modèles EF de ces volumes ont ensuite été créés dans le code EF commercial Ansys[®]. Le modèle prend également en compte la variabilité des propriétés en fonction de la distance depuis la moelle en employant la méthode de Monte-Carlo. Enfin, les propriétés des lamelles à l'échelle macroscopique sont obtenues par le développement d'un métamodèle via l'utilisation des entités NURBS. Ces entités permettent d'interpoler et d'approximer la base de données discrètes des propriétés des volumes équivalents homogènes de *Pinus pinaster* (Ait.) pour obtenir une évolution continue des propriétés dans le plan transversal des lamelles en fonction de leur position relative dans la grume. Ce chapitre de la thèse a permis d'aborder un sujet peu fréquent dans la communauté scientifique traitant le bois comme matériaux de structure : la modélisation du comportement hygro-mécanique. La mise en place d'une telle étude nécessite la connaissance des propriétés anisotropes et variables spatialement des lamelles en fonction de leur position relative dans les grumes en prenant en compte la variabilité de leur comportement associé à l'utilisation d'un matériau naturel comme le bois. Le Chapitre 2 a permis d'obtenir les propriétés des lamelles en fonction de leur position relative dans le plan transversal de grumes et notamment en fonction de la distance depuis la moelle.

Dans le troisième chapitre, le travail de thèse aborde la notion de stabilité dimensionnelle des LCAs soumis à des variations climatiques. Le chapitre se concentre sur la conception d'empilements de LCAs thermo-hygro-mécaniquement stables pour améliorer la stabilité dimensionnelle

des LCAs du groupe GB. La notion d'empilement QT est introduite en même temps que les paramètres d'orientations de cernes, de nombre de plis et d'aboutage qui permettent de concevoir plusieurs configurations d'empilement dont la stabilité dimensionnelle est testée. Chaque configuration est composée de plusieurs LCAs, permettant d'évaluer la variabilité de leur comportement. Les configurations sont réparties en groupes et sont réparties en fonction des paramètres de conception. La stabilité dimensionnelle est testée via la modification des environnements climatiques des LCAs. La mesure expérimentale de la stabilité dimensionnelle des LCAs est réalisée à partir de la mesure des déplacements relatifs de points repères sur les surfaces extérieures des LCAs. L'acquisition et le traitement des images sont réalisées grâce à la suite de logiciel Vic-Snap, Vic-2D et Vic-3D du groupe Correlated solutions. Le calcul des déplacements est réalisé grâce au logiciel MATLAB®.

Le dernier chapitre présente finalement les résultats des mesures des déplacements des LCAs et la comparaison entre les différents groupes de configurations. Les comparaisons permettent d'évaluer l'influence des différents paramètres de conception sur la stabilité dimensionnelle des LCAs. De plus, les comparaisons avec le groupe de LCAs de l'entreprise GB permettent de mettre en évidence l'amélioration de la stabilité dimensionnelle grâce à certaines configurations de LCAs.

Le verrou scientifique de la thèse consiste en la conception de LCAs dont la stabilité dimensionnelle est assurée et est traité dans les troisième et quatrième chapitres. La conception doit permettre d'obtenir des configurations de LCAs qui améliorent la stabilité dimensionnelle des LCAs du groupe GB qui sont compatibles avec les contraintes appliquées par la chaîne de production sur les typologies de lamelles. Certains paramètres d'influence de la conception de LCAs ont été identifiés comme l'aboutage des lamelles, l'orientation des cernes, le nombre de plis et les séquences d'empilement. En particulier, la conception de séquences d'empilements équilibrées et symétriques ainsi que de séquences d'empilements qui reposent sur les travaux réalisés sur les empilements QT ont permis de proposer des configurations de LCAs théoriquement thermo-hygro-mécaniquement stables. L'influence de l'utilisation de lames aboutées par des lamelles de même classe de comportement, de classes de comportement de lamelles plus homogène en termes d'orientation de cernes et des empilements QT a ainsi été montrée. Finalement, deux conceptions ont été identifiées qui permettent une amélioration de la stabilité dimensionnelle en comparaison des LCAs du groupe GB.

Le travail de thèse permet plusieurs avantages et améliorations dans la modélisation et la conception de produits en *Pinus pinaster* (Ait.), et plus généralement dans le domaine du bois. Premièrement, le travail d'état de l'art et la modélisation multi-échelles ont permis d'approximer les propriétés d'hygro-expansion et élastiques de cette essence en fonction de la position relative dans les grumes et en particulier selon la distance depuis la moelle, ce qui représente une nouveauté pour le *Pinus pinaster* (Ait.). Ces modélisations et leurs résultats peuvent être utilisés pour des développements de modèles et/ou des simulations de structures en *Pinus pinaster* (Ait.) et permettent de se détacher de l'utilisation d'hypothèses fortes sur la variabilité des propriétés de cette essence ou des modèles généraux du comportement des résineux. De plus, l'utilisation de méthodes d'homogénéisation numérique et de métamodèle représente une innovation majeure dans le domaine du bois pour le développement de modèle et l'identification des propriétés d'essence de bois. En effet, l'utilisation de ces outils permet d'obtenir numériquement un nombre important d'informations sur les propriétés de structures en bois et leurs évolutions dans les grumes à partir de bases de données issues de campagnes expérimentales succinctes ou d'informations issues de la littérature scientifique. Deuxièmement, le travail de thèse a permis de tester l'emploi de la méthode de CIN pour la mesure des déplacements de LCAs soumis à des variations climatiques. La méthode CIN est classiquement utilisée dans le domaine du bois pour l'évaluation des propriétés de rupture. La CIN a permis de mesurer les champs de déplacements de toutes les

faces extérieures d'un nombre important de LCAs sur une durée d'expérience relativement longue (57 jours). En addition, la conception d'empilements LCAs et les configurations proposées dans ce travail de thèse représente une innovation majeure dans le domaine de la stabilité dimensionnelle de carrelets de menuiseries aux variations climatiques. Ce travail de thèse a permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres de conception, et en particulier l'augmentation du nombre de plis, la répartition des lamelles selon leur orientation de cernes, l'aboutage de lames par des lamelles de même classe de comportement et l'utilisation d'empilements QT, sur la stabilité dimensionnelle des LCAs. En particulier, le travail de thèse a permis de proposer deux innovations dans la conception des LCAs du groupe GB en *Pinus pinaster* (Ait.). D'une part, la conception de LCAs 3 plis à empilements aléatoires avec des lames aboutées par des lamelles de même classe de comportement représente déjà une amélioration notable de la stabilité des produits LCAs qui peut être introduite commodément dans la chaîne de production de l'entreprise GB. D'autre part, la conception de LCAs de même dimension à 5 plis GE5-4 : D/FD/Q/FD/D adaptée depuis une configuration d'empilement QT et respectant la condition d'aboutage précédente représente la configuration avec la plus grande stabilité dimensionnelle par rapport aux LCAs du groupe GB.

L'objectif final de ce travail de thèse consiste à jeter les bases nécessaires au développement d'un modèle numérique fidèle et robuste du comportement hygro-mécanique de LCAs en *Pinus pinaster* (Ait.) soumis à des variations climatiques. Un modèle haute-fidélité alimenté par des mesures expérimentales précises de stabilité dimensionnelle permettra de réaliser une optimisation des séquences d'empilement et des séquences d'aboutage pour obtenir des configurations de LCAs de meilleure stabilité avec un intérêt industriel amélioré.

A cette fin, plusieurs limitations découlent du travail de thèse. Premièrement, un manque d'informations sur les propriétés hygriques et mécaniques du *Pinus pinaster* (Ait.) est présent. La méconnaissance des propriétés physiologiques, géométriques et physiques de cette essence ainsi que de leur influence sur les propriétés hygriques et mécaniques freinent le développement d'un modèle haute-fidélité. Deuxièmement, la modélisation de l'évolution des propriétés des lamelles en fonction de leur position dans les grumes ne dépend que de la distance depuis la moelle et ne prend pas en compte la dépendance à la direction circonférentielle des cernes ou de la direction longitudinale. Ainsi, l'influence de l'évolution des propriétés selon la direction longitudinale des arbres, du plan de sciage, de l'orientation des cernes, de l'angle conique ou de l'angle de fil n'est pas prise en considération et diminue la fidélité du modèle. Ensuite, la conception des LCAs thermo-hygro-mécaniquement stables réalisée dans ce travail de thèse est dépendante des travaux sur les empilements QT qui ne prennent pas en considération l'effet de l'architecture 3D de bois. De plus, un élargissement de la liste des paramètres de conception semble nécessaire pour prendre en considération l'orientation des lamelles dans les empilements et l'effet de l'angle de fil dans les lamelles. Enfin, une amélioration de la répartition des lamelles en classes de comportement en fonction de l'orientation des cernes semble obligatoire pour obtenir des classes de comportement plus homogène pour permettre une diminution de la variabilité de leur comportement et une plus grande flexibilité de conception.

Plusieurs perspectives pour continuer le travail de cette thèse peuvent être envisagées. Dans un premier temps, un modèle de couplage hygro-mécanique du bois doit être appliqué aux structures LCAs et intégré dans le modèle de comportement développé au cours du travail de thèse. De nombreux modèles existent pour décrire le comportement hygro-mécanique du bois qui peuvent être utilisés pour l'estimation de la stabilité dimensionnelle de LCAs. Tauchert et Hsu [264] et Clouet [29] ont utilisé un modèle hygro-élastique découplé pour prédire les contraintes dans des produits en bois lors de variations hygriques. Ormarsson *et al.* [169] et Salin [265] ont employé un modèle hygro-élastique couplé pour prendre en compte les déformations mécanosorptives lors du séchage de produits en bois. Mårtensson et Svensson [266] ont appliqué un modèle hygro-

viscoélastique qui considère le fluage mécanosorptif comme indépendant du fluage visco-élastique tandis que Hanhijärvi et Hunt [267] montrent la possibilité de considérer les deux fluages comme combinés. Husson *et al.* [268] et Dubois *et al.* [269] utilisent un nouvel élément rhéologique « hygro-lock » pour prendre en compte la partie réversible des déformations mécanosorptives en fonction de l'historique des variations hygriques. Enfin, Fortino *et al.* [270] utilisent un modèle hygro-viscoélastique qui prend en compte les parties réversible et irréversible des déformations mécanosorptives pour l'étude de structures en bois. Le modèle envisagé pour la suite du travail de thèse est un modèle hygro-élastique couplé codé grâce à une subroutine matériau dans l'environnement de programmation Fortran[®] et réalisé dans le code EF Ansys[®]. Les propriétés continues des lamelles constitutives des LCAs sont issues des résultats de modélisation numérique des lamelles à l'échelle macroscopique et sont discrétisées sur la géométrie des LCAs.

Dans un second temps, un approfondissement des travaux d'analyses modales et harmoniques de produits en *Pinus pinaster* (Ait.) (présenté en Annexe A) peut être envisagé en parallèle d'un développement d'un modèle numérique. Les résultats des analyses expérimentales peuvent être couplés à un modèle haute-fidélité et une analyse de sensibilité des réponses modales et harmoniques en fonction des propriétés élastiques et visco-élastiques pour le développement d'une méthode inverse. Cette méthode inverse permet, à partir des résultats expérimentaux obtenus à l'aide d'une méthode non-destructive, de déterminer les propriétés élastiques et visco-élastiques d'échantillons de *Pinus pinaster* (Ait.). Enfin, l'identification de ces propriétés couplée à une campagne expérimentale permettent d'évaluer leur évolution dans les grumes de bois et d'atteindre une meilleure compréhension des propriétés élastiques mais également visco-élastiques (non-considérées dans ce travail de thèse) qui sont fondamentales dans le domaine du bois.

In fine, ce travail de thèse a permis d'étudier en détail la modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique et la conception de produits composites lamellés collés aboutés dimensionnellement stable en *Pinus pinaster* (Ait.) soumis à des variations climatiques. Il a été réalisé dans l'optique de concevoir des nouvelles configurations de LCAs, notamment en fonction de l'empilement et de l'aboutage, par rapport à la complexité des paramètres de conception issus de l'utilisation d'un matériau naturel, hétérogène et anisotrope avec une architecture 3D. Ce modèle sera ensuite intégré à une démarche systématique de conception des LCAs afin de trouver de meilleures solutions de conception capables de prendre également en compte d'autres contraintes physiques et technologiques.

Présentation des essais d'analyses modales et harmoniques expérimentales de plaques minces de *Pinus pinaster* (Ait.)

Cette annexe présente la stratégie de mesures et les premiers résultats d'analyses expérimentales modales et harmoniques de fines plaques de bois en *Pinus pinaster* (Ait.) qui ont été réalisés lors de l'encadrement d'un stage de Master 1 durant l'été 2022. Le nombre d'éprouvettes est de deux avec deux typologies différentes : une dosse et un quartier. Les deux plaques fines en *Pinus pinaster* (Ait.) qui sont testées dans cette étude sont présentées en Fig. A.1.



FIGURE A.1 – Photographie des deux surfaces de mesures des deux plaques, c'est-à-dire a) la Dosse et b) le Quartier.

La géométrie des éprouvettes dans le repère global cartésien défini au centre de la grume est présentée sur la Fig. A.2 avec $d_1 = 200$ mm, $d_2 = 4$ mm et $d_3 = 100$ mm dans le cas de la dosse et $d_1 = 200$ mm, $d_2 = 100$ mm et $d_3 = 4$ mm dans le cas de la grume, avec d_1 , d_2 et d_3 la longueur des côtés des échantillons respectivement le long des axes X_1 , X_2 et X_3 . La position relative de ces plaques, et spécialement la distance depuis la moelle r , dans la grume n'est pas connue.

Les expériences reposent sur l'utilisation d'un vibromètre laser qui permet des mesures sans contact non-destructives de vibration de la face extérieure des plaques. Cet outil permet la détermination du champ de vitesses tri-dimensionnelle de points sur une surface d'une structure soumise

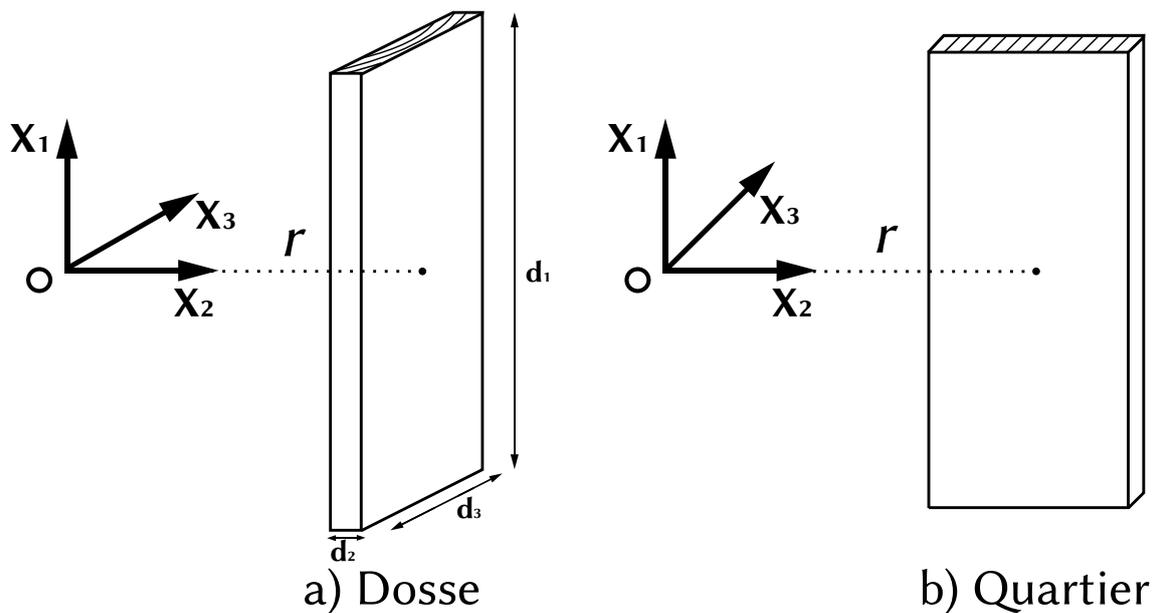


FIGURE A.2 – Présentation de la géométrie des deux plaques minces en *Pinus pinaster* (Ait.) avec une typologie de a) dosse et de b) quartier qui sont utilisées comme pour les analyses modales et harmoniques expérimentales.

à une excitation en vibration. Le vibromètre laser utilisé pour cette étude est le Polytec PSV-500 3D¹ et repose sur le principe d'interférométrie de Mach-Zehnder permettant de mesurer l'effet Doppler entre le signal émis et réfléchi afin de calculer la phase et la fréquence de la vibration. L'excitation vibratoire est réalisée grâce à un exciteur électrodynamique placé au coin inférieur droit des plaques (1 cm des bords) qui permet une excitation sur un intervalle de fréquence de [100, 10000] Hz.

Comme cette étude représente une première approche de l'utilisation de vibromètre laser dans l'analyse vibratoire de fines plaques de bois, le système de fixation est primitif. En effet, les plaques de bois sont percées puis suspendues grâce à deux fils de cuivres rattachés à une ficelle en jute. Ainsi, pour une excitation en fréquence faible, comme dans cette étude, les modes et fréquences propres associés au système de fixation influencent les analyses modales et harmoniques de la structure. L'installation expérimentale est présentée en Fig. A.3.

Une calibration du système de têtes du vibromètre laser est ensuite réalisée. Cette calibration nécessite l'alignement du laser de mesures de chacune des têtes sur des points situés sur l'objet de mesure, ici la plaque trouée, et également sur un objet de référence situé en arrière-plan. En définitive, la calibration permet l'alignement 3D des têtes du vibromètre laser selon le même repère cartésien défini sur l'objet de mesures. Enfin, un maillage est réalisé via le logiciel d'acquisition du vibromètre laser qui permet la discrétisation spatiale de la surface des plaques minces continue en points de mesures. Le maillage de chacune des plaques est présentée en Fig. A.4 et consiste en un maillage par quadrilatères irréguliers de 9×17 points de mesures.

Pour chacune des deux plaques minces, les vitesses de déplacements (parties réelle et imaginaire) de chaque point du maillage pour chaque pas de fréquence ont été exportées dans un fichier au format UNV (Universal File Format). Par la suite, un code Matlab[®] a été mis en place pour permettre le traitement des fichiers de résultats et de reconstituer les spectres fréquentiels et les modes propres de vibration de chacune des plaques.

1. <https://www.polytec.com/fr>

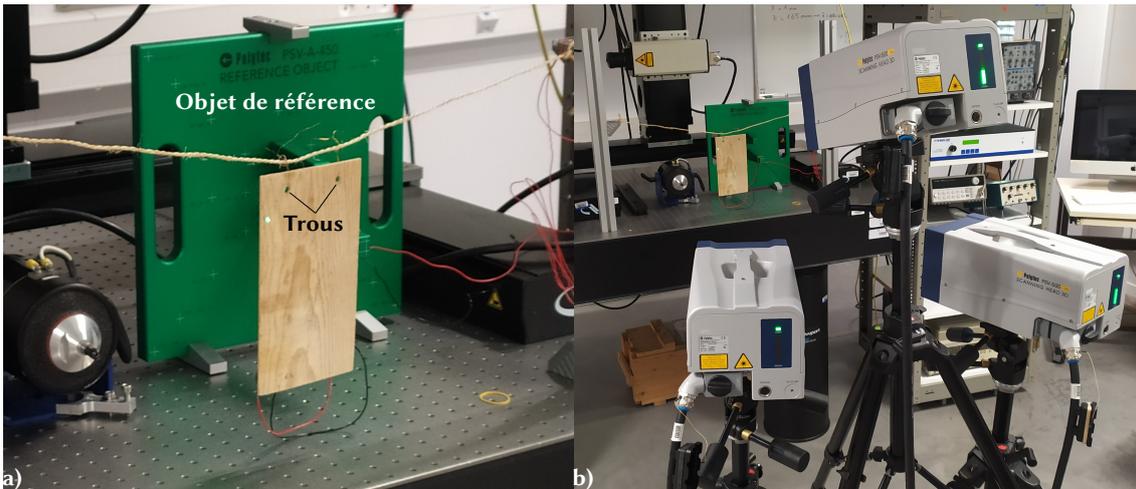


FIGURE A.3 – Présentation de l’installation expérimentale pour l’analyse vibratoire de a) fines plaques trouées de *Pinus pinaster* (*Ait.*) par l’utilisation d’un b) vibromètre laser.

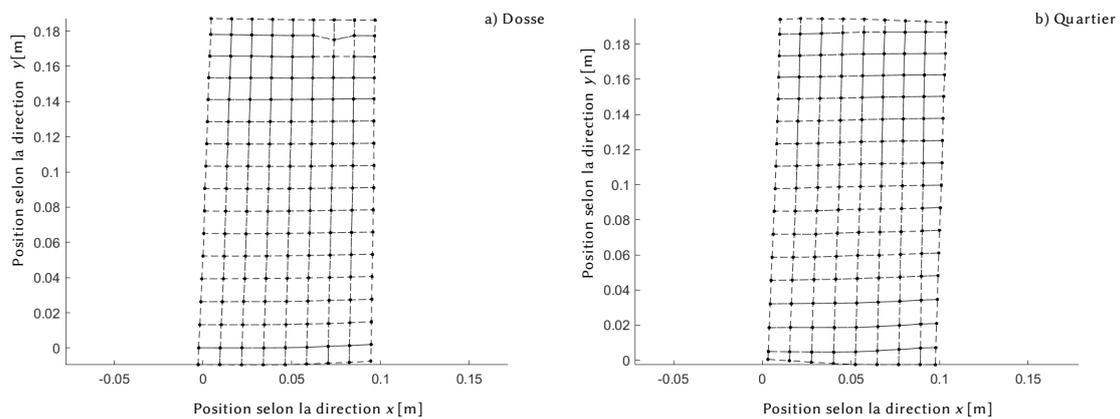


FIGURE A.4 – Illustration du maillage de chacune des plaques, a) Dosse et b) Quartier, et position relative des points de mesures dans le système de coordonnées cartésien défini selon les objets de mesures.

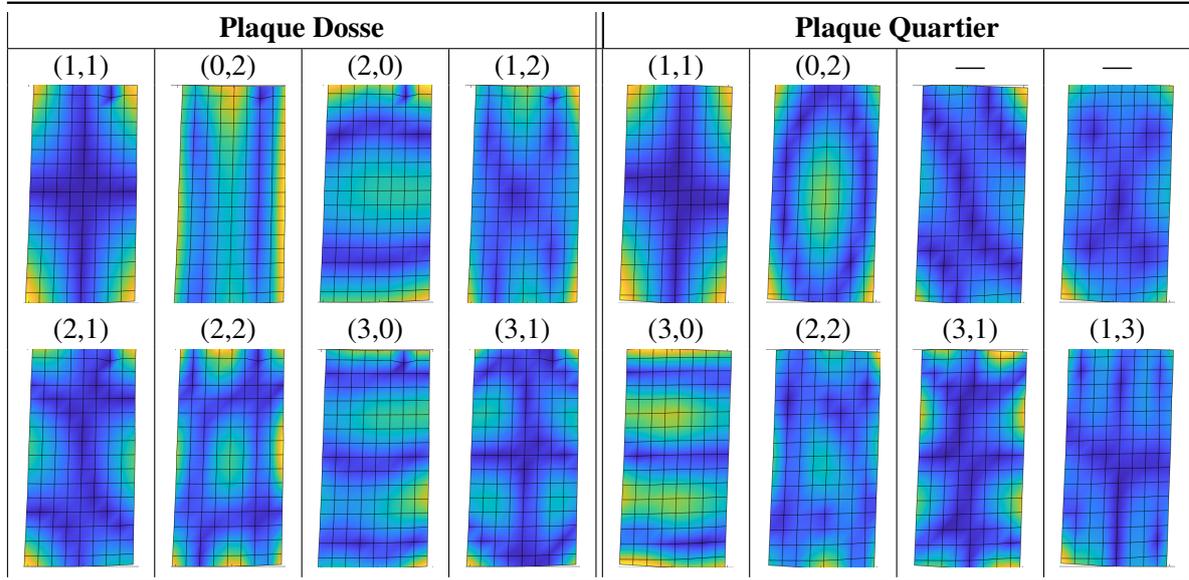
Les allures des 8 premiers modes propres de chacune des plaques sont présentées dans le Tab. A.1. Il est possible de noter que la grande majorité des modes propres de ces plaques sont identifiables en fonction des modes propres caractéristiques des plaques rectangulaires.

De plus, les spectres fréquentiels des plaques sont présentés en Fig. A.5. Un grand nombre de pics existent dans les spectres fréquentiels avec des amortissements variables qui entraînent une superposition importante des pics. Cette superposition et les valeurs élevées des amortissements rendent les identifications des modes propres et de leur fréquence propre associée difficile.

Les travaux sur l’analyse vibratoire par vibromètre laser sur le *Pinus pinaster* (*Ait.*) ont permis d’obtenir les modes propres, les fréquences propres et les spectres fréquentiels de fines plaques de *Pinus pinaster* (*Ait.*) pour deux orientations de cernes différentes.

Ces résultats peuvent être utilisés en parallèle du développement d’un modèle numérique d’analyses modal et harmonique de plaques minces de *Pinus pinaster* (*Ait.*). Ce modèle pourra permettre l’utilisation de méthodes d’analyse de sensibilité des fréquences et formes des modes propres en fonction des propriétés élastiques de cette essence. Enfin, une méthode inverse pourra être appliquée pour obtenir, à partir des résultats expérimentaux d’analyse vibratoire, les propriétés élastiques de fines plaques de *Pinus pinaster* (*Ait.*). Une méthode similaire d’identification de

TABLE A.1 – Présentation des allures des 8 premiers modes propres de chacune des plaques avec le nombre de demi-ondes (si identifiable) dans les directions x et y correspondantes, respectivement m et n , dans le repère associé aux plaques [271].



propriétés élastiques d'une autre essence de bois a déjà été utilisée dans les travaux de Longo *et al.* [272].

La connaissance de la position relative dans les grumes de ces plaques fines, et en particulier la distance depuis la moelle, pourra permettre de modéliser l'évolution des propriétés du *Pinus pinaster* (*Ait.*) en fonction de la distance depuis la moelle et de comparer ces résultats avec le modèle développé dans le Chapitre 2.

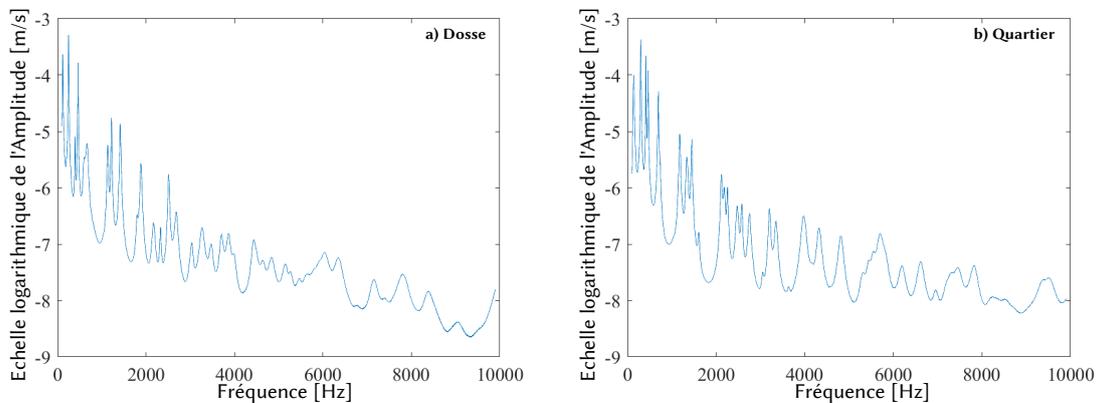


FIGURE A.5 – Spectres fréquentiels des deux plaques (a) Dosse et b) Quartier) pour des fréquences dans l'intervalle [100, 10000] Hz.

Bibliographie

- [1] A. E. KRAUKLIS, C. W. KARL, A. I. GAGANI et J. K. JØRGENSEN : Composite Material Recycling Technology – State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. *Journal of Composites Science*, 5(28), 2021.
- [2] X. ZHANG, Y. CHEN et J. HU : Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, 97:22–34, 2018.
- [3] M. DOLZ, X. MARTINEZ, D. SÁ, J. SILVA et A. JURADO : Composite materials, technologies and manufacturing : current scenario of european union shipyards. *Ships and Offshore Structures*, pages 1–16, 2023.
- [4] E. MANGINO, J. CARRUTHERS et G. PITARRESI : The future use of structural composite materials in the automotive industry. *Int. J. Vehicle Design*, 44(3-4):211–232, 2007.
- [5] Y. KATOH et L. L. SNEAD : Silicon carbide and its composites for nuclear applications - Historical overview. *Journal of Nuclear Materials*, 526(151849), 2019.
- [6] P. BRØNDSTED, H. LILHOLT et A. LYSTRUP : Composite materials for wind power turbine blades. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 35:505–538, 2005.
- [7] G. CHEN, Y. SU, D. JIANG, L. PAN et S. LI : An experimental and numerical investigation on a paraffin wax/graphene oxide/carbon nanotubes composite material for solar thermal storage applications. *Applied Energy*, 264(114786), 2020.
- [8] M. K. EGBO : A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33:227–568, 2021.
- [9] V. MONFARED, S. RAMAKRISHNA, A. ALIZADEH et M. HEKMATIFAR : A systematic study on composite materials in civil engineering. *Ain Shams Engineering Journal*, 102251, 2023.
- [10] M. R. AHMAD, B. CHEN, S. Y. ODERJI et M. MOHSAN : Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement. *Energy and Buildings*, 173:719–733, 2018.
- [11] M. H. RAMAGE, H. BURRIDGE, M. BUSSE-WICHER, G. FEREDAY, T. REYNOLDS, D. U. SHAH, G. WU, L. YU, P. FLEMING, D. DENSLEY-TINGLEY, J. ALLWOOD, P. DUPREE, P. F. LINDEN et O. SCHERMAN : The wood from the trees : The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(Part1):333–359, 2017.
- [12] L. O. ERIKSSON, L. GUSTAVSSON, R. HÄNNINEN, M. KALLIO, H. LYHYKÄINEN, K. PINGOUD, J. POHJOLA, R. SATHRE, J. SVANAES et L. VALSTA : Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector—towards an integrated modelling framework. *European Journal of Wood and Wood Products*, 131(1):131–144, 2011.
- [13] IPCC 2018 : Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte V. and Zhai, P. and Pörtner, H.O. and Roberts, D. and Skea, J. and Shukla, P.R. and Pirani, A. and Moufouma-Okia, W. and Péan, C. Pidcock, R. and Connors, S. and Matthews, J.B.R. and Chen, Y. and Zhou, X. and Gomis, M.I. and Lonnoy, E. and Maycock, T. and Tignor, M. and Waterfield, T. (eds.)]. , Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2018.

- [14] C. HILL et K. ZIMMER : The environmental impacts of wood compared to other building materials. Rapport technique 4/56/2018, Norwegian Institute for Bioeconomy Research, Norwegian Ministry of Agriculture and Food, Norway, 2018. ISBN : 978-82-17-02090-5.
- [15] IPCC : Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Shukla, P. R. and Skea, J. and Slade, R. and Al Khourdajie, A. and van Diemen, R. and McCollum, D. and Pathak, M. and Some, S. and Vyas, P. and Fradera, R. and Belkacemi, M. and Hasija, A. and Lisboa, S. and Luz, S. and Malley, J. (eds.)]. , Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- [16] MANUEL DU BOIS LAMELLÉ : Version française adaptée du Glulam Handbook. [Millereux, D. and Bosch, O. and Quineau, C. and Leloy, C. (vol.1) and Lemagorou, L. (vol.2) and Sauvignat, E. (vol. 3)]. , Codifab, Swedish Wood, Syndicat National du Bois Lamellé, Acrebois, 2018.
- [17] AGRESTE : La récolte forestière et l'activité des scieries en 2018. Enquêtes annuelles de branche « Exploitation forestière » et « Sciage, rabotage, ponçage et imprégnation du bois » 2018. Rapport technique 47, Agreste Nouvelle-Aquitaine, DRAAF, 2019.
- [18] F. SANZ, S. LATOUR, M. NEVES, E. BASTET, D. PISCHEDDA, G. PIÑEIRO, T. GAUTHIER, J. LESBATS, C. PLANTIER, A. MARQUES, J.-D. LANVIN, J.A. SANTOS, M. TOUZA, F. PEDRAS, J. PARROT, D. REULING et C. FARIA : *Industrial applications of Pinus Pinaster*. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e o Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia (CIS Madeira), Fédération des Industries du Bois d'Aquitaine (FIBA), Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário de Portugal (AIMMP), Centre Technique du Bois et de l'Ameublement of France (CTBA), 2020.
- [19] S. ORMARSSON et D. J. COWN : Moisture-related distortion of timber boards of radiata pine : Comparison with Norway spruce. *Wood and Fiber Science*, 37(3):424–436, 2005.
- [20] S. FLORISSON, S. ORMARSSON et J. Y. VESSBY : A numerical study of the effect of green-state moisture content on stress development in timber boards during drying. *Wood and Fiber Science*, 51(1):41–57, 2019.
- [21] V. ANGST : *Moisture induced stresses in glulam - effect of cross section geometry and screw reinforcement*. Thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [22] S. SVENSSON et T. TORATTI : Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. *Wood Science and Technology*, 36(2):145–156, 2002.
- [23] T. TORATTI et S. SVENSSON : Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. *Wood Science and Technology*, 34(2):317–326, 2000.
- [24] F. DUBOIS, J. DOPEUX, O. POP et M. METROPE : Long-term creep behavior of timber columns : Experimental and numerical protocols. *Engineering Structures*, 275, Part B(115283), 2023.
- [25] S. ORMARSSON, O. DAHLBLOM et H. PETERSSON : A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 3 : Influence of annual ring orientation. *Wood Science and Technology*, 34:207–219, 2000.
- [26] J. ERIKSSON, S. ORMARSSON et H. PETERSSON : An experimental study of shape stability in glued boards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 62(3):225–232, 2004.
- [27] J. ERIKSSON, S. ORMARSSON et H. PETERSSON : An experimental and numerical study of shape stability in laminated timber columns. *European Journal of Wood and Wood Products*, 63(6):423–429, 2005.
- [28] S. L. NGUYEN : *Modélisation hydromécanique du bois : Application au sapin blanc du Massif Central*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II, 2016. <http://www.theses.fr/2010BOR14200>.

- [29] B. CLOUET : *Comportement hydromécanique d'assemblages bois collés à l'état vert : approches expérimentale et numérique*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux, 2014. <http://www.theses.fr/2010BOR14200>.
- [30] D. GUITARD : *Mécanique du matériau bois et composites - préface de H. Polge*. Editions Cépaduès, 1987.
- [31] P. VANNUCCI et G. VERCHERY : A special class of uncoupled and quasi-homogeneous laminates. *Composites Science and Technology*, 61(10):1465–1473, 2001.
- [32] T. GARULLI, A. CATAPANO, M. MONTEMURRO, J. JUMEL et D. FANTERIA : Quasi-trivial stacking sequences for the design of thick laminates. *Composite Structures*, 200:614–623, 2018.
- [33] T. GARULLI, A. CATAPANO, J. FANTERIA, D. and Jumel et E. MARTIN : Design and finite element assessment of fully uncoupled multi-directional layups for delamination tests. *Journal of Composite Materials*, 54(6):773–790, 2019.
- [34] W. AITON, F. A. BAUER, J. SOWERBY, G. D. EHRET et G. NICOL : *Hortus Kewensis, or, A catalogue of the plants cultivated in the Royal Botanic Garden at Kew - Volume I*. Printed for George Nicol, Bookseller to his Majesty, 1789.
- [35] P. BARADAT : Pin Maritime. *Pinus pinaster* (Ait.). *Revue forestière française, AgroParisTech*, 38 (S):121–124, 1986.
- [36] L. DESOLE : Il *Pinus pinaster* Sol. in Sardegna. *Giornale botanico italiano*, 67(1-2):24–62, 1960.
- [37] C. ROMAO : Manuel d'interprétation des habitats de l'union européenne : version EUR 15. , Commission européenne, Direction Générale - Environnement, Sécurité Nucléaire et Protection Civile, Bruxelles, 1997.
- [38] C. M. BAETA NEVES : Noía sobre a fasciação do pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Sol. ex Ait) na Ilha da Madeira. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, pages 103–108, 1953.
- [39] INPN - Inventaire National du Patrimoine Naturel. https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/113689. Consulté le : 27/08/2023.
- [40] I. FIGUEIRAL et A. M. S. BETTENCOURT : Middle/Late Bronze Age plant communities and their exploitation in the Cávado Basin (NW Portugal) as shown by charcoal analysis : The significance and co-occurrence of *Quercus* (deciduous) - *Fabaceae*. *Vegetation History and Archaeobotany*, 13 (4):219–232, 2004.
- [41] L. DA FONTE, A. RAMOS et J. TERESO : Ecological interpretation of a *Pinus pinaster* Aiton archaeological assemblage from the Sabor valley, Northeastern Portugal. *In Conference : IJUP 2015 - Long Term Ecological Research*, Baixo Sabor (LTER Baixo Sabor), 2015.
- [42] L. SAEBRA, F. SANTOS, F. C. VAZ, J. LEITE et J. P. TERESO : Crops behind closed walls : Fortified storage at Castelinho in the Late Iron Age of NW Iberia. *Journal of Archaeological Science*, 102200, 2020.
- [43] J. RUBIALES, I. GARCIA AMORENA, S. GARCÍA ÁLVAREZ et C. MORLA : Anthracological evidence suggests naturalness of *Pinus pinaster* in inland southwestern Iberia. *Plant Ecology*, 200 (2):115–160, 2009.
- [44] C. MORALES-MOLINO, J. POSTIGO-MIJARRA, C. MORLA et M. GARCÍA-ANTÓN : Long-term persistence of Mediterranean pine forests in the Duero Basin (central Spain) during the Holocene : The case of *Pinus pinaster* Aiton. *The Holocene*, 22(5):561–570, 2012.
- [45] E. KÄMPF BINELLI, H. L. GHOLZ et M. L. DURYEA : Chapter 4 : Plant Succession and Disturbances in the Urban Forest Ecosystem. *In Restoring the urban forest ecosystem*. University of Florida, institute of food and agricultural sciences edition., 2006.

- [46] J. A. LÓPEZ-SÁEZ, S. PÉREZ-DÍAZ, D. GALOP, F. ALBA-SÁNCHEZ et D. ABEL-SCHAAD : A Late Antique Vegetation History of the Western Mediterranean in Context. In *Environment and Society in the Long Late Antiquity*, pages 83–104. Brill, 2019.
- [47] C. MARTÍN-PUERTAS, B. L. VALERO-GARCÉS, A. BRAUER, M. PILAR MATA, A. DELGADO-HUERTAS et P. DULSKI : The Iberian–Roman Humid Period (2600–1600 cal yr BP) in the Zoñar Lake varve record (Andalucía, southern Spain). *Quaternary Research*, 71(2):108–120, 2009.
- [48] J. A. LÓPEZ-SÁEZ, L. LÓPEZ-MERINO, F. ALBA-SÁNCHEZ, S. PÉREZ-DÍAZ, D. ABEL-SCHAAD et J. CARRIÓON : Late Holocene ecological history of *Pinus pinaster* forests in the Sierra de Gredos of central Spain. *Plant Ecology*, 206(2):195–209, 2010.
- [49] A. CHEVALIER : Le Pin maritime des Landes. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 5ème année(48):604–614, 1925.
- [50] J. MOREAU : *Impact de pratiques sylvicoles intensives sur les propriétés du bois de pin maritime*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2010. <http://www.theses.fr/2010BOR14200>.
- [51] R. J. LAYTON, R. H. ARDUIN, H. YAZDEEN, R. POMMIER et G. SONNEMANN : Material Flow Analysis to Evaluate Supply Chain Evolution and Management : An Example Focused on Maritime Pine in the Landes de Gascogne Forest. *Sustainability*, 13(8):4378, 2021.
- [52] J. J. HAVEL : The potential of the Northern swan coastal plain for *Pinus pinaster* Ait. plantations. *Perth : [Forests Dept. W.A.]*, 76:66–71, 1976.
- [53] G. B. SWEET et I. J. THULIN : Provenance of *Pinus pinaster* Ait. - A five-year progress report on a trial at woodhill, New-Zealand. *New Zeal. J.*, 8(4):570–586, 1962.
- [54] D. M. RICHARDSON, P. A. WILLIAMS et R. J. HOBBS : Pine Invasions in the Southern Hemisphere : Determinants of Spread and Invadability. *Journal of Biogeography*, 21(5):511–527, 1994.
- [55] A. FARJON : *A Handbook of the World's Conifers. Vol. 1 and 2*. E. J. Brill, Leiden and Boston, 2010. Données obtenues sur www.gbif.org/species/5285565 et consulté le : 28/08/2023.
- [56] CABI : Commonwealth Agricultural Bureau International. *Pinus pinaster* (maritime pine). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.41688>. Onglet Distribution Maps. Consulté le : 27/08/2023.
- [57] C. ALEGRIA, N. ROQUE, T. ALBUQUERQUE et P. FERNANDEZ : Modelling Maritime Pine (*Pinus pinaster* Aiton) Spatial Distribution and Productivity in Portugal : Tools for Forest Management. *Forests*, 12(368), 2021.
- [58] C. PRIETO-RECIO, J. MARTÍN-GARCÍA, F. BRAVO et J. DIEZ : Unravelling the associations between climate, soil properties and forest management in *Pinus pinaster* decline in the Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 356:74–83, 2015.
- [59] S. CONNOR, J. ARAÚJO, T. BOSKI, A. GOMES, S. GOMES, M. LEIRA, M. FREITAS, C. ANDRADE, C. MORALES-MOLINO, F. FRANCO-MÚGICA, R. AKINDOLA et B. VANNIÈRE : Drought, fire and grazing precursors to large-scale pine forest decline. *Diversity and Distributions*, 27(7):1138–1151, 2021.
- [60] S. SZYMCZAK, M. HÄUSSER, E. GAREL, S. SANTONI, F. HUNEAU, I. KNERR, K. TRACHTE, J. BENDIX et A. BRÄUNING : How Do Mediterranean Pine Trees Respond to Drought and Precipitation Events along an Elevation Gradient? *Forests*, 11(758), 2020.

- [61] M. PARDOS, M. del RÍO, H. PRETZSCH, H. JACTEL, K. BIELAK, F. BRAVO, G. BRAZAITIS, E. DEFOSSEZ, K. ENGEL, M. Godvod, K. JACOBS, L. JANSONE, A. JANSONS, X. MORIN, A. NOTHDURFT, L. ORETI, Q. PONETTE, M. PACH, J. RIOFRÍO, R. RUÍZ-PEINADO, A. TOMAO, E. UHL et R. CALAMA : The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition : Analysis along a climate gradient across Europe. *Forest Ecology and Management*, 481 (118687), 2021.
- [62] M. VERGARECHEA, R. CALAMA, H. PRETZSCH, J. G. ALDAY et M. del RÍO : Short- and long-term growth response to climate in mixed and monospecific forests of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster*. *European Journal of Forest Research*, 140(2):387–402, 2021.
- [63] M. BARRIO-ANTA, F. CASTEDO-DORADO, A. CÁMARA-OBREGÓN et C. A. LÓPEZ-SÁNCHEZ : Predicting current and future suitable habitat and productivity for Atlantic populations of maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) in Spain. *Annals of Forest Science*, 77(41), 2020.
- [64] S. M. BOGINO et F. BRAVO : Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann. For. Sci.*, 65(506), 2008.
- [65] R. TAPIAS, L. GIL, P. FUENTES-UTRILLA et J. A. PARDOS : Canopy seed banks in Mediterranean pines of south-eastern Spain : a comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. nigra* Arn. and *P. pinea* L. *Journal of Ecology*, 89:629–638, 2001.
- [66] I. YAHYAOU : *Contribution au suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2017.
- [67] C. GRAZIDE : *Une modélisation de la résistance en flexion du Pin Maritime utilisé en construction*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2014.
- [68] D. POT, G. CHANTRE, P. ROZENBERG, J. RODRIGUES, G. JONES, H. PEREIRA, B. HANNRUP, C. CAHALAN et C. PLOMION : Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Annals of Forest Science*, 59:563–575, 2002.
- [69] T. A. NGUYEN : *Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2014.
- [70] S.-O. LUNDQVIST, Å HANSSON et L. OLSSON : SilviScan measurements on Maritime pine - French samples cut perpendicular to the fibres. , STFI-Packforsk, 2007.
- [71] I. BRÉMAUD, J. RUELLE, A. THIBAUT et B. THIBAUT : Changes in viscoelastic vibrational properties between compression and normal wood : Roles of microfibril angle and of lignin. *Holzforschung*, 67(1):75–85, 2013.
- [72] L. A. DONALDSON : Within-and between-tree variation in microfibril angle in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 22(1):77–86, 1992.
- [73] D. AUTY, B. GARDINER, A. ACHIM, J. MOORE et A. CAMERON : Models for predicting microfibril angle variation in Scots pine. *Annals of Forest Science*, 70(2):209–218, 2013.
- [74] S. WILKINSON, J. OGÉE, J. C. DOMEQ, M. RAYMENT et L. WINGATE : Biophysical modelling of intra-ring variations in tracheid features and wood density of *Pinus pinaster* trees exposed to seasonal droughts. *Tree Physiology*, 32(3):305–318, 2015.
- [75] A. CARVALHO, A. NABAIS, C. VIEIRA, J. ROSSI et S. CAMPELO : Plastic Response of Tracheids in *Pinus pinaster* in a Water-Limited Environment : Adjusting Lumen Size instead of Wall Thickness. *PLoS ONE*, 10(8):e0136305, 2015.
- [76] J. VIEIRA, F. CAMPELO, S. ROSSI, F. CAMPELO, H. FREITAS et C. NABAIS : Xylogenesis of *pinus pinaster* under a mediterranean climate. *Annals of Forest Science*, 71:71–80, 2014.

- [77] V. DE MICCO, M. SAURER, G. ARONNE, R. TOGNETTI et P. CHERUBINI : Variations of wood anatomy and $\delta^{13}\text{C}$ within-tree rings of coastal *Pinus pinaster* showing intra-annual density fluctuations. *IAWA Journal*, 28(1):61–74, 2007.
- [78] D. DA SILVA PEREZ, A. GUILLEMAIN, P. ALAZARD, C. PLOMION, P. ROZENBERG, J. CARLOS RODRIGUES, A. ALVES et G. CHANTRE : Improvement of *Pinus pinaster* Ait elite trees selection by combining near infrared spectroscopy and genetic tools. *Holzforschung*, 61(6):611–622, 2007.
- [79] J. A. BALLESTEROS, M. STOFFEL, J. M. BODOGUE, M. BOLLSCHWEILER, O. HITZ et A. DíEZ-HERRERO : Changes in wood anatomy in tree rings of *Pinus pinaster* Ait. following wounding by flash floods. *TREE-RING RESEARCH*, 66(2):93–103, 2010.
- [80] M. VERGARECHEA : Wood anatomy and properties of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) after gravitropic responses. Mémoire de D.E.A., Máster en Ingeniería de Monte, Universidad de Valladolid, 2015.
- [81] F. CAMPELO, Z J. VIEIRA et C. NABAIS : Tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* responses to climate : Does size matter? *Trees*, 27:763–772, 2012.
- [82] J. VIEIRA, F. CAMPELO et C. NABAIS : Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to mediterranean climate. *Trees*, 23:257–265, 2008.
- [83] C. NABAIS, F. CAMPELO, J. VIEIRA et P. CHERUBINI : Climatic signals of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinaster* and *Pinus pinea* along a latitudinal gradient in Portugal. *Forestry*, 87(4):598–605, 2014.
- [84] H. HERNÁNDEZ-ALONSO, J. MADRIGUAL-GONZÁLES et S. FERNANDO : Differential growth responses in *Pinus nigra*, *P. pinaster* and *P. sylvestris* to the main patterns of climatic variability in the western Mediterranean. *Forest Ecology and Management*, 483:118921, 2021.
- [85] M. HÄUSSER, S. ARYAL, J. A. C. BARTH, J. BENDIX, E. GAREL, R. van GELDERN, F. HUNEAU, T. R. JUHLKE, I. KNERR, S. SANTONI, S. SZYMCZAK, K. TRACHTE et A. BRÄUNING : Xylem formation patterns from Mediterranean to subalpine climate conditions reveal high growth plasticity of pine species on Corsica. *Trees*, 37:1027–1039, 2023.
- [86] J. OLIVAR, S. BOGINO, S. HEINRICH et F. BRAVO : Changes in climate-growth relationships and IADF formation over time of pine species (*Pinus halepensis*, *P. pinaster* and *P. sylvestris*) in Mediterranean environments. *Forest Systems*, 24(1):e010, 9, 2015.
- [87] J. VIGUIER : *Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2015.
- [88] P. JODIN et J. MILITON : *Le bois matériau d'ingénierie textes rassemblés par Philippe Jodin*. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine école nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 1994.
- [89] H. POLGE et G. ILLY : Observations sur l'anisotropie du Pin maritime des Landes. *Annales des sciences forestières*, 24(3):205–231, 1967.
- [90] S. BERTHIER : *Effets des sollicitations aérodynamiques sur la croissance et le développement du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) : influence sur la morphogenèse aérienne et racinaire, et sur la formation du bois de cœur*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux, 2001.
- [91] L. BOUFFIER, A. RAFFIN et A. KREMER : Evolution of genetic variation for selected traits in successive breeding populations of maritime pine. *Heredity*, 101(2):156–165, 2008.
- [92] C. E. DUREL : Gain génétiques attendus après sélection sur index en seconde génération d'amélioration du pin maritime. *Revue forestière française, AgroParisTech*, 44(4):341–355, 1992.

- [93] B. J. ZOBEL et J. TALBERT : *Applied Forest Tree Improvement*. New York : John Wiley, 1984. p. 505.
- [94] GIS (2002) : Genetic Breeding of the Maritime Pine in Aquitaine. , GIS Work Report, PG édition : Bordeaux, 2002.
- [95] M. RADI et P. CASTÉRA : Qualification de la forme de deux pins maritimes en liaison avec la structure de leur bois. *Annales des Sciences Forestières*, 49(2):185–200, 1992.
- [96] J. ALTEYRAC : *Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (Picea Mariana (Mill.) B.S.P.)*. Thèse de doctorat, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, 2005.
- [97] J. F. DUMAL : *Caractéristiques physiques et mécaniques du bois juvénile de Pin maritime*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux, 1995.
- [98] A. M. TAYLOR, B. L. GARTNER et J. J. MORRELL : Heartwood Formation and Natural Durability—A Review. *Wood and Fiber Science*, 34(4):587–611, 2002.
- [99] S. BERTHIER, A. D. KOKUTSE, A. STOKES et T. FOURCAUD : Irregular Heartwood Formation in Maritime Pine (*Pinus pinaster* Ait) : Consequences for Biomechanical and Hydraulic Tree Functioning. *Annals of Botany*, 87(1):19–25, 2001.
- [100] K. SHINOZAKI, K. YODA, K. HOZUMI et T. KIRA : A quantitative analysis of plant form ; The Pipe Model. I. Theory. *Japanese Journal of Ecology*, 14(3):97–105, 1964.
- [101] K. SHINOZAKI, K. YODA, K. HOZUMI et T. KIRA : A quantitative analysis of plant form ; The Pipe Model. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology*, 14(4):133–139, 1964.
- [102] I. PINTO, H. PEREIRA et A. USENIUES : Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. *Trees*, 18(3):284–294, 2004.
- [103] S. KNAPIC et H. PEREIRA : Within-tree variation of heartwood and ring width in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 210(1-3):81–89, 2005.
- [104] S. KNAPIC, V. OLIVEIRA, M. MAKKONEN, I. PINTO-SEPPA et H. PEREIRA : Circumferential variation of heartwood and sapwood in maritime pine stems. *European Journal of Forest Research*, 133(6):1007–1014, 2014.
- [105] M. T. TYREE et J. TALBERT : *Xylem structure and the ascent of sap*. Springer series in wood science. Springer-Verlag, Berlin ; New York, 2002. 2nd edition.
- [106] A. STOKES et S. BERTHIER : Irregular heartwood formation in *Pinus pinaster* Ait. is relate to eccentric, radial, stem growth. *Forest Ecology and Management*, 135(1-3):115–121, 2000.
- [107] W. E. HILLIS : *Heartwood and Tree Exudates, volume 4 of Springer Series in Wood Science*. Springer Berlin Heidelberg, 1987.
- [108] C. PLOMION, C. PIONNEAU, J. BRACH, P. COSTA et H. BAILLÈRES : Compression Wood-Responsive Proteins in Developing Xylem of Maritime Pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Plant physiology*, 123(3):959–969, 2000.
- [109] L. BOURKE : *Growth trends and water use efficiency of Pinus pinaster Ait. in response to historical climate and groundwater trends on the ngangara mound, western australia*. Thèse de doctorat, School of Natural Science Faculty of Communications, Health and Science Edith Cowan University, Joondalup., 2004.

- [110] H. HERNÁNDEZ-ALONSO, J. MADRIGUAL-GONZÁLES et S. FERNANDO : Ontogenetic trends in the morphological features of main stem annual shoots of *Pinus pinaster* (Pinaceae). *American Journal of Botany*, 90(11):1577–1587, 2006.
- [111] L. BENIUŠIENĖ, E. PETRAUSKAS, M. ALEINIKOVAS, I. VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ, R. BENIUŠIS et B. ŠILINSKAS : Norway Spruce Stem Parameters in Sites with Different Stand Densities in Lithuanian Hemiboreal Forest. *Forests*, 12:201, 2021.
- [112] A. DIAS, M. J. GASPAR, A. CARVALHO, J. PIRES, J. LIMA-BRITO, M. E. SILVA et J. L. LOUZADA : Within- and between-tree variation of wood density components in *Pinus nigra* at six sites in Portugal. *Annals of Forest Science*, 75:58, 2018.
- [113] F. N. OGANA et J. J. GORGOSO-VARELA : A nonlinear mixed-effects tree height prediction model : Application to *Pinus pinaster* Ait in Northwest Spain. *Trees, Forests and People*, 1:100003, 2020.
- [114] L. NUNES, M. PATRÍCIO, J. TOMÉ et M. TOMÉ : Modeling dominant height growth of maritime pine in Portugal using GADA methodology with parameters depending on soil and climate variables. *Annals of Forest Science*, 68:311–323, 2011.
- [115] A. RUBIO-CUADRADO, A. BRAVO-OVIEDO, S. MUTKE et M. DEL RÍO : Climate effects on growth differ according to height and diameter along the stem in *Pinus pinaster* Ait. *iForest*, 11:237–242, 2018.
- [116] O. ANJOS, M. MARGARIDO, I. PINTO, A. USENIUS et H. PEREIRA : Variation of grow ring width in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). In *WCTE 2010 World Conference on Timber Engineering*, volume 4, pages 765–766, Italy, 2010.
- [117] M. J. GASPAR, J. LOUZADA, M. SILVA, A. AGUIAR et M. H. ALMEIDA : Age trends in genetic parameters of wood density components in 46 half-sibling families of *Pinus pinaster*. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(6):1470–1477, 2008.
- [118] J. W. P. NICHOLLS, H. E. DADSWELL et D. H. PERRY : Assessment of wood qualities for tree breeding. II. In *Pinus Pinaster* Ait. from Western Australia. *Silvae Genetica*, 12(4):105–110, 1963.
- [119] A. BURGERS : *Caractérisations physico-mécaniques de bois 'sans défauts' pour la conception mécanique : application aux pins de la région méditerranéenne française*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2016.
- [120] J. L. P. C. LOUZADA : *Varição Fenotípica e Genética em Características Estruturais na Madeira de Pinus Pinaster Ait.. O comprimento das fibras e a densidade até aos 80 anos de idade das árvores. Parametros genéticos na evolução juvenil - adulto das componentes da densidade da madeira*. Number 143 in Série Didáctica - Ciências Aplicadas. UTAD, utad edition, 2000.
- [121] J. L. P. C. LOUZADA : Genetic correlations between wood density components in *Pinus pinaster* Ait. *Annals of Forest Science*, 60(3):285–294, 2003.
- [122] R. KELLER, P. AZOEUF et R. HOSLIN : Détermination de l'angle de la fibre torse d'arbres sur pied à l'aide d'un traceur radioactif. *Annales des sciences forestières*, 31(3):161–169, 1974.
- [123] J. W. P. NICHOLLS : Assessment of wood qualities for tree breeding. IV. *Pinus pinaster* Ait. Grown in Western Australia. *Silvae Genetica*, 16(1):21–28, 1966.
- [124] FPL - FOREST PRODUCTS LABORATORY : Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-190, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Madison, 2010.
- [125] M. IVKOVIC et P. ROZENBERG : A method for describing and modelling of within-ring wood density distribution in clones of three coniferous species. *Annals of Forest Science*, 61(8):759–769, 2004.

- [126] P. R. LARSON : *The Vascular Cambium - Development and Structure*. Springer Series in Wood Science, Springer, Berlin, Heidelberg, 1994.
- [127] T. FRANCESCHINI, F. LONGUETAUD, J. D. BONTEMPS, O. BOURIAUD, B. D. CARITEY et J. M. LEBAN : Effect of ring width, cambial age, and climatic variables on the within-ring wood density profile of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. *Trees*, 27:913–925, 2013.
- [128] N. SÁNCHEZ-VARGAS, L. SANCHEZ et P. ROZENBERG : Plastic and adaptive response to weather events : A pilot study in a maritime pine tree ring. *Canadian Journal of Forest Research*, 37:2090–2095, 2007.
- [129] H. POLGE : Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois : l'analyse densitométrique de clichés radiographiques. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences Forestières*, 20(4):533–581, 1963.
- [130] H. POLGE : Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants : applications dans les domaines Technologique et Physiologique. *Annales des sciences forestières*, 23(1):I–206, 1966.
- [131] J. VIEIRA, F. CAMPELO, S. ROSSI, A. CARVALHO, H. FREITAS et C. NABAIS : Adjustment Capacity of Maritime Pine Cambial Activity in Drought-Prone Environments. *PLOS ONE*, 10(5), 2015.
- [132] AFNOR NF EN 13183-1 : Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - partie 1 : Détermination par la méthode de dessiccation, 2002.
- [133] P. CASTERA : Plateforme expérimentale sur la Conservation longue durée du Pin maritime par voie humide. Project report, INRA, Pierotton, 2004.
- [134] AFNOR NF EN 13307-1 : Ébauches et profilés semi-finis en bois pour usages non structurels - Partie 1 : exigences, 2007.
- [135] AFNOR NF EN 14220 : Bois et matériaux à base de bois dans les fenêtres extérieures, les vantaux de portes extérieures et les dormants de portes extérieures - Exigences et spécifications, 2007.
- [136] AFNOR NF EN 942 : Bois dans les menuiseries - Exigences générales, 2007.
- [137] AFNOR XP CEN/TS 13307-2 : Ébauches et profilés semi-finis en bois lamellé-collés et assemblés par entures multiples pour usages non structurels - Partie 2 : contrôle de production, 2007.
- [138] N. MOUCHOT : *Etude expérimentale et modélisation des transports diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique des bois de hêtre et d'épicéa*. Thèse de doctorat, Université Henry Poincaré Nancy I, 2002.
- [139] J. STRAUBE, D. ONYSLO et C. SCHUMACHER : Methodology and Design of Field Experiments for Monitoring the Hygrothermal Performance of Wood Frame Enclosures. *Journal of Building Physics*, 26(2):123–151, 2002.
- [140] W. T. SIMPSON : Predicting Equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber*, 5(1):41–49, 1973.
- [141] S. BRUNAUER, P. H. EMMETT et E. TELLER : Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2):309–319, 1938.
- [142] R. W. DENT : A Multilayer Theory for Gas Sorption : Part I : Sorption of a Single Gas. *Textile Research Journal*, 14(2):145–152, 1977.
- [143] M. VIDAL BASTÍAS et A. CLOUTIER : Evaluation of wood sorption models for high temperatures. *Maderas, Ciencia y tecnología*, 7(3):145–158, 2005.

- [144] S. PANG, R. B. KEEY et T. A. G. LANGRISH : Modelling the temperature profiles within boards during the high-temperature drying of *Pinus radiata* timber : The influence of airflow reversals. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 38(2):189–205, 1995.
- [145] R. RÉMOND, R. PERRÉ et E. MOUGEL : Using the concept of thin dry layer to explain the evolution of thickness, temperature, and moisture content during convective drying of Norway spruce boards. *Drying Technology*, 23(1-2):249–271, 2005.
- [146] A. FICK : Ueber Diffusion. *Annalen der Physik*, 170(1):59–86, 1855.
- [147] P. PERRÉ : The proper use of mass diffusion equation in drying modelling : from simple configurations to non-fickian behaviours. *In 19th International Drying Symposium IDS'2014*, Lyon, France, 2014.
- [148] T. K. SHERWOOD : The Drying of Solids I. *Industrial & Engineering Chemistry*, 21(1):12–16, 1929.
- [149] P. PERRÉ : *Fundamentals of wood drying*. European COST. A.R. BO. LOR, 1789.
- [150] N. A. PHAN : *Simulation of time-dependent crack propagation in a quasi-brittle material under relative humidity variations based on cohesive zone approach : application to wood*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2016.
- [151] K. KRABBENHØFT : *Moisture Transport in Wood : A Study of Physical-Mathematical Models and their Numerical Implementation*. Thèse de doctorat, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, 2004.
- [152] J.-G. SALIN : Problems and solutions in wood drying modelling : History and future. *Wood Material Science and Engineering*, 5(2):123–134, 2010.
- [153] S. FORTINO, A. GENOESE, A. GENOESE, L. NUNES et P. PALMA : Numerical modelling of the hygro-thermal response of timber bridges during their service life : A monitoring case-study. *Construction and Building Materials*, 47:1225–1234, 2013.
- [154] H. FRANDBSEN, L. DAMKILDE et S. SVENSSON : A revised multi-Fickian moisture transport model to describe non-Fickian effects in wood. *Holzforschung*, 61:563–572, 2007.
- [155] J. COCAUD, A. CÉLINO, S. FRÉOUR et F. JACQUEMIN : Vers une méthodologie d'identification des paramètres de diffusion d'eau dans les polymères et composites. *In Journées Nationales sur les Composites*, 77455, Champs-sur-Marne, France. Ecole des Ponts ParisTech (ENPC), 2017.
- [156] P. NAVI et F. HEGER : *Comportement thermo-hydrromécanique du bois : applications technologiques et dans les structures*. PPUR presses polytechniques., 2005.
- [157] G. MUÑOZ et M. ANTA : Physical properties of thinning wood in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) : Case study. *European Journal of Forest Research*, 129:1037–1045, 2010.
- [158] J. DUMAIL et P. CASTÉRA : Transverse shrinkage in maritime pine juvenile wood. *Wood science and technology*, 31(4):251–264, 1997.
- [159] J.-L. CARIOU : *Caractérisation d'un matériau viscoélastique anisotrope : le bois*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1987. OCLC : 489807750.
- [160] F. LAHNA : *Mécanique de la rupture des matériaux orthotropes - Application au bois*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1983.
- [161] J.M.C. XAVIER : *Caracterização do comportamento ao corte da madeira usando o ensaio de Iosipescu*. Mémoire de D.E.A., Dissertação de Mestrado em Tecnologias das Engenharias, Universidade de trás-os-montes e alto douro, Vila Real, 2003.

- [162] J.C. XAVIER, N.M. GARRIDO, M. OLIVEIRA, J.L. MORAIS, P.P. CAMANHO et F. PIERRON : A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 35(7–8):827–840, 2004.
- [163] J.C. XAVIER, M. OLIVEIRA, J.L. MORAIS et T. PINTO : Measurement of the shear properties of clear wood by the Arcan test. *Holzforschung*, 63(2):217–225, 2009.
- [164] C. SANTOS, A. DE JESUS, J.J.J. MORAIS et J.L. LOUZADA : Bearing properties of portuguese pine wood beneath a laterally loaded dowel. *Ciência e Tecnologia dos Materiais*, 20(1–2):45–51, 2008.
- [165] J.L. PEREIRA : Comportamento mecânico da madeira em tracção nas direcções de simetria material. Mémoire de D.E.A., Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2005.
- [166] J.L. PEREIRA, J. XAVIER, J. MORAIS et J. LOUZADA : Assessing wood quality by spatial variation of elastic properties within the stem : Case study of Pinus pinaster in the transverse plane1. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(2):107–117, 2014.
- [167] J. SANTOS : *Estudo de Modelos e Caracterização do Comportamento Mecânico da Madeira*. Thèse de doctorat, Universidade do Minho, 2007.
- [168] R. POMMIER, B. DENYS et G. GARBAY : Modelling the distribution of the variability of Maritime Pine for wooden sawn timber and finger jointing. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(6), 2014.
- [169] S. ORMARSSON, O. DAHLBLOM et H. PETERSSON : A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 1 : Theory. *Wood Science and Technology*, 32:325–334, 1998.
- [170] C. C. GERHARDS : Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood : An Analysis of Immediate Effects. *Wood and Fiber Science*, 14(1):4–36, 1982.
- [171] T. LUNDSTRÖM et V. STOECKLI : Fresh-stem bending of silver fir and Norway spruce. *Tree physiology*, 28:355–366, 2008.
- [172] J. MACHADO et H. CRUZ : Within stem variation of Maritime Pine timber mechanical properties. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63:154–159, 2005.
- [173] C. GRAZIDE, J. L. COUREAU, A. COINTE et S. MOREL : Mechanical performance curves for the strength grading of maritime pine. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76:877–888, 2018.
- [174] T. MORGADO, A. DIAS, J. MACHADO, J. H. J. O. NEGRAO et A. MARQUES : Grading of Portuguese Maritime Pine Small-Diameter Roundwood. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2):1037–1045, 2017.
- [175] T. MORGADO, J. N. RODRIGUES, J. S. MACHADO et A. M. P. G. DIAS : Grading and testing of Maritime pine and larch roundwood. *In Proceedings of COST E53*, Delft, 2008.
- [176] AFNOR NF EN 14251 : Bois de structure rond - Méthodes d’essai, 2004.
- [177] AFNOR NF EN 408+A1 : Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques, 2012.
- [178] AFNOR NF EN 384+A2 : Bois de structure - Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique, 2022.
- [179] H. CRUZ, L. NUNES et J. MACHADO : Update assessment of Portuguese maritime pine timber. *Forest Products Journal*, 48(1):60–64, 1998.

- [180] IPQ : NP 4305 : Madeira serrada de pinho bravo para estruturas. Classificação Visual, 1995. Monte da Caparica.
- [181] J. A. BALMORI, L. A. BASTERRA et L. ACUÑA : Internal GFRP Reinforcement of Low-Grade Maritime Pine Duo Timber Beams. *Materials*, 13(571), 2020.
- [182] ISO 13061-6 : Physical and Mechanical Properties of Wood—Test Methods for Small Clear Wood Specimens—Part 6 : Determination of Ultimate Tensile Stress Parallel to Grain, 2014. International Organization for Standardization (ISO) : Genève, Switzerland.
- [183] UNE 56535 : Características Físico-Mecánicas de la Madera. Determinación de la Resistencia a Compression, 1997. Asociación Española de Normalización : Madrid, Spain.
- [184] UNE-EN 408 :2011+A1 :2012 : Timber structures—Structural Timber and Glued Laminated Timber. Determination of Some Physical and Mechanical Properties, 2012. Asociación Española de Normalización : Madrid, Spain.
- [185] A. PATERA, A. BONNIN et R. MOKSO : Micro- and Nano-Scales Three-Dimensional Characterisation of Softwood. *J. Imaging*, 7:263, 2021.
- [186] J. HARRINGTON, K. STOL et R. ASTELY : Modelling the elastic properties of softwood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 56:37–41, 1998.
- [187] K. PERSSON : *Micromechanical modelling of wood and fibre properties*. Thèse de doctorat, Lund University, 2000.
- [188] L. KUCÍKOVÁ, M. ŠEJNOHA et J. VOREL : Determination of hygroexpansion coefficients of wood using analytical and numerical homogenization. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 15:51–56, 2018.
- [189] M. DELUCIA, A. CATAPANO, M. MONTEMURRO et J. PAILHÉS : A stochastic approach for predicting the temperature-dependent elastic properties of cork-based composites. *Mechanics of Materials*, 145 103399, 2020.
- [190] B. KASAL : Wood formation and properties - Mechanical Properties of Wood. In Academic PRESS, éditeur : *Encyclopedia of Forest Sciences*, pages 1815–1828. 2004.
- [191] A. EINSTEIN : Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, 322(8):549–560, 1905.
- [192] Z. HASHIN et S. SHTRIKMAN : A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(2):127–140, 1962b.
- [193] V.M. LEVIN : Thermal expansion coefficients of heterogeneous materials. *Mechanics of Solids*, 2:58–61, 1967.
- [194] P.S. TURNER : Thermal expansion stresses in reinforced plastics. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 37:239–250, 1946.
- [195] R.A. SCHAPERY : Thermal expansion coefficient of composite materials based on energy principles. *Journal of Composite Materials*, 2:380–404, 1968.
- [196] H.L. MCMANUS : Probabilistic Methods for the Calculation of Laminate Properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 12(6):712–722, 1993.
- [197] M.A. ALAZWARI et S.S. RAO : Modeling and analysis of composite laminates in the presence of uncertainties. *Composites Part B : Engineering*, 161:107–120, 2019.
- [198] A. CATAPANO et J. JUMEL : A numerical approach for determining the effective elastic symmetries of particulate-polymer composites. *Composites Part B : Engineering*, 78:227–243, 2015.

- [199] M. ŠEJNOHA, L. KUCÍKOVÁ, J. VOREL, J. SÝKORA et W.P. DE WILDE : Effective material properties of wood based on homogenization. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 7(2):167–180, 2019.
- [200] S. GIRARDON, L. DENAUD, G. POT et I. RAHAYU : Modelling the effects of wood cambial age on the effective modulus of elasticity of poplar laminated veneer lumber. *Annals of Forest Science*, 73(3):615–624, 2016.
- [201] A. REUSS : Berechnung der fließ grenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 9(1):49–58, 1929.
- [202] W. VOIGT : Ueber die beziehung zwischen den beiden elasticitätsconstanten isotroper körper. *Annals of Physics*, 274(12):573–587, 1889.
- [203] C. KARCH : Micromechanical analysis of thermal expansion coefficients. *Modeling and numerical simulation of material science*, 04(03):104–118, 2014.
- [204] G. WANG : An efficient analytical homogenization technique for mechanical-hydrothermal responses of unidirectional composites with applications to optimization and multiscale analyses. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(2):382–395, 2019.
- [205] E. BADEL et P. PERRÉ : Predicting oak wood properties using X-ray inspection : Representation, homogenisation and localisation. Part I : Digital X-ray imaging and representation by finite elements. *Annals of Forest Science*, 59(7):767–776, 2002.
- [206] P. PERRÉ et E. BADEL : Predicting oak wood properties using X-ray inspection : Representation, homogenisation and localisation. Part II : Computation of macroscopic properties and microscopic stress fields. *Annals of Forest Science*, 60(3):247–257, 2003.
- [207] E.J. BARBERO : *Finite element analysis of composite materials*. CRC Press - Edition Taylor and Francis Group, 2008.
- [208] J. STOLZ, P. FIDEU et A. HERRMANN : Homogenization of fiber composite material properties : an adaptive multiphysics implementation. In *COMSOL Conference*, Lausanne, Switzerland, October 2018.
- [209] ANSYS, INC. : *ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide. Release 15.0*. Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, 2013.
- [210] M. MONTEMURRO : *Optimal Design of Advanced Engineering Modular Systems through a New Genetic Approach. Mechanics [physics.med-ph]*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. English. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-00955533⟩.
- [211] R. M. JONES : *Mechanics of Composite Materials - Second Edition*. Taylor and Francis, 1999.
- [212] T.F.M. MORGADO, J.S. MACHADO, A.M.P.G. DIAS, H. CRUZ et J.N.A. RODRIGUES : Características mecânicas et classificação da madeira de secção circular de Pinheiro Bravo. In *CIMAD 11 -1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção*, Coimbra, Portugal, June 2011.
- [213] J. PEDRO : Avaliação destrutiva e não destrutiva de elementos retangulares de madeira de pinho bravo. Mémoire de D.E.A., Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2013.
- [214] J. CARBALLO, E. HERMOSO et J.I. FERNÁNDEZ-GOLFÍN : Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*). *Investigación Agraria : Sistemas y Recursos Forestales*, 18(2):152–158, 2009.

- [215] M. MATSUO-UEDA, T. TSUNEZUMI, Z. JIANG, M. YOSHIDA, K. YAMASHITA, Y. MATSUDA, Y. MATSUMURA, Y. IKAMI et H. YAMAMOTO : Comprehensive study of distributions of residual stress and Young's modulus in large-diameter sugi (*Cryptomeria japonica*) log. *Wood Science and Technology*, 56:573–588, 2022.
- [216] J. A. NAIRN : A Numerical Study of the Transverse Modulus of Wood as a Function of Grain Orientation and Properties. *Holzforschung*, 61(4):406–413, 2007.
- [217] Y. AUDOUX, M. MONTEMURRO et J. PAILHÈS : Non-Uniform Rational Basis Spline hyper-surfaces for metamodeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 364:112918, 2020.
- [218] B. VUILLOD, M. ZANI, L. HALLP, E. PANETTIERI et M. MONTEMURRO : A surrogate model based on NURBS entities for engineering problems. In P. IVÁNYI, J. LOGO et B. H. V. TOPPING, éditeurs : *Sixth international conference on soft computing, machine learning and optimisation in civil, structural and environmental engineering*, volume 4, pages 765–766, Hungary, 2023. Civil-Comp Press, Edinburgh, UK. Paper 1.10.
- [219] B. VUILLOD : *Stratégie de modélisation multi-fidélité via une approche système incluant des métamodèles basés sur les entités NURBS*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2024.
- [220] L. PIEGL et W. TILLER : *The NURBS books*. Springer-Verlag, New York, NY, USA, second edition, 1996.
- [221] G. COSTA, M. MONTEMURRO et J. PAILHÈS : Minimum length scale control in a NURBS-based SIMP method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 354:963–989, 2019a.
- [222] T. RODRIGUEZ, M. MONTEMURRO, P. LE TEXIER et J. PAILHÈS : Structural Displacement Requirement in a Topology Optimization Algorithm Based on Isogeometric Entities. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 184:250–276, 2020.
- [223] G. COSTA, M. MONTEMURRO et J. PAILHÈS : NURBS hyper-surfaces for 3D topology optimization problems. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(7):665–684, 2019b.
- [224] G. BERTOLINO, M. MONTEMURRO et G. DE PASQUALE : Multi-scale shape optimisation of lattice structures : an evolutionary-based approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13:1565–1578, 2019.
- [225] M. MONTEMURRO, A. CATAPANO et D. DOROSZEWSKI : A multi-scale approach for the simultaneous shape and material optimisation of sandwich panels with cellular core. *Composites Part B : Engineering*, 91:458–472, 2016. www.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.016.
- [226] M. MONTEMURRO et A. CATAPANO : On the effective integration of manufacturability constraints within the multi-scale methodology for designing variable angle-tow laminates. *Composite Structures*, 161:145–159, 2017.
- [227] M. MONTEMURRO et A. CATAPANO : A general b-spline surfaces theoretical framework for optimisation of variable angle-tow laminates. *Composite Structures*, 209:561–578, 2019.
- [228] Y. AUDOUX, M. MONTEMURRO et J. PAILHÈS : A Metamodel Based on Non-Uniform Rational Basis Spline Hyper-Surfaces for Optimisation of Composite Structures. *Composite Structures*, 247:112439, 2020.
- [229] M. ZANI, M. MONTEMURRO, E. PANETTIERI et P. MARIN : B-Spline Based Metamodel of the Thermal Analysis of the Wire Arc Additive Manufacturing Process. In *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED23)*, Bordeaux, France, 24-28 July 2023, 2023.

- [230] M. G. COX : The Numerical Evaluation of B-Splines. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 10 (2):134–149, 1972.
- [231] C. de BOOR : On calculating with B-Spline. *Journal of Approximation theory*, 6:50–62, 1972.
- [232] G. COSTA, M. MONTEMURRO et J. PAILHÈS : A General Hybrid Optimization Strategy for Curve Fitting in the Non-Uniform Rational Basis Spline Framework. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 176:225–251, 2018.
- [233] A. TODOROKI et T. ISHIKAWA : Design of experiments for stacking sequence optimizations with genetic algorithm using response surface approximation. *Composite Structures*, 64:349–357, 2004.
- [234] G. ALLAIRE et G. DELGADO : Stacking sequence and shape optimization of laminated composite plates via a level-set method. *Journal of the Mechanics and Physics of the Solids*, 97:168–196, 2016.
- [235] S. N. SØRENSEN et E. LUND : Topology and thickness optimization of laminated composites including manufacturing constraints. *Struct. Multidisc. Optim.*, 48:249–265, 2013.
- [236] S. PECH, G. KANDLER, M. LUKACEVIC et J. FÜSSL : Metamodel assisted optimization of glued laminated timber beams by using metaheuristic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 79:129–141, 2019.
- [237] A. F. de VITO JR., W. M. VICENTE et M. X. XIE : Topology optimization applied to the core of structural engineered wood product. *Structures*, 48:1567–1575, 2023.
- [238] M. I. IZZI : *Multi-scale optimisation of thin-walled composite structures integrating a global-local modelling strategy*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2021.
- [239] G. VERCHERY : Les invariants des tenseurs d'ordre 4 du type de l'Élasticité. In J.-P. BOEHLER, éditeur : *Restoring the urban forest ecosystem*, pages 93–104. Springer Netherlands, Dordrecht, 2001. URL www.doi.org/10.1007/978-94-009-6827-1_7.
- [240] M. MONTEMURRO, A. VINCENTI et P. VANNUCCI : Design of the elastic properties of laminates with a minimum number of plies. *Mechanics of Composite Materials*, 48(4):369–390, 2012.
- [241] E. VALOT et P. VANNUCCI : Some exact solutions for fully orthotropic laminates. *Composite Structures*, 69:157–166, 2005.
- [242] M. MONTEMURRO : An extension of the polar method to the first-order shear deformation theory of laminates. *Composite Structures*, 127:328–339, 2015. www.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.025.
- [243] M. MONTEMURRO : Corrigendum to “an extension of the polar method to the first-order shear deformation theory of laminates” [compos. struct. 127 (2015) 328-339]. *Composite Structures*, 131: 1143–1144, 2015. www.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.002.
- [244] M. MONTEMURRO : The polar analysis of the third-order shear deformation theory of laminates. *Composite Structures*, 131:775–789, 2015. www.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.016.
- [245] A. CATAPANO et M. MONTEMURRO : On the correlation between stiffness and strength properties of anisotropic laminates. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(8):651–660, 2019.
- [246] M. I. IZZI, A. CATAPANO et M. MONTEMURRO : Strength and mass optimisation of variable-stiffness composites in the polar parameters space. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(4):1–29, 2021.

- [247] J.-C. DUPRÉ, D. JULLIEN, L. UZIELLI, F. HESSER, L. RIPARBELLI, C. GAUVIN, P. MAZZANTI, J. GRIL, G. TOURNILLON, D. AMOROSO, P. HAZAEL MASSIEUX, P. STEPANOFF et M. BOUSVAROU : Experimental study of the hygromechanical behaviour of a historic painting on wooden panel : devices and measurement techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 46:165–175, 2020.
- [248] A. BONTEMPS, G. GODI, E. FOURNELY, R. MOUTOU PITTI et J. GRIL : Implementation of an optical measurement method for monitoring mechanical behaviour. *Experimental Techniques*, 2023.
- [249] G. KIFETEW : Application of the deformation field measurement method to wood during drying. *Wood Science and Technology*, 30:455–462, 1996.
- [250] D. DANG, R. MOUTOU PITTI, E. TOUSSAINT et M. GRÉDIAC : Investigating wood under thermo-hydronechanical loading at the ring scale using full-field measurements. *Wood Science and Technology*, 52(6):1473–1493, 2018.
- [251] M. KUMAR et C. SHAKHER : Experimental characterization of the hygroscopic properties of wood during convective drying using digital holographic interferometry. *Applied Optics*, 55(5):960–968, 2016.
- [252] B. E. FOUST, J. R. LESNIAK et R.E. ROWLANDS : Stress analysis of a pinned wood joint by grey-field photoelasticity. *Composites : Part B*, 61:291–299, 2014.
- [253] C. GAUVIN, D. JULLIEN, P. DOUMALIN, J.-C. DUPRÉ et J. GRIL : Image Correlation to Evaluate the Influence of Hygrothermal Loading on Wood. *Strain*, 50:428–435, 2014.
- [254] D. KEUNECKE, K. NOVOSSELETZ, Lanvermann C., D. MANNES et P. NIEMZ : Combination of X-ray and digital image correlation for the analysis of moisture-induced strain in wood : opportunities and challenges. *Eur. J. Wood Prod.*, 70:407–413, 2012.
- [255] G. Y. JEONG, J. H. HYUK, S. J. LEE et S.-J. PANG : Comparisons of bearing properties for various oriented glulam using digital image correlation. *Journal of Wood Science*, 64:237–245, 2018.
- [256] S. NAVARATNAM, T. NGO, P. CHRISTOPHER et S. LINFORTH : The use of digital image correlation for identifying failure characteristics of cross-laminated timber under transverse loading. *Measurement*, 154:107502, 2020.
- [257] M. M. BAKALARZ et P. P. TWORZEWSKI : Application of Digital Image Correlation to Evaluate Strain, Stiffness and Ductility of Full-Scale LVL Beams Strengthened by CFRP. *Materials*, 16:1309, 2023.
- [258] P. van DUIN, D. van GOMPEL, A. van GREVENSTEIN-KRUSE, R. GROVES, V. HORIE, N. KOS, B. NEW, C. YOUNG et K. SEYMOUR : The conservation of panel paintings and related objects. Research agenda , Netherlands Organisation for Scientific Research, Rijksmuseum Amsterdam with grant support from the Getty Foundation as part of the Panel Paintings Initiative., NWO, The Hague, 2014.
- [259] AFNOR XP P20-650-2 : Fenêtres, porte-fenêtres, châssis fixes et ensembles menuisés - Pose de vitrage minéral en atelier - Partie 2 : exigences et méthodes d'essais spécifiques au bois, 2009.
- [260] ISO 24339 : Laminate floor coverings - Determination of dimensional variations and stability after exposure to dry and humid conditions, 2006.
- [261] E. M. C. JONES et M. A. IADICOLA (EDS.) : A Good Practices Guide for DIC. Rapport technique, International Digital Image Correlation Society, 2017.
- [262] Vic-3D, Software Manual. Rapport technique, Correlated solutions, 2023.
- [263] S. ORMARSSON, O. DAHLBLOM et H. PETERSSON : A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 2 : Simulation of drying board. *Wood Science and Technology*, 33:407–423, 1999.

- [264] T. R. TAUCHERT et N. N. HSU : Shrinkage Stresses in Wood Logs Considered as Layered, Cylindrically Orthotropic Materials. *Wood Science and Technology*, 11(1):51–58, 1977.
- [265] J.-G. SALIN : Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model. *European Journal of Wood and Wood Products*, 50:195–200, 1992.
- [266] A. MÅRTENSSON et S. SVENSSON : Stress-Strain Relationship of Drying Wood. Part 1 : Development of a Constitutive Model. *Holzforschung*, 51:472–478, 1997.
- [267] A. HANHIJÄRVI et D. HUNT : Experimental indication of interaction between viscoelastic and mechano-sorptive creep. *Science and Technology*, 32(1):57–70, 1998.
- [268] J.-M. HUSSON, F. DUBOIS et N. SAUVAT : Modélisation du comportement mécanosorptif des éléments en bois. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 12(9-10):1181–1193, 2008.
- [269] F. DUBOIS, J.-M. HUSSON, N. SAUVAT et N. MANFOUMBI : Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(4):439–460, 2012.
- [270] S. FORTINO, F. MIRIANON et T. TORATTI : A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 13:333–356, 2009.
- [271] G. B. WARBURTON : The Vibration of Rectangular Plates. *In Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, volume 168, pages 371–384, 1954. ser.A.
- [272] R. LONGO, D. LAUX, S. PAGANO, T. DELAUNAY, E. LE CLÉZIO et O. ARNOULD : Elastic characterization of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) : a comprehensive study. *Wood Science and Technology*, 52(2):383–402, 2018.

Modélisation multi-échelles du comportement hygro-mécanique et étude de la stabilité dimensionnelle de structures composites

lamellées collées aboutées en Pinus pinaster (Ait.)

Romain CHEVALIER

Résumé :

Cette thèse porte sur le développement de modèles multi-échelles du comportement hygro-mécanique pour l'étude de la stabilité dimensionnelle de lamellés collés aboutés (LCAs) en Pinus pinaster (Ait.). Les structures en bois sont soumises à des variations dimensionnelles dues aux modifications des ambiances climatiques. Dans le cadre des structures LCAs, la stabilité dimensionnelle peut être atteinte via une conception systématique en fonction des propriétés des lamelles constituantes. Dans ce but, un modèle multi-échelles reposant sur une étude bibliographique exhaustive des propriétés du Pinus pinaster (Ait.) a été développé. Ce modèle permet d'obtenir spatialement, grâce à l'utilisation d'une méthode d'homogénéisation numérique et d'un métamodèle basé sur les hypersurfaces Non-Uniform Rational Basis-Spline (NURBS), les propriétés hétérogènes, variables et anisotropes de lamelles de Pinus pinaster (Ait.). De plus, des configurations de LCAs, reposant sur la théorie des stratifiés, ont été proposées et soumises expérimentalement à des variations d'ambiance climatiques. Les déplacements induits sont mesurés grâce à une méthode de corrélation d'images numériques. In fine, une comparaison des déplacements est réalisée qui permet de recommander des configurations de LCAs améliorant la stabilité dimensionnelle des LCAs du groupe Gascogne Bois.

Pinus pinaster (Ait.) ; Lamellés collés aboutés ; Stabilité dimensionnelle ; Modélisation multi-échelles ; Méthode aux éléments finis ; Homogénéisation numérique; NURBS ; Composites variables et anisotropes

Abstract :

This thesis focuses on the development of a multi-scale model of the hygro-mechanical behaviour and the study of the shape stability of glued laminated timber (GLT) made of Pinus pinaster (Ait.). Wooden structures are subject to dimensional variations due to changes in climatic conditions. In the case of GLT structures, shape stability can be achieved through systematic design based on the properties of the constituent lamellae. To this end, a multi-scale model based on an exhaustive bibliographic study of the properties of Pinus pinaster (Ait.) has been developed. Using a numerical homogenisation method and a metamodel based on Non-Uniform Rational Basis-Spline (NURBS) hypersurfaces, this model provides a spatial representation of the heterogeneous, variable, and anisotropic properties of Pinus pinaster (Ait.) lamellae. In addition, configurations of GLTs, based on laminate theory, have been proposed and experimentally subjected to variations in climatic conditions. The induced displacements are measured using a digital image correlation method. Finally, a comparison of the displacements is carried out, enabling the recommendation of GLT configurations that improve the shape stability of the GLTs produced by the Gascogne Bois company.

Pinus pinaster (Ait.); Glued laminated timber; Dimensional stability; Multiscale modelling; Finite element method; Numerical homogenisation; NURBS; Variable and anisotropic composites