



HAL
open science

Détermination des propriétés élastiques et du retrait d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse : description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation

Eric Badel

► **To cite this version:**

Eric Badel. Détermination des propriétés élastiques et du retrait d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse : description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation. Sciences de la Terre. ENGREF (AgroParisTech), 1999. Français. NNT : . tel-00005709

HAL Id: tel-00005709

<https://pastel.hal.science/tel-00005709>

Submitted on 5 Apr 2004

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.



ENGREF

ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL DES EAUX ET FORETS
UNITE ASSOCIEE INRA/ENGREF, EQUIPE PRODUITS FORESTIERS



INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

THESE

présentée
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences Forestières et du Bois

par

Eric BADEL

* * *

DETERMINATION DES PROPRIETES ELASTIQUES ET DU RETRAIT D'UN CERNE ANNUEL DE CHENE DANS LE PLAN TRANSVERSE : DESCRIPTION DE LA MORPHOLOGIE, MESURES DES PROPRIETES MICROSCOPIQUES ET CALCULS D'HOMOGENEISATION

* * *

Thèse soutenue publiquement le 1^{er} Octobre 1999
à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy,
devant le jury composé par Messieurs :

Daniel GUITARD
Gilles PEIX

Rapporteur
Rapporteur

Patrick PERRE

Directeur de thèse

Roger GAERTNER
Christian JAY-ALLEMAND
René KELLER

Examineur
Examineur
Président

*à Cécile,
à Mag, Yvan et Juliette,
à mes parents.*

Remerciements

Mes premiers mots de reconnaissance vont naturellement vers mon directeur de thèse, Patrick Perré. Je le remercie de m'avoir accueilli au sein de l'Equipe Produits Forestiers, de m'avoir proposé ce sujet passionnant et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à son aboutissement. Au delà de son encadrement scientifique que j'ai eu la chance d'apprécier, il a toujours été à l'écoute des joies mais aussi des angoisses ou des états d'âme de son thésard. Je n'oublierai pas ces qualités humaines qui ont grandement contribué au plaisir que j'ai eu à réaliser ce travail.

Un grand merci à Bernard Thibaut qui a accepté de m'encadrer durant mon stage de DEA. C'est sans aucun doute cette première expérience au sein de son équipe qui a initié mon attrait pour la recherche.

Je tiens à remercier messieurs Bretheau, Gril, Jeulin, Nepveu et Suquet pour leur participation au comité de thèse.

A mes rapporteurs, Daniel Guitard et Gilles Peix ainsi qu'aux autres membres du jury, Roger Gaertner, René Keller et Christian Jay-Allemand, je veux adresser ma profonde reconnaissance pour avoir accepté de consacrer leur temps à l'examen de ce travail. Si la soutenance de thèse est une épreuve réputée difficile, vous avez tout fait pour rassurer l'impétrant. Cette journée restera un excellent souvenir.

Un doctorant n'est pas seul devant son ordinateur ou ses dispositifs expérimentaux. Inséré dans l'Equipe des Produits Forestiers de l'ENGREF (maintenant devenue LERMAB), j'ai pu apprécier la sympathie de tous ses membres que je voudrais ici saluer. Un grand merci donc à François, ingénieur extraordinaire aux savoirs innombrables, à Dominique pour ses "english corrections", à Michel pour ses usinages de précision, à Jean-Claude et une pensée émue pour madame Godfrin, disparue trop tôt. Je n'oublierai pas non plus tous les autres doctorants avec lesquels j'ai pu faire un bout de chemin : Fabrice, les Brésiliens Alcir et Osmar, les Béninois Eusèbe et Sylvain, Jamal, Riad ainsi que tous ceux des autres laboratoires de l'ENGREF ou de l'INRA, que je ne nommerai pas de peur d'en oublier, et qui ont su me supporter jusqu'aux dernières heures de ce travail.

Cette liste n'a pas la prétention d'être exhaustive et j'espère que ceux qui n'y retrouvent pas leur nom ne m'en tiendront pas rigueur. Sachez que vous n'êtes pas oubliés et que vous avez tous contribué à l'excellent souvenir que je garderai des trois années qui viennent de s'écouler.

Enfin, je tiens à rendre hommage à Cécile, ma femme, qui m'a trop souvent attendu en pleine nuit, parfois même à l'ENGREF, pendant que je lançais "juste une dernière manip". A celle à qui j'ai égoïstement saboté pas mal de soirées, week-end et autres vacances, je défends cependant à quiconque d'aller lui raconter qu'après la thèse.... c'est bien pire !

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
INTRODUCTION	7
CHAPITRE I	
DEVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF D'IMAGERIE X	19
1 INTRODUCTION	21
1.1 LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE.....	21
1.2 LES RAYONS X.....	22
2 GÉNÉRALITÉS SUR LES RAYONNEMENTS X	25
2.1 PRODUCTION.....	25
2.2 ATTÉNUATION.....	27
3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	29
3.1 PRINCIPE DE LA PROJECTION ET DÉFAUTS INHÉRENTS À PRENDRE EN CONSIDÉRATION.....	29
3.1.1 Flou dû à la taille du foyer.....	30
3.1.2 Flou dû à l'épaisseur de l'échantillon.....	31
3.1.3 Flou dû à la résolution du scintillateur.....	32
3.1.4 Bruit expérimental.....	34
3.1.5 Hétérogénéité d'éclairage.....	34
3.2 CHOIX TECHNOLOGIQUES DU MATÉRIEL.....	35
3.2.1 Source X.....	35
3.2.2 Détecteur.....	35
3.2.3 Scintillateur.....	36
3.3 CONCEPTION ET MISE AU POINT.....	40
3.3.1 Dimensionnement.....	40
3.3.2 Alignement.....	41
3.3.3 Mise au point de la caméra.....	42
3.4 CORRECTIONS D'UNE IMAGE.....	43
3.4.1 Corrections de base.....	43
3.4.2 Le filtre médian temporel.....	46
4 PERFORMANCES DU DISPOSITIF	46
4.1 RÉOLUTION SPATIALE.....	46
4.2 DYNAMIQUE DU SYSTÈME ET RÉOLUTION DE I/I_0	50
4.2.1 Flux incident : dynamique et linéarité temporelle.....	50
4.2.2 Résolution quantitative du signal détecté.....	52
4.2.2.1 Stabilité et répétabilité du flux.....	52
4.2.2.2 Bruit expérimental.....	54
4.2.2.3 Mesure du contraste (signal).....	56
4.2.2.4 Rapport signal-bruit.....	59
4.2.3 Reproductibilité.....	61
5 UTILISATION DU DISPOSITIF À DES FINS D'IMAGERIE ANATOMIQUE DE BOIS	62
5.1 USINAGE DE L'ÉCHANTILLON.....	62
5.1.1 Flou dû à l'orientation des axes matériels du bois.....	62
5.1.2 Préparation – usinage de l'échantillon.....	63
5.2 EXEMPLE D'IMAGE D'ANATOMIE.....	64
6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	66

CHAPITRE II

MESURES DES PROPRIETES ELASTIQUES PAR DES ESSAIS DE TRACTION SOUS MICROSCOPE..... 71

1 INTRODUCTION.....	73
2 MATÉRIEL ET MÉTHODE	73
2.1 MACHINE D'ESSAIS MICRO MÉCANIQUES	73
2.2 ECHANTILLONNAGE ET PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES	76
2.3 ESTIMATIONS DES ERREURS EXPÉRIMENTALES	78
3 RÉSULTATS.....	81
3.1 LA ZONE INITIALE POREUSE	82
3.2 LES PLAGES DE FIBRE	84
3.3 LES GROS RAYONS LIGNEUX	85
3.4 LES PLAGES DE PARENCHYME LONGITUDINAL DE BOIS FINAL	87
4 CONCLUSION	88

CHAPITRE III

MESURES DES PROPRIETES DE RETRAIT LIBRE PAR IMAGERIE X..... 91

1 INTRODUCTION.....	93
2 LE RETRAIT MICROSCOPIQUE.....	93
2.1 RETRAIT LIBRE - RETRAIT LIÉ	93
2.2 LES MESURES DE RETRAIT MICROSCOPIQUE	94
2.2.1 Les systèmes basés sur l'image	95
2.2.2 Les lasers	96
2.3 CONTRÔLE DU TAUX D'HUMIDITÉ	97
2.3.1 Problématique générale	97
2.3.2 Cinétique des éprouvettes microscopiques de chêne	97
3 MISE AU POINT DU DISPOSITIF	98
3.1 CHOIX DU DISPOSITIF D'IMAGERIE X	98
3.2 CHAMBRE CLIMATIQUE	99
4 ESSAI DE RETRAIT	102
4.1 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS	102
4.2 DÉROULEMENT DE L'ESSAI	103
4.2.1 Conditions d'imagerie	104
4.3 CALCUL DES COEFFICIENTS DE RETRAIT	105
4.3.1 Champ de déformation calculé à partir de deux images	106
4.3.2 Pré traitement de l'image	107
4.3.3 choix et calcul des coefficients de gonflement	110
5 RESULTATS.....	112
6 CONCLUSION – PERSPECTIVES	116

CHAPITRE IV

MAILLAGES ET CALCULS D'HOMOGENEISATION SUR DES IMAGES DE STRUCTURES REELLES ET ARTIFICIELLES	121
1 INTRODUCTION	123
2 HOMOGÉNÉISATION	124
3 PASSAGE DE L'IMAGE AU MAILLAGE NUMÉRIQUE	128
3.1 REPÉRAGE DES DIFFÉRENTES PHASES DU MATÉRIAU, VECTORISATION ET SEGMENTATION DE LEUR CONTOUR	128
3.2 RÉALISATION DU MAILLAGE NUMÉRIQUE	130
3.3 INFLUENCE DE LA RÉOLUTION SPATIALE	132
4 UTILISATION DU MODÈLE	136
4.1 INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS MICROSCOPIQUES	136
4.2 INFLUENCE DE PARAMÈTRES MORPHOLOGIQUES	137
4.2.1 Influence de la taille du rayon ligneux	137
4.2.2 Influence de la forme des plages de fibres et de la largeur de cerne	139
4.3 INFLUENCE DE LA VITESSE D'ACCROISSEMENT PAR COMPARAISON DE DEUX CERNES D'UN MÊME ARBRE	145
5 CONCLUSION	147
CONCLUSION	149
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	157
ANNEXES	165
ANNEXE 1 : LE RETRAIT DU BOIS	167
ANNEXE 2 : COMPORTEMENT MECANIQUE DU BOIS	173

INTRODUCTION

Issu de l'activité biologique de l'arbre, le bois est un matériau aux propriétés fortement variables ; caractéristique importante qui limite son utilisation. Depuis de nombreuses années, les recherches entreprises visent essentiellement à maîtriser cette variabilité et notamment, à prédire les propriétés en fonction des conditions de production. Ces objectifs sont rendus particulièrement difficiles par la complexité de la structure du bois.

Celle-ci est marquée par une hétérogénéité importante que l'on retrouve à différentes échelles d'observation. Afin d'illustrer cette problématique, nous proposons ici quelques grossissements successifs, exercice que nous pourrions appeler "de l'arbre à la molécule" :

- **A l'échelle de l'arbre**, le tronc est constitué de nombreuses couches concentriques visibles à l'œil nu sur une coupe transversale (Figure 1). Celles-ci, appelées "accroissements" ou "cernes annuels" sont le résultat de l'activité de différenciation cellulaire de l'assise génératrice cambiale (ou cambium) située à l'interface entre l'aubier (2) et le liber (4).

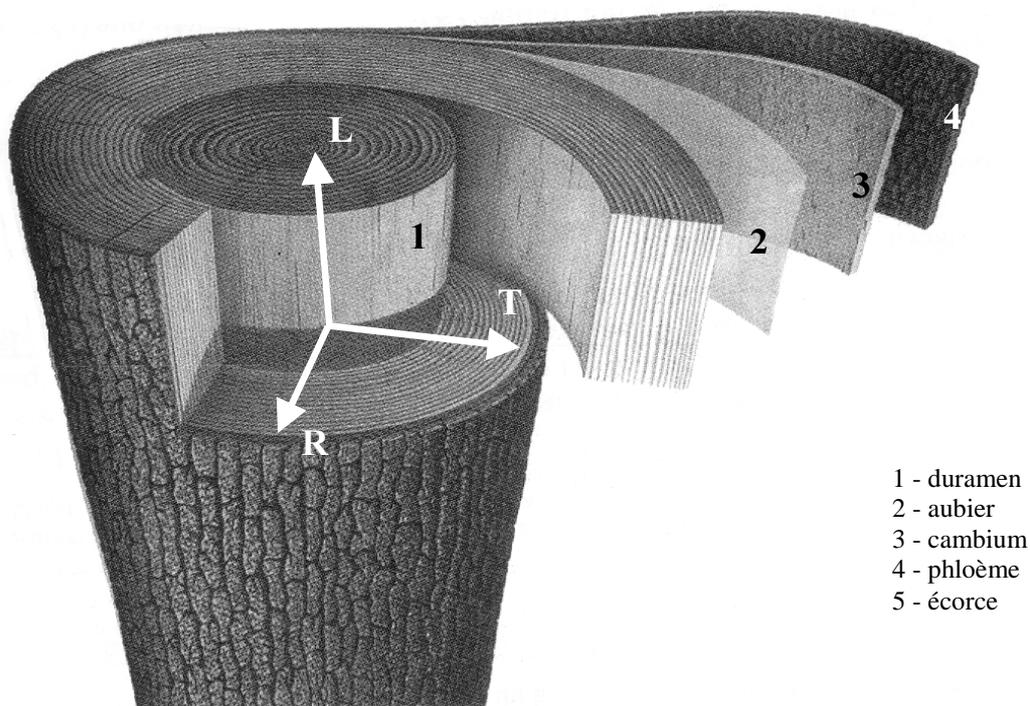


Figure 1 : Structure générale du tronc. On définit 3 plans de symétrie caractérisés par leur vecteur orthogonal. L : direction longitudinale (grand axe du tronc), direction radiale (de la moelle vers l'écorce) et T : direction tangentielle (tangente aux accroissements annuels) (extrait de "la Nature" cité par [Bary-Lenger, 1993])

- **A l'échelle de l'accroissement annuel**, l'observation permet de constater à l'œil nu qu'il est fortement hétérogène. La nature et l'organisation des cellules qui le composent constituent le

"plan ligneux" de l'arbre [Keller, 1994]. Ce caractère, contrôlé génétiquement, diffère d'une espèce à l'autre. Par son hétérogénéité, celui du chêne (Figure 2) est certainement l'un des plus complexes de nos essences européennes.

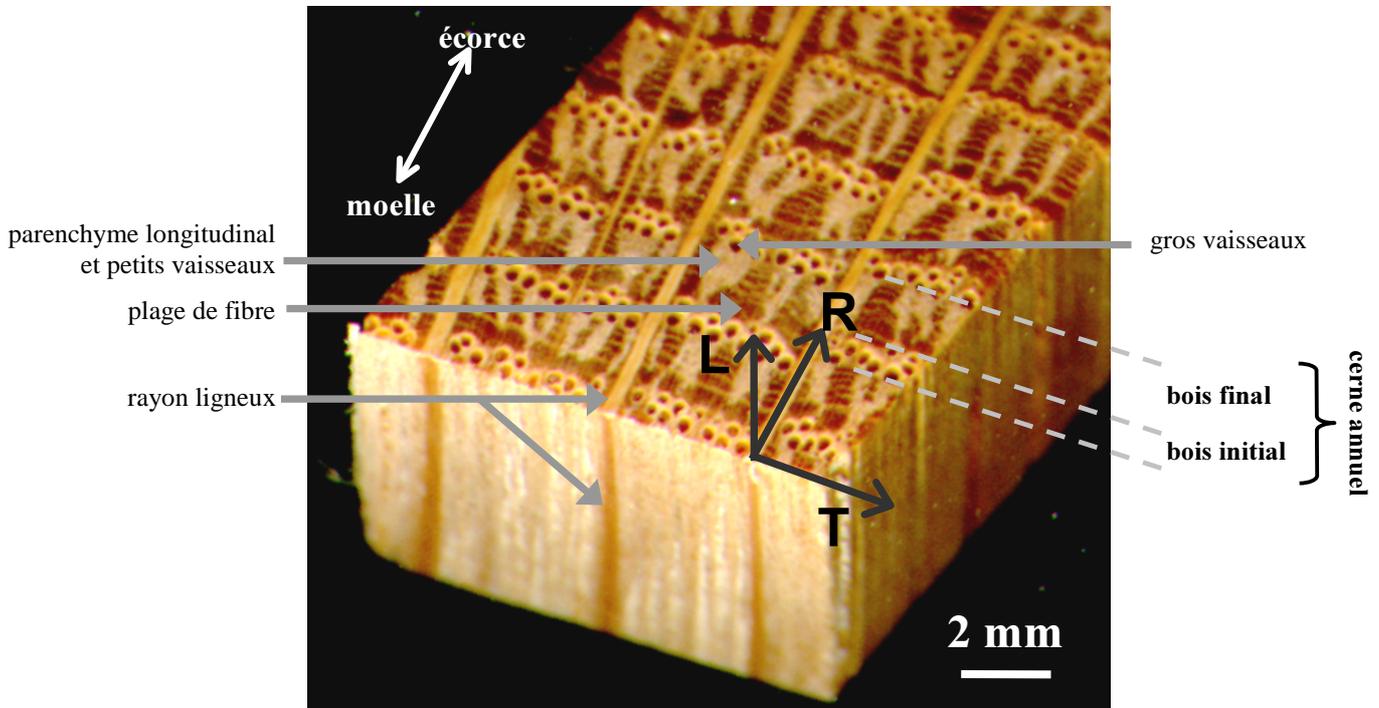


Figure 2 : Structure d'un accroissement annuel de bois de chêne

Un cerne annuel peut être séparé en trois grandes parties :

- la zone initiale poreuse. C'est le bois de printemps, caractérisé ici par ses gros vaisseaux entourés essentiellement de parenchyme longitudinal.
- la zone finale (bois d'été). De densité plus forte, elle est composée de plages de fibres, de parenchyme longitudinal et de petits vaisseaux.
- les rayons ligneux. Leur forme et leur disposition suivant la direction radiale en font des éléments particuliers du plan ligneux. Constitués de cellules de parenchyme radial (cellules dont le grand axe est orienté suivant la direction radiale), ils peuvent être unisériés ou multisériés ; pouvant alors atteindre plusieurs centaines de micromètres d'épaisseur (dans la direction tangentielle) et plusieurs centimètres dans la direction longitudinale.

- **A l'échelle de la plage de tissu**, la forme et l'organisation des cellules qui les composent constituent une autre échelle d'hétérogénéité. La Figure 3 montre un exemple de cette organisation cellulaire dans le cas d'un rayon ligneux (vue dans le plan longitudinal-tangentiel).

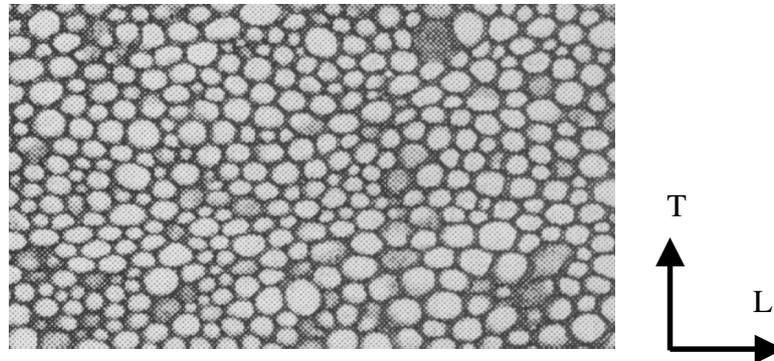


Figure 3 Organisation cellulaire au sein d'une plage de tissus. Cas d'un rayon ligneux plurisériel de chêne dans le plan tangentiel-longitudinal [Schweingruber, 1990]

- **A l'échelle des parois cellulaires**, on observe encore une hétérogénéité, celles-ci étant formées par un empilement de couches qui diffèrent par leur épaisseur et leur composition. En particulier, celles-ci contiennent des microfibrilles (elles-mêmes constituées de macromolécules) noyées dans une matrice. Leur orientation par rapport au grand axe de la cellule est un paramètre capital dans la compréhension de certaines propriétés du bois.

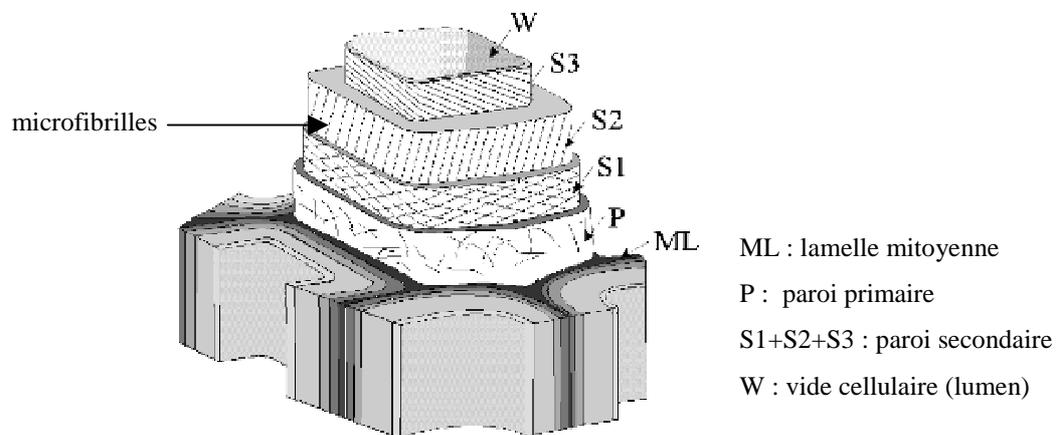


Figure 4 : Structure multi-couches de la paroi cellulaire. Chaque couche est constituée de microfibrilles plus ou moins orientées [Harrington, 1999].

Cette multitude d'échelles spatiales imbriquées les unes dans les autres, que résume la Figure 5, est la première origine de la complexité de l'étude du matériau bois.

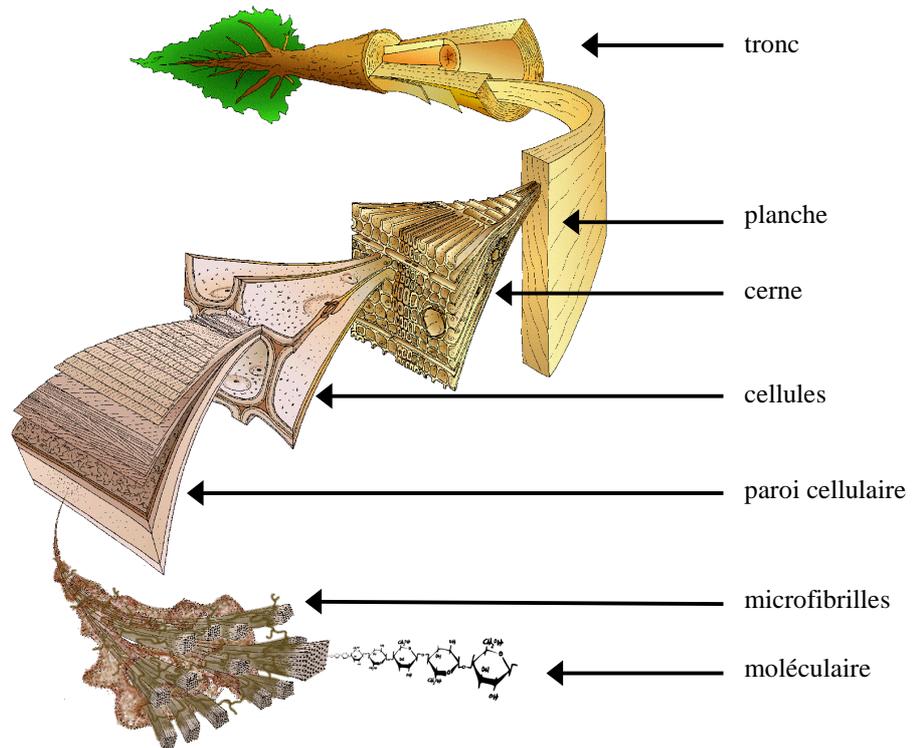


Figure 5 : Différentes échelles d'observation du matériau bois (d'après [Harrington, 1999]).

La variabilité de structures que l'on peut observer à ces différentes échelles s'exprime directement dans celle des propriétés du matériau. Celle-ci est due en grande partie à la diversité des essences qui ont chacune leur propre programme génétique pour la formation de leur matière ligneuse, leur propre *plan ligneux*.

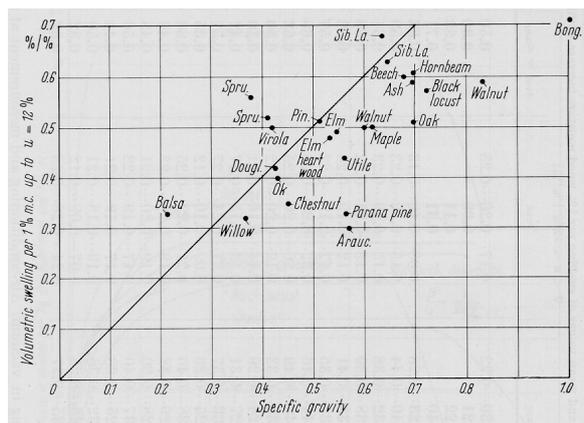


Figure 6 : Variabilité inter-spécifique de la propriété de retrait (d'après Keylwerth cité dans [Kollman and Coté, 1968]).

Si la Figure 6 représente cette variabilité inter-spécifique dans le cas de la propriété de retrait, ces valeurs, moyennes par espèce, réalisées sur un très grand nombre d'échantillons, ne doivent pas cacher la très grande variabilité qui existe encore au sein de chaque espèce (Figure 7a) voire, de chaque individu [Nepveu, 1994] (Figure 7b).

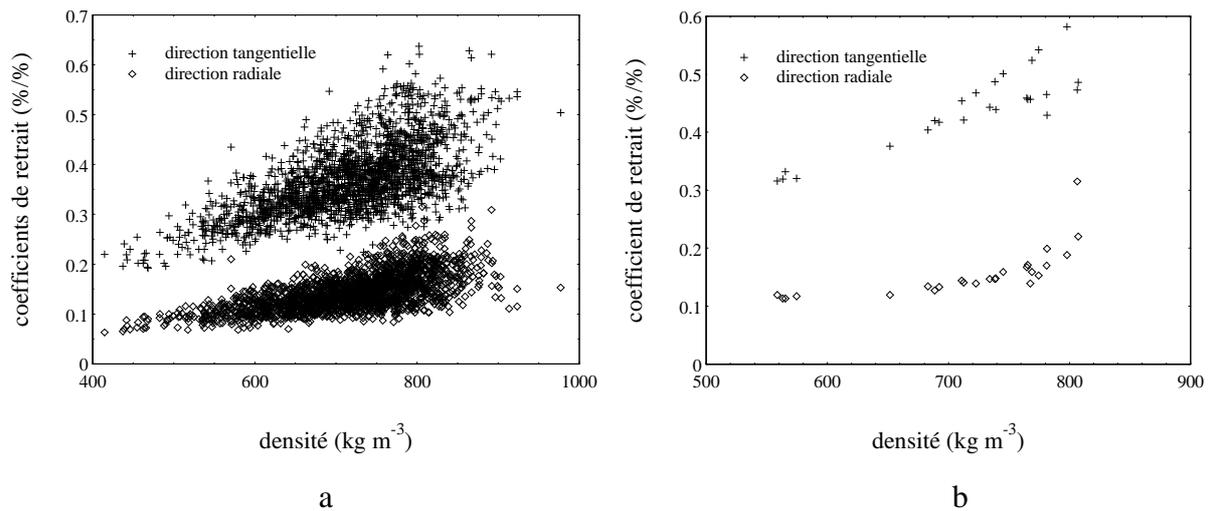


Figure 7 : Variabilité intra-spécifique (a) et intra-arbre (b). Cas de la propriété de retrait du bois de chêne dans les directions radiale et tangentielle (d'après [Guilley, 1999]). Sur la figure (b) est représentée une série de mesures effectuées sur des échantillons prélevés à différentes positions dans un même tronc. On remarque au passage, l'anisotropie marquée entre les directions radiale et tangentielle.

A l'échelle du cerne annuel, la multitude d'expressions anatomiques que l'on peut rencontrer peut certainement expliquer une grande part de cette variabilité. Au sein d'une même espèce, d'un même plan ligneux ou d'un même arbre, celles-ci peuvent varier considérablement en fonction de nombreux facteurs. Suivant les cas, on invoque alors des origines génétiques (génotype) ou des conditions de croissance liées à la station, la sylviculture...

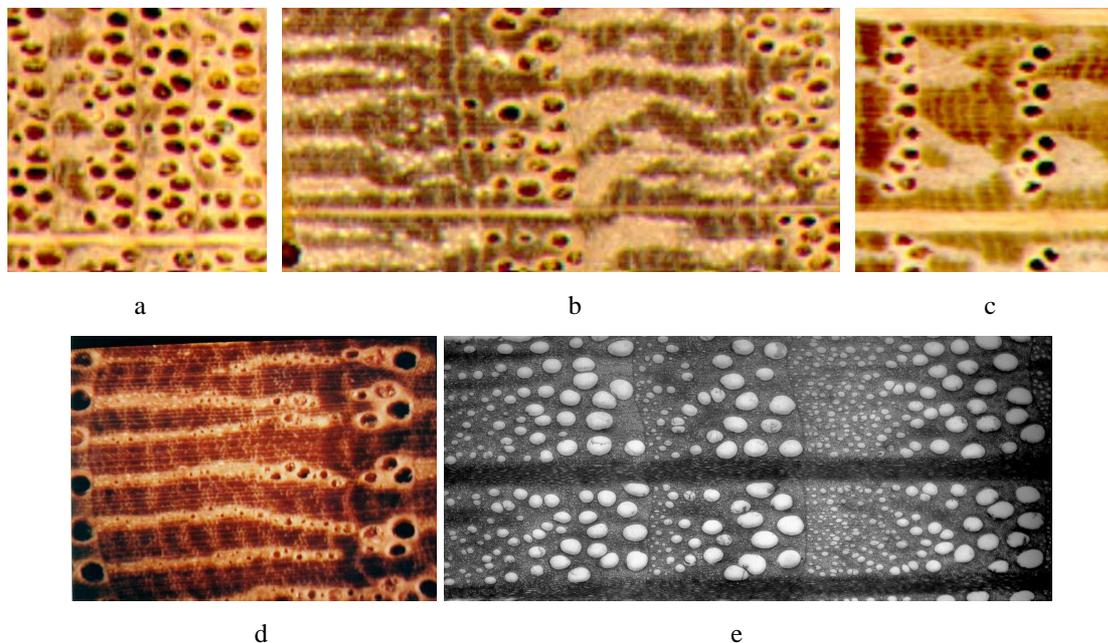


Figure 8 : Exemples d'expressions du plan ligneux du chêne. a: cerne annuel très fin (quasi absence de bois final). b: cerne annuel large et gros vaisseaux très abondants. c: cerne de largeur moyenne et gros rayon ligneux. d: cerne annuel large avec d'importantes plages de fibres. e: chêne paradoxal. le cerne, même large, ne contient pas de plage de fibre ; vaisseaux très abondants. [Thiercelin, 1985]

Face à ces observations, de nombreuses recherches tendent à expliquer ces variations par des paramètres macroscopiques ou microscopiques. On distingue alors deux grands types d'approches. Le premier fait intervenir des facteurs généralement mesurables à l'échelle du tronc, tels que la taille, l'âge, la densité, la largeur de cerne... Ces études statistiques, réalisées sur de très nombreux individus ont pour vocation de prédire des évolutions à l'échelle du peuplement forestier.

Par ailleurs, d'autres proposent des approches mécaniques ou physiques tendant à répondre au "pourquoi" des propriétés observées. Cette approche, souvent théorique, a permis de proposer des modèles de comportement de la structure qui permettent d'expliquer celui du bois [El Amri, 1987], [Gibson et al, 1988], [Koponen et al, 1991]. Plus récemment, Harrington (1998) et Farruggia (1998) se sont appuyés sur des images du matériau afin de prendre en considération l'effet de la structure réelle du bois.

C'est dans ce cadre que notre étude se situe.

L'ambition de ce travail est donc d'avancer dans la compréhension de la variabilité observée sur les propriétés mécaniques et de retrait du bois de chêne¹ en prenant en considération les influences de l'organisation de la structure du cerne annuel et des propriétés individuelles, dites alors "microscopiques", de ses différents composants.

Cette approche déterministe, nécessite la connaissance de deux grands types de données :

- **la "morphologie"**. Cette information contient la définition des éléments structuraux ainsi que leur distribution spatiale au sein de la cellule de base hétérogène qu'est le cerne annuel.
- **les "propriétés microscopiques"**. Il s'agit de la caractérisation des propriétés intrinsèques de chacun des constituants.

¹ Il sera conseillé au lecteur peu habitué au comportement mécanique et au retrait du bois de se reporter aux annexes 1 et 2 situées à la fin du manuscrit.

L'assemblage de ces connaissances complémentaires peut alors être envisagé à l'aide de techniques mathématiques qui, à partir de ces paramètres, permettent de calculer les propriétés, dites "macroscopiques" d'une structure hétérogène (Figure 9). Si ce type d'approche existe depuis de nombreuses années dans le domaine des sciences des matériaux, l'apparition des techniques d'homogénéisation, couplées avec les moyens numériques actuels permettent maintenant de résoudre les problèmes sur des structures très complexes.

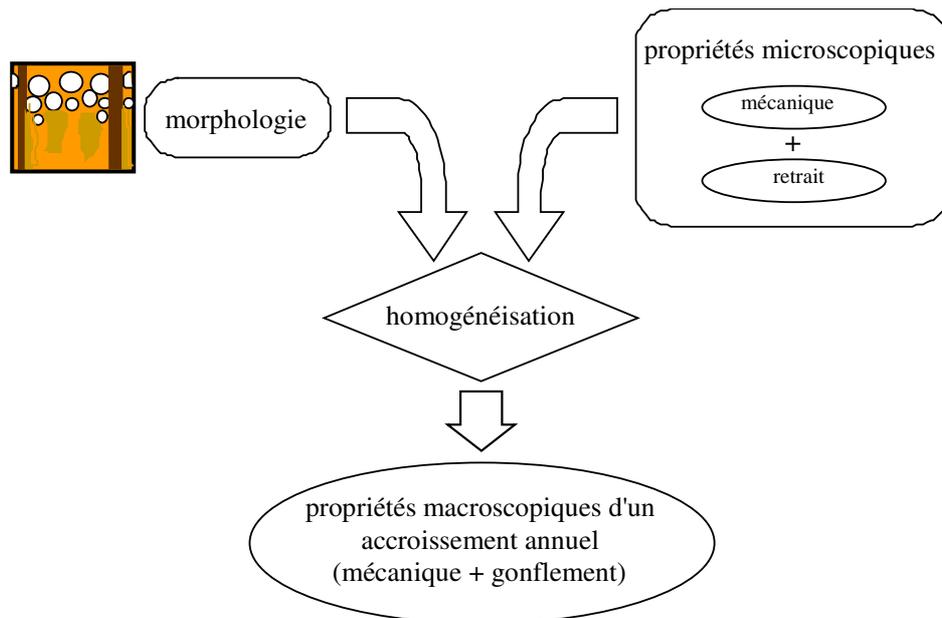


Figure 9 : Principe de l'homogénéisation. La connaissance des propriétés individuelles des constituants ainsi que leur distribution spatiale permet de calculer les propriétés d'une structure hétérogène.

Le présent travail consiste à mettre en place les outils nécessaires à cette étude. En particulier, les besoins d'investigation spécifiques mènent au développement de dispositifs expérimentaux qui le sont tout autant. Il sera donc articulé en trois grandes parties bien distinctes qui s'organisent suivant le schéma de la Figure 9 :

- ◆ caractérisation de la morphologie des plans ligneux à l'échelle de l'accroissement annuel. Celle-ci est effectuée à partir d'images réalisées par atténuation d'un rayonnement X. A cette fin, un dispositif d'imagerie X sera spécialement développé.
- ◆ caractérisation expérimentale des propriétés microscopiques des principaux éléments constitutifs du plan ligneux du chêne. Dans le cadre de cette étude, où les propriétés

mécaniques et de retrait sont au centre de nos préoccupations, cette partie est divisée en deux chapitres.

- Le premier consiste en la mesure de propriétés mécaniques par des essais de traction sur des micro-éprouvettes.
 - Le second utilise le dispositif d'imagerie X précédemment développé et adapté afin d'évaluer les propriétés de retrait.
- ◆ calcul des propriétés macroscopiques d'accroissements annuels à partir des paramètres précédemment décrits par l'utilisation d'un outil numérique d'homogénéisation.

1^{ère} Partie :

*Description de la morphologie du plan ligneux du
bois de chêne à l'échelle de l'accroissement annuel*

CHAPITRE I

DEVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF D'IMAGERIE X

Il manipulait un tube cathodique de Hittorf-Crookes, entièrement entouré de papier noir; dans une pièce obscure. Une feuille de papier traitée au platinocyanure de baryum se trouvait sur une table voisine. Röntgen la vit fluorescer. L'effet venait du tube. Il éloigna l'écran jusqu'à 2 mètres, la fluorescence persista; puis il interposa divers objets, puis sa main dont il vit alors les os sur l'écran. La radiographie X était née.

8 Novembre 1895

1 Introduction

Le modèle de prédiction des propriétés mécaniques et de retrait propose de tenir compte de la structure du chêne à l'échelle de l'accroissement annuel. Le bois est considéré comme un matériau composite dont les phases sont définies par les différents types de tissus qui le composent. Les paramètres du modèle sont alors les propriétés microscopiques intrinsèques de chacun des constituants et leur agencement à l'échelle du volume représentatif.

L'objectif de ce chapitre est donc la mise au point d'un dispositif permettant d'établir une cartographie intra cerne des éléments en présence. Le résultat, après différenciation des tissus, devra alors refléter au mieux la structure réelle du chêne. La recherche de la plus haute résolution spatiale sera donc l'un des maîtres mots de ce travail.

Les techniques non destructives et sans contact permettant d'observer la structure interne d'objets opaques sont peu nombreuses. Les deux grandes voies actuelles sont l'Imagerie par Résonance Magnétique Nucléaire et les rayons X.

1.1 *La Résonance Magnétique Nucléaire*

Si la Résonance Magnétique Nucléaire est née en 1950 [**Hahn, 1950**], l'imagerie par RMN a fait ses débuts dans les années 70 et connaît depuis un essor considérable. La possibilité qu'elle offre d'observer la structure de certains corps en 3 dimensions, et en particulier à l'intérieur du corps humain, est à l'origine de ce succès. Le principe physique consiste à exciter les protons, caractérisés par leur moment magnétique (ou spin), par l'action d'un champ magnétique intense. L'orientation du spin passe alors d'une direction aléatoire à dirigée, le proton d'un état énergétique à un autre. L'intensité de l'excitation dépend de celle du champ magnétique appliqué ainsi que de l'élément considéré. L'hydrogène, présent dans presque tous les matériaux est l'un des éléments les plus facile à stimuler.

La relaxation, retour à l'équilibre des protons, est liée à leur mobilité. Ceux de la phase solide ont une durée d'excitation beaucoup plus courte que ceux des phases gazeuse ou liquide. Leur détection en est alors rendue plus difficile [**Grenier, 1999**].

Pour une application aux sciences du bois, alors que la RMN dite "solide" reste donc encore du domaine de la recherche [Hall et al, 1986], la technique semble très prometteuse pour la détermination du champ de teneur en eau. On citera alors les travaux de **Chang et al (1989)**, **Olson et al (1990)** et **François et al (1997)**.

1.2 Les rayons X

Depuis leur découverte par Röntgen en 1895, les rayons X (photons de haute énergie) sont devenus une technique standard pour la détermination de détails structuraux de l'intérieur des objets opaques. Leurs applications sont nombreuses et font intervenir divers phénomènes d'interaction rayonnement - matière (diffraction, diffusion, absorption...). Nous limiterons ici l'exposé à la propriété qu'a la matière d'atténuer les rayonnements X en fonction de sa composition atomique. Le principe consiste donc à émettre un faisceau X d'intensité I_0 sur un objet. Celui-ci, par diverses interactions, n'en transmet qu'une partie I . L'atténuation est simplement définie par le rapport I/I_0 . Si les rayons X sont presque toujours produits suivant le même principe physique, il existe de nombreuses techniques pour détecter leur rayonnement, invisible à l'œil nu. Nous ne citerons ici que les plus couramment utilisées :

- les écrans fluorescents : les rayons X ont la propriété de rendre fluorescentes certaines substances qui, déposées sur un écran, émettent, sous l'action d'un faisceau X, une lumière d'autant plus intense que l'intensité du rayonnement X incident est grande. C'est le principe de la radioscopie.

- les émulsions photographiques : les rayons X impressionnent les films photographiques. Le principe repose sur l'absorption du rayonnement X par le film. Les grains de Bromure d'Argent sont alors émulsionnés, provoquant, après développement, un noircissement du film. L'intensité de celui-ci est directement lié à la quantité d'énergie absorbée pendant l'exposition. La mesure du noircissement peut être réalisée à l'aide d'appareillages spécifiques tels le photomètre (ou densitomètre). C'est le principe de la radiographie. Si les films photographiques offrent une grande résolution spatiale (choix de grains fins), leur saturation progressive, due au fait qu'un grain ne peut être excité qu'une seule fois, est un inconvénient majeur.

- les chambres à ionisation : un faisceau X traversant un gaz y crée des ions. Deux électrodes (+ et -) se trouvant dans la chambre attirent les particules respectivement négatives et positives, créant un courant proportionnel à l'énergie du faisceau X absorbé.
- les chambres à fil : le principe est identique à celui des chambres à ionisation. La grande différence réside dans le fait que l'une des électrodes est un fil plongé dans le gaz. Chaque photon libère une quantité d'électrons proportionnelle à son énergie. Le compteur fonctionne alors en régime "proportionnel".
- les capteurs CCD : de technologie récente les capteurs CCD (Charge Coupled Device) peuvent détecter directement le rayonnement X. Ils sont cependant souvent associés à des convertisseurs qui transforment le rayonnement X en rayonnement lumineux visible (cette option étant celle que nous avons adoptée, de plus amples détails seront donnés dans la suite du chapitre).

Ces capteurs permettent la réalisation de profils 1D (chambre à fil, détecteurs linéaires état solide) ou 2D (écrans, films, CCD). Cependant, on ne peut omettre de mentionner les techniques de tomographie. Le dispositif (émetteur-détecteur), en rotation autour de l'objet (ou l'inverse : émetteur-détecteur fixe et objet en rotation sur lui même), réalise de nombreux profils 1D (ou images 2D). La "*reconstruction*" est alors l'opération spécifique qui permet de générer, à l'aide de ces nombreuses acquisitions, la structure interne 2D (ou 3D) de l'objet [McNay, 1996].

Les évolutions les plus marquantes en matière d'imagerie X sont relativement récentes. Les sources X sont devenues plus stables, la taille de leur spot d'émission n'a cessé de diminuer offrant ainsi une amélioration de la résolution spatiale, les films radiographiques font progressivement place aux caméras CCD [Cazaux et al, 1994] et la tomographie connaît un succès grandissant. Les résultats les plus spectaculaires en matière de résolution spatiale sont actuellement réalisés grâce à l'utilisation d'un rayonnement synchrotron (ESRF) produisant un faisceau X parallèle (divergence de quelques micro-radians) de très haut flux. Les résolutions spatiales obtenues sont de l'ordre du micron [Peyrin et al, 1997].

Le principe de l'atténuation d'un rayonnement X est celui qui apparaît le mieux adapté à notre objectif de "cartographie" 2D du plan ligneux du bois de chêne. Si il permettra de séparer les

tissus par leur différence d'absorption, il est de plus envisageable d'en évaluer leur densité, paramètre explicatif de propriétés bien connu en sciences forestières. Le principe de la projection 2D est rendu possible grâce à la structure quasi 2D du bois à l'échelle d'observation qui nous intéresse. A notre échelle d'observation, le rayon X traverse alors un matériau homogène dans son épaisseur.

Dans le domaine de la recherche forestière, les investigations sont schématiquement de deux ordres :

- A l'échelle de la grume, les industriels sont intéressés par l'obtention d'informations sur la structure interne du billon afin, par exemple, d'en optimiser le débit. Les soucis sont alors la détermination de la zone de bois de cœur et la localisation de défauts tels que les nœuds ou les zones de pourriture éventuelle [**Saint André, 1998**]. Actuellement, l'utilisation des scanners X semble la voie la plus prometteuse [**Lindgren, 1992**] [**Davis et al, 1993**] et ceux-ci commencent à faire leur apparition sur le marché.
- A une autre échelle, plus fine et généralement restreinte aux laboratoires, l'objectif de l'observation s'inscrit fréquemment dans la recherche de la compréhension du comportement du bois en fonction de sa structure (propriétés mécaniques, migration de liquide...). Les techniques X sont alors utilisées depuis de nombreuses années. **Polge (1966)** a mis au point un dispositif permettant de réaliser des radiographies à des fins de micro-densitométrie. Ce principe a ensuite été largement utilisé pour d'autres applications comme par **Sano et Fukazawa (1990)** qui ont observé la distribution de l'eau dans une rondelle ou **Tokuda (1994)** qui étudia la formation des fentes. **Hoag et McKimmy (1988)** ont évolué vers des techniques de détection directe afin de supprimer les multiples étapes dues à l'utilisation des films. Depuis, les avancées technologiques (surtout en matière de résolution spatiale) n'ont cessé de faire progresser ces méthodes qui, outre l'intérêt de l'acquisition directe et rapide de données numériques [**Evans, 1994**], offrent la possibilité d'études dynamiques telles que le suivi de la migration de l'eau dans le bois [**Perré et Thiercelin, 1997**].

Ce chapitre décrit les choix technologiques et de conception d'un dispositif expérimental d'imagerie par atténuation d'un rayonnement X polychromatique. Ce matériel a deux vocations bien distinctes :

- La première consiste en l'imagerie de la structure anatomique du chêne à l'échelle de l'accroissement annuel. L'objectif est ici la visualisation et la séparation des composants principaux du plan ligneux, possibilité offerte par leur différence de densité et donc de propriété d'absorption des rayons X. Dans cette étude, statique, *le contraste* (signal) sera le paramètre à privilégier.
- Dans un deuxième temps, il est envisagé de réaliser des images d'échantillons microscopiques (volume $< 1\text{mm}^3$) et de suivre l'évolution de leur taille en fonction du taux d'humidité (Chapitre III). Les très faibles dimensions et variations en jeu dans ce phénomène (le *retrait*) requièrent alors une *résolution spatiale maximale*.

La conception du dispositif doit donc répondre à ces deux objectifs.

2 Généralités sur les rayonnements X

2.1 Production

Les rayons X sont formés par des ondes électromagnétiques transversales qui se propagent en ligne droite. Leur longueur d'onde peut varier de 0.0001 à 1000 Å mais les rayonnements les plus couramment utilisés ont une longueur d'onde comprise entre 0.001 et 2.5 Å.

Si il existe différents moyens de produire des rayons X, le plus couramment utilisé consiste à animer des électrons d'une vitesse élevée (générée par une différence de potentiel V entre une cathode et une anticathode) puis à les freiner brutalement par l'anode (Figure 10).

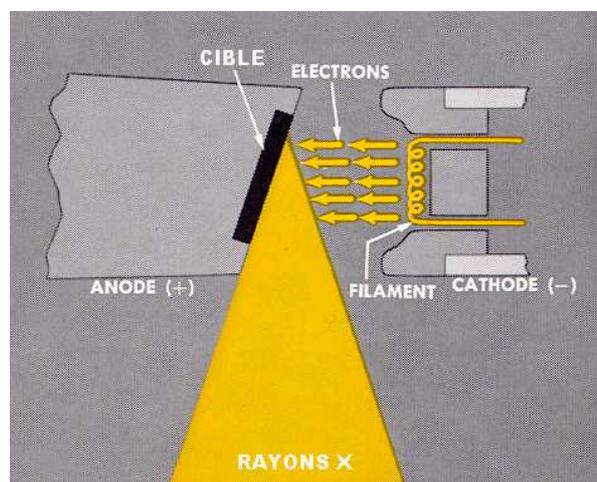


Figure 10 : Schéma d'un tube à rayons X (d'après [Eastman Kodak Company, 1969])

Le faisceau de rayons X créé est formé d'un ensemble de photons dont l'énergie est liée à leur fréquence par la relation $E=h\nu$. Le rayonnement émis n'est pas constitué d'une longueur d'onde unique bien déterminée mais comprend toute une gamme de longueurs d'onde (Figure 11). L'énergie maximum d'un photon X ne peut être supérieure à celle de l'électron avant freinage sur l'anticathode ($E_{\max}=eV$). Il en résulte que le spectre des fréquences débute à une longueur d'onde minimale λ_{\min} telle que :

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{E_{\max}} = \frac{hc}{e V \cdot 10^{-8}} \text{ ou } \lambda_{\min} = \frac{12\,400}{V} \quad \text{Eq : 1}$$

c : célérité de la lumière

e : charge de l'électron

V : tension accélératrice (volt). Différence de potentiel appliquée entre la cathode et l'anticathode du tube

λ : longueur d'onde (Å)

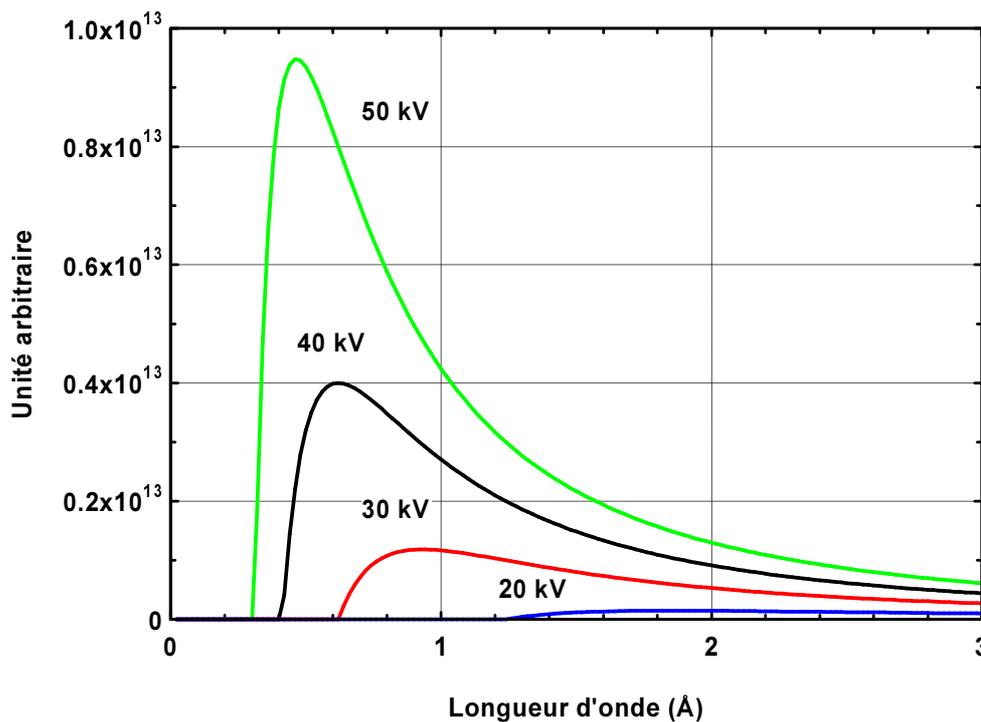


Figure 11 - Variation du spectre continu en fonction de la tension d'alimentation du tube (d'après [Perré et Thiercelin, 1997]).

Le maximum d'intensité correspond à une longueur d'onde de l'ordre de $1.5 \lambda_{\min}$. L'intensité du rayonnement d'une longueur d'onde donnée croît avec la tension. L'énergie totale du spectre (aire contenue sous chacune des courbes de la Figure 11) est proportionnelle à ZV^2 (Z étant le numéro atomique du constituant de l'anticathode) [Guinier, 1964].

A ce spectre continu se superpose un spectre de raies caractéristique de la nature de l'anticathode. Ces raies correspondent à des sauts d'énergie d'électrons entre les couches internes des atomes constituant l'anticathode.

2.2 Atténuation

Les rayons X sont atténués différentiellement par la matière en fonction de leur énergie et de la nature du matériau traversé. La Figure 12 résume les principaux processus qui entrent en compétition au cours de l'interaction entre les photons X et la matière.

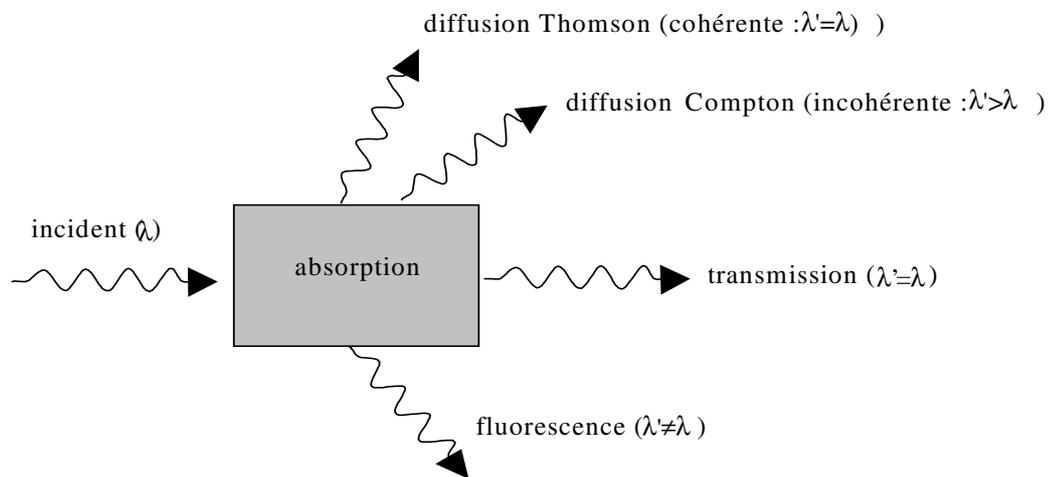
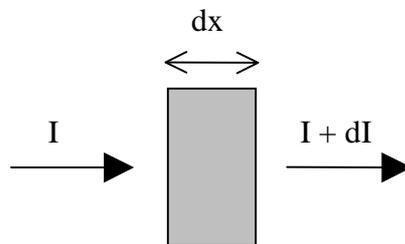


Figure 12 : Principaux processus d'interaction entre le photons X et la matière

Ces interactions rayonnement – matière concourent donc à une réduction du flux incident. Lorsqu'un flux photons X monochromatique pénètre la matière homogène (Figure 13), son intensité I décroît exponentiellement avec la quantité de matière traversée :



$$\frac{dI}{I} = -\mu_i dx \quad \text{Eq : 2}$$

Figure 13 : Evolution de l'intensité d'un rayonnement X monochromatique à travers la matière

Le paramètre μ_l , appelé coefficient d'atténuation linéique, dépend de la longueur d'onde du rayonnement incident et de la nature du matériau. L'absorption des rayons X par la matière est un phénomène atomique ; le coefficient d'atténuation étant approximativement proportionnel à Z^3 . Pour un composé $A_{y_1}B_{y_2}$, il ne dépend pas du mode de liaison des constituants et est simplement la somme des différents coefficients pondérée par leur proportion. Il s'écrit donc :

$$\mu_l = \frac{y_1 a \mu_1 + y_2 b \mu_2}{y_1 a + y_2 b} \quad \text{Eq : 3}$$

μ_l, μ_1, μ_2 : coefficients d'atténuation linéique

a, b : poids atomique des constituants

On peut aussi faire intervenir le coefficient d'atténuation massique μ_m lié au précédent par la relation :

$$\mu_m = \frac{\mu_l}{\rho}$$

ρ : densité de l'élément traversé

Pour un rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ , on écrit :

$$\frac{dI(\lambda)}{I(\lambda)} = -\mu_m(\lambda) \rho dx \quad \Rightarrow \quad \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-\mu_m(\lambda) \rho x} \quad \text{Eq : 4}$$

Pour un matériau donné, le coefficient d'atténuation massique varie comme le cube de la longueur d'onde du rayonnement. Cette loi est valable aux basses énergies où l'atténuation par effet photoélectrique est prédominante. Dans le cas contraire, il est nécessaire de tenir compte de l'effet Compton qui suit une autre loi.

Dans le cas d'un rayonnement polychromatique, il est nécessaire de tenir compte de la distribution spectrale $I(\lambda)$ émise par le tube à rayons X. La relation précédente (Eq : 4) doit être alors intégrée et s'écrit :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^{\infty} I_0(\lambda) e^{-\mu_m(\lambda) \rho x} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_0(\lambda) d\lambda} \quad \text{Eq : 5}$$

Cette équation, beaucoup plus complexe que dans le cas monochromatique, ne sera pas utilisée dans ce travail. Il faut cependant garder à l'esprit que ce sont ces valeurs intégrales (I et I_0) qui seront mesurées par le dispositif.

3 Dispositif expérimental

3.1 Principe de la projection et défauts inhérents à prendre en considération

La radiographie est une projection bidimensionnelle d'un objet tridimensionnel. L'image obtenue est une fonction de l'objet, intégrée sur son épaisseur tout au long de la traversée de cet objet par les rayons X. Les dispositifs expérimentaux sont tous, depuis Röntgen, conçus sur le même schéma source – échantillon – détecteur. Pour le dispositif envisagé, il est techniquement possible d'utiliser une caméra à CCD pour effectuer une détection directe, positionnée dans l'axe source – échantillon. Cependant, malgré les protections installées sur ce type de matériel, le CCD se détériore rapidement sous le rayonnement X. Nous avons donc opté pour une solution basée sur la conversion du rayonnement X, après atténuation par l'échantillon, en rayonnement lumineux visible. Cette conversion est assurée par le *scintillateur*. Ce nouveau rayonnement peut ainsi être dévié vers le CCD par un dispositif optique (Figure 14) ; ceci afin de protéger le détecteur du flux de rayons X.

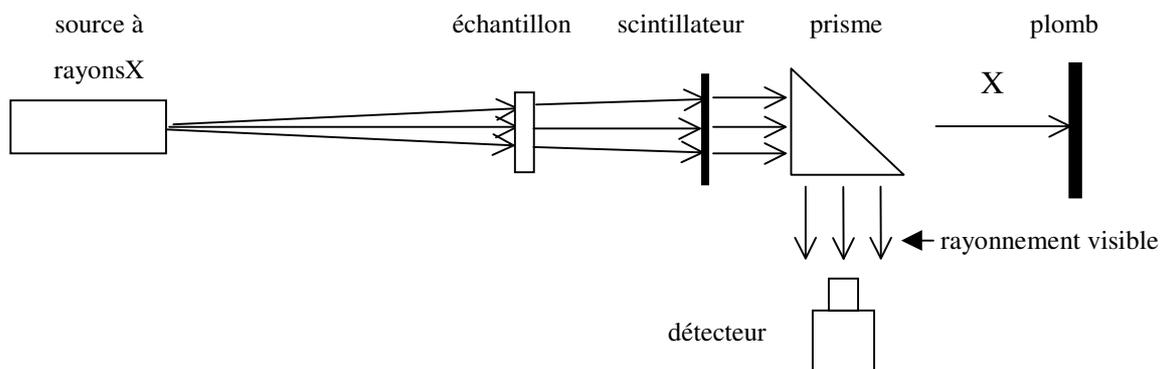


Figure 14 : Schéma de principe de la projection par faisceau X et détection après conversion en rayonnement lumineux visible. Le faisceau X pénétrant (non absorbé par l'échantillon et les divers éléments du dispositif) est stoppé par une plaque de plomb.

Si le principe de la projection X est maintenant centenaire, celui de la détection tel qu'il est décrit ici requiert un matériel spécifique, récent et en constante évolution. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons détailler les paramètres importants, inhérents à ce

principe, qui doivent être pris en considération lors du dimensionnement du dispositif ainsi que pour le choix du matériel.

3.1.1 Flou dû à la taille du foyer

L'effet de grossissement par les rayons X, réalisé en modifiant la position de l'échantillon entre la source et l'écran, ne peut être utilisé qu'au détriment de la résolution spatiale sur le détecteur. Ce flou géométrique est la conséquence d'une source de dimension finie, par opposition à la source idéale ponctuelle. Proportionnel à la taille de la source (Figure 15), il est également lié au grandissement introduit par les positions relatives de la source, de l'objet et de l'écran.

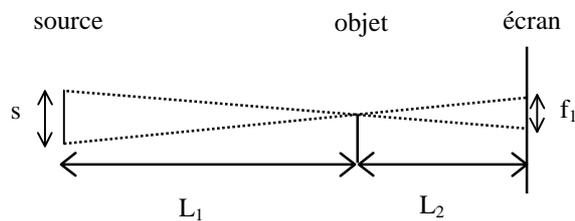


Figure 15 - Influence des dimensions de la source sur le flou

Les paramètres en jeu (dont nous garderons les notations tout au long de ce chapitre) sont donc :

L_1 : distance source-objet

L_2 : distance objet-écran (scintillateur)

s : diamètre du spot émetteur de la source

f_1 : flou

Le flou f_1 généré sur l'écran peut s'exprimer en fonction du grossissement G réalisé par les rayons X :

$$G = \frac{L_1 + L_2}{L_1}$$

$$f_1 = s (G - 1)$$

Celui-ci, ramené aux dimensions réelles de l'objet, s'écrit :

$$f_2 = \frac{f_1}{G} = \frac{(G-1)}{G} \times s$$

La taille de la source d'émission est donc la limite supérieure de f_2 atteinte lorsque le grossissement effectué tend vers l'infini. Elle apparaît ici comme le paramètre essentiel limitant physiquement la résolution spatiale.

3.1.2 Flou dû à l'épaisseur de l'échantillon

Le principe même de la projection X conduit à un résultat qui intègre l'information tout au long de la traversée de la matière.

La structure anatomique du bois entre donc en compte de manière très importante dans le choix du dimensionnement. En considérant une tranche suffisamment fine découpée dans le sens transversal par rapport au tronc de l'arbre, nous pouvons faire l'hypothèse que la structure 3D peut se ramener à deux dimensions. En effet, hormis les cellules constituant les rayons ligneux, la structure du bois peut être schématisée comme un assemblage de cylindres de différents diamètres, tous orientés suivant le même axe, celui du tronc (Figure 16). Cette propriété importante permet de supposer qu'un faisceau parfaitement orthogonal au plan transverse de l'arbre traverse alors un matériau homogène dans toute l'épaisseur.

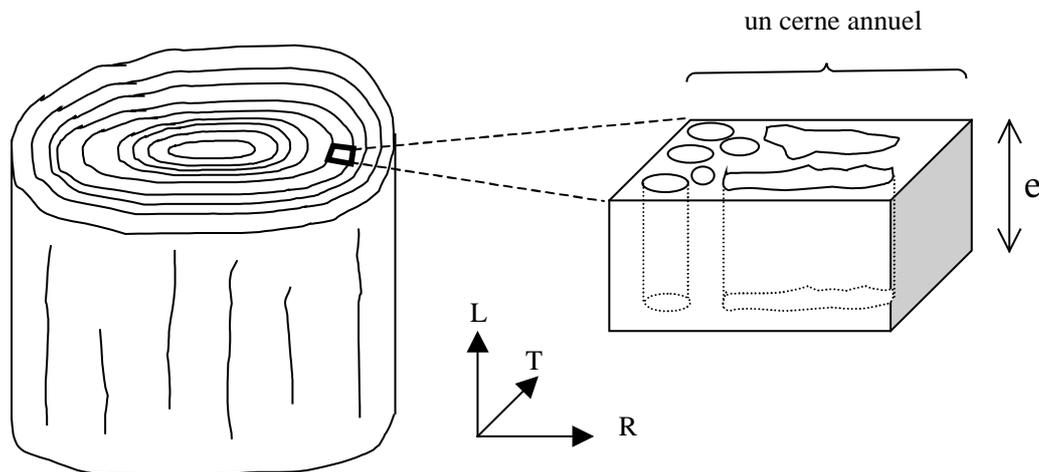


Figure 16 : Schéma de la structure quasi 2D du bois de chêne

Cependant en raison de la conicité du faisceau, il n'existe qu'un seul point théorique de l'objet qui puisse remplir ces conditions. Le flou qui en résulte se calcule géométriquement (Figure 17) :

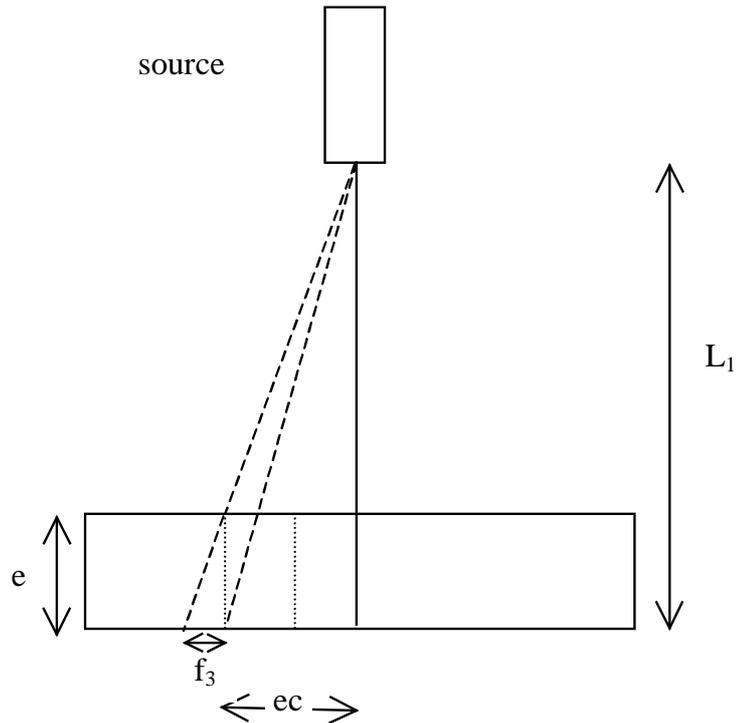
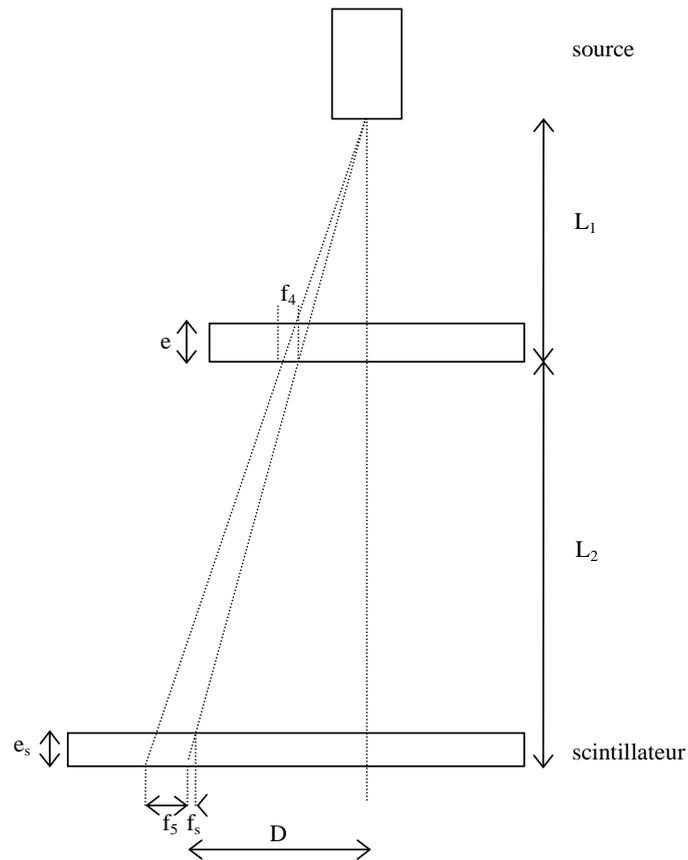


Figure 17 : Flou géométrique dû à la conicité du faisceau incident

$$f_3 = \frac{ec \times e}{L_1 - e} \approx \frac{ec \times e}{L_1} \quad \text{Eq : 6}$$

3.1.3 Flou dû à la résolution du scintillateur

Le choix du scintillateur est complexe en raison de la multitude de paramètres à prendre en considération. Cependant, le calcul réalisé précédemment (§ 3.1.2) sur le flou dû à l'épaisseur de l'échantillon reste valable pour le scintillateur. Quelle que soit la nature et la finesse de la matière active employée (déterminée par exemple par la taille du grain), une augmentation importante de son épaisseur implique une diminution proportionnelle de la résolution spatiale. En reprenant les notations du paragraphe § 3.1.1, ce flou s'écrit :



$$f_s = \frac{D \times e_s}{L_1 + L_2} \text{ (cf Eq. 6)}$$

$$\text{et } f_5 = G f_4$$

D : excentricité sur le scintillateur

e_s épaisseur du scintillateur

G : grossissement par rayons X

f_4 : flou dû à l'épaisseur de l'échantillon

f_s et f_5 étant additifs, et en remarquant que $f_4/e = (D+f_5)/(L_1+L_2)$, on obtient finalement le flou total F sur le scintillateur :

$$F = f_s + f_5 = \frac{D e_s}{L_1 + L_2} + \frac{D G e}{L_1 + L_2 - G e} \approx \frac{D}{L_1 + L_2} (e_s + G e)$$

qui, ramené aux dimensions réelles de l'objet, s'écrit :

$$f = \frac{F}{G} \approx \frac{D}{L_1 + L_2} \left(\frac{e_s}{G} + e \right)$$

Les flous géométriques ne sont pas les seules causes d'une mauvaise résolution spatiale. Nous verrons plus loin que d'autres paramètres, inhérents à la conception du matériel, jouent un rôle déterminant.

3.1.4 Bruit expérimental

Le bruit peut avoir différentes origines. Si certaines lumières parasites peuvent être limitées par une conception hermétique du dispositif, d'autres ne peuvent être évitées. En particulier, les rayons cosmiques ont une énergie telle qu'ils traversent les protections, même en plomb, qui protègent le couple scintillateur – détecteur. Nous verrons ultérieurement, qu'un traitement d'image permet cependant de limiter fortement leur influence.

Les autres principales sources de bruit sont liées d'une part à la détection, et en particulier aux caractéristiques techniques du matériel utilisé (courant d'obscurité, bruit de lecture...) et d'autre part au mécanisme d'émission des photons qui, suivant une loi de Poisson, génère un bruit quantique évoluant statistiquement en fonction de la racine carrée du nombre de photons. Pour un flux de la source X donné, ce nombre diminue comme le carré de la distance source-scintillateur. Ce dernier paramètre ne doit pas être négligé si nous espérons réaliser les images avec des durées d'acquisition relativement faibles.

3.1.5 Hétérogénéité d'éclairage

Le rayonnement émis par une source X n'est pas isotrope. Le faisceau incident arrivant sur l'écran est donc non homogène [Guinier, 1964]. De même, la variation de la distance d'irradiation suivant le point considéré sur le scintillateur génère une hétérogénéité spatiale de l'intensité d'éclairage [Polge, 1966]. Cependant, les dimensions du scintillateur sont si faibles au regard de la distance qui le sépare de la source que ces considérations peuvent être négligées. Par contre, le matériel optique (objectif de la caméra) génère, lui, une non uniformité d'éclairage importante sur le CCD.

Ici encore, un traitement d'image spécifique doit être réalisé afin de corriger ce défaut.

3.2 Choix technologiques du matériel

3.2.1 Source X

La limitation de la résolution spatiale des scintillateurs peut être contournée en agrandissant l'image avant de la convertir en rayonnement visible. Ceci est possible à condition d'utiliser une source dont le spot d'émission est de faible taille. Le matériel choisi (Hamamatsu Photonics ; L6781-01), émet le rayonnement à partir d'un spot mesuré de $8\mu\text{m}$ de diamètre. Cette dimension permet d'envisager des grossissements importants en restant dans les limites de résolution spatiales recherchées. L'équipement comprend un tube d'émission X et une unité de contrôle. Celle-ci permet d'ajuster indépendamment la tension accélératrice (entre 8 et 80 kV) entre la cathode et l'anticathode et l'intensité du courant. L'anticathode est en Tungstène. Ce matériau, de numéro atomique très élevé ($Z = 74$), contribue ainsi à un meilleur rendement de la source (§2.1). La très faible taille du spot induit une contre partie technique qui limite le courant maximum pouvant circuler dans le filament du tube X (ici $100\mu\text{A}$). Le faible flux qui en résulte a une conséquence directe sur l'allongement de la durée d'exposition. Ce point devra être pris en compte dans la conception du dispositif et particulièrement lors du dimensionnement.

La fenêtre est en Beryllium, matériau de poids atomique extrêmement bas ($Z = 4$) et de très faible épaisseur ($150\mu\text{m}$). Ceci permet d'éviter au mieux l'atténuation du flux total émis par la source, et notamment dans les gammes de radiations de faible énergie.

3.2.2 Détecteur

Le détecteur doit enregistrer le signal émis par le scintillateur. Celui-ci étant très faible, il est nécessaire d'accumuler ce signal sur le capteur pendant une longue période, typiquement plusieurs dizaines de minutes. Cette contrainte implique l'utilisation de matériel spécifique dont le bruit de lecture et le courant d'obscurité sont les plus faibles possibles. A cette fin, le capteur doit être refroidi à basse température. Si certaines caméras permettent de travailler à -100° , l'utilisation d'une circulation d'azote liquide rend la maintenance lourde alors qu'un élément à effet Peltier associé à un simple ventilateur à air permet de descendre à -35° , réduisant déjà considérablement le bruit.

La caméra fabriquée par Princeton Instruments (RTEA/CCD-1317-K) est conçue avec une possibilité de refroidissement du CCD régulé par 3 étages Peltier jusqu'à -40° . Le courant d'obscurité est ainsi réduit à moins de 15 électrons/pixel/heure. Le bruit de lecture est d'environ 8 électrons (à 500 kHz) pour un volume du puit de 45 000 électrons, conférant ainsi une dynamique de 5600. Ce matériel est basé sur un détecteur Kodak KAF-1400 de haute résolution (1317*1035 pixels de 6.8 μm de côté) et est pilotée par un PC sur lequel sont enregistrées les données via un contrôleur. La gamme spectrale de détection est comprise entre 400 et 1080 nm avec un rendement quantique supérieur à 40% entre 540 et 800 nm. Nous verrons dans le paragraphe suivant l'importance de cette dernière caractéristique.

3.2.3 Scintillateur

Le scintillateur est un convertisseur de longueur d'onde des photons. Son rôle est d'absorber l'énergie du rayonnement X qu'il reçoit et de la re-émettre dans une autre gamme de longueur d'onde, celle du visible. Il est donc une pièce maîtresse du dispositif. Le choix du matériel est délicat en raison du grand nombre de paramètres à prendre en considération et de l'évolution rapide de la technologie. Dans ces quelques lignes, à caractère bibliographique, nous présentons les caractéristiques typiques de quelques scintillateurs et les paramètres qui nous ont menés au choix final.

La nature de la matière active, sa forme (poudre, monocristal, aiguillettes...), son épaisseur ainsi que la conception du substrat sont autant de facteurs déterminants pour la résolution spatiale et le rendement lumineux.

Afin de guider notre choix, nous retiendrons quelques points en guise de cahier des charges :

- la résolution spatiale doit être la plus fine possible
- l'utilisation doit rester simple
- le rendement lumineux doit être suffisant pour ne pas allonger inconsidérément les durées d'acquisition
- le matériel doit rester stable (pas de dégradation rapide)

Un scintillateur se décompose généralement en deux parties : la matière active et son support. Suivant les applications, ce dernier peut être une feuille très fine (Mylar, aluminium...) ou

une plaque rigide (verre, graphite, aluminium, fibre optique...) qui peut atteindre plusieurs millimètres d'épaisseur. Le matériau scintillant peut être de différentes compositions. Nous n'aborderons ici que les cas du Gadolinium (GOS), du Germanate de Bismuth (BGO), de l'Iodure de Cesium (CsI) et de l'Iodure de Sodium (NaI) qui sont les plus couramment utilisés. Le CsI et le NaI peuvent être dopés au Thallium (Tl) ; le CsI pouvant aussi l'être au Sodium (Na).

Comme nous l'avons vu précédemment, la première fonction du scintillateur est l'absorption du rayonnement X. Cette propriété dépend essentiellement du numéro atomique (Z) du constituant actif. Le choix de la nature du matériau pourra ainsi être guidé en fonction de l'énergie du rayonnement X envisagé. Par son poids atomique très élevé, le BGO se révèle très efficace aux basses énergies alors que le CsI sera privilégié entre 33 et 50 keV (Figure 18).

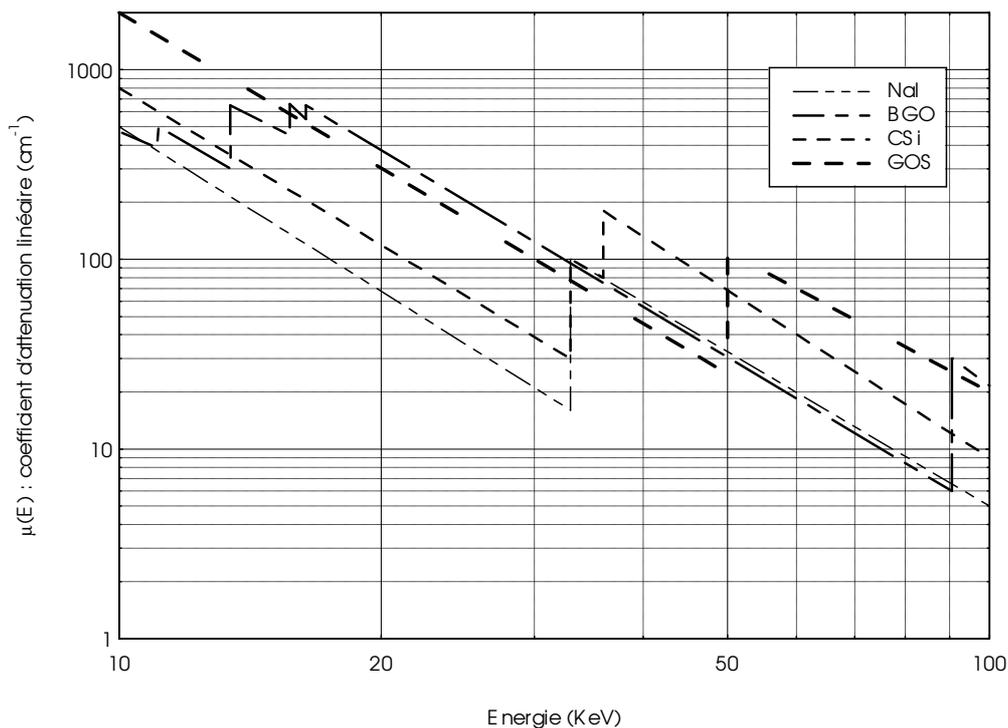


Figure 18 : Propriété d'atténuation de quelques constituants de base des scintillateurs (d'après [Crismatec, 1992] et [Hamamatsu, 1996])

Les matériaux scintillants ont souvent la propriété d'être fortement hygroscopiques. Ce caractère peut devenir si important qu'il nécessite un contrôle permanent des conditions d'utilisation, rendant le dispositif expérimental plus complexe (Figure 19).

<i>matériau</i>	<i>densité</i>	<i>Hygroscopicité</i>
BGO	7.13	Non
GOS	6.71	Non
CsI	4.51	modérément
CsITl	4.51	modérément
CsINa	4.51	Oui
NaITl	3.67	Oui

BGO : Germanate de Bismuth ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
GOS : Silicate de Gadolinium ($\text{Gd}_2\text{O}_5\text{Si}$)
CsI : Iodure de Césium
NaI : Iodure de Sodium
Tl : Thallium

Figure 19 : Hygroscopicité et densité de quelques matériaux scintillants

D'autres propriétés, telle que la sensibilité des composants à la température (cas typique du BGO perdant une grande partie de son efficacité au dessus de 0°C) entrent en jeu lors du choix du matériau scintillant mais l'une des caractéristiques déterminantes reste la compatibilité de la gamme d'émission spectrale du scintillateur avec celle de détection du capteur (Figure 20).

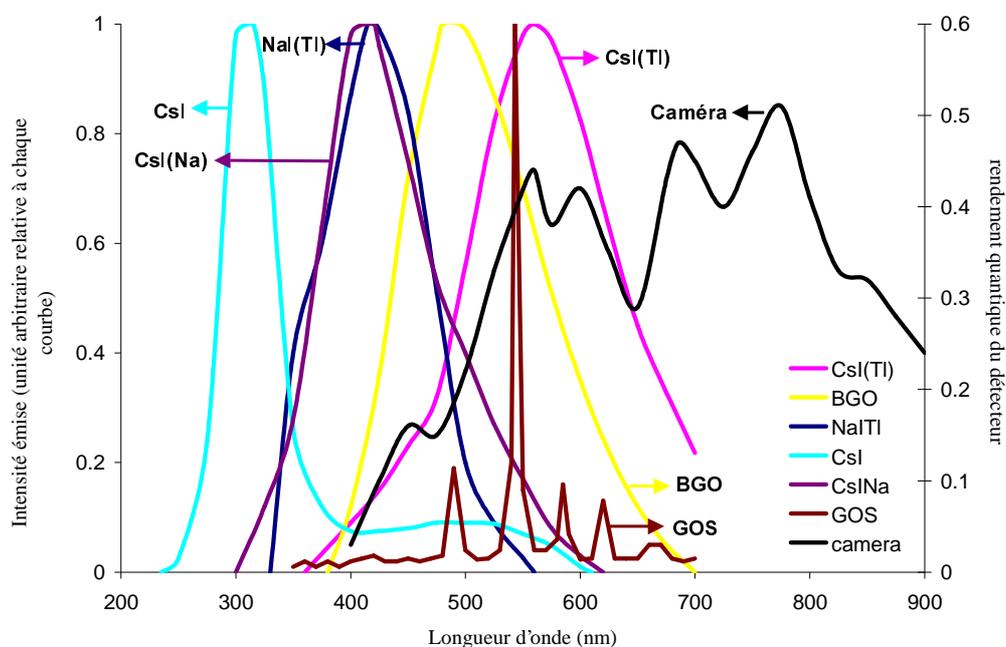


Figure 20 : Spectre d'émission de différents composants scintillant comparés au spectre de détection du CCD Kodak de la caméra (d'après [Crismatec, 1992] et [Princeton Instruments, 1997])

D'après cette dernière figure, les seuls matériaux compatibles avec les possibilités de détection de la caméra sont le CsI dopé au Thallium, le Gadolinium et éventuellement le BGO ; ce dernier étant cependant très peu efficace à la température ambiante.

Deux matériaux ont été testés. L'un à base de CsI(Tl) ; l'autre à base de GOS. En se référant aux courbes d'absorption X (Figure 18), et afin d'optimiser le rendement d'absorption X, le choix devrait se porter sur le Gadolinium pour les énergies inférieures à 33 keV et sur le CsI(Tl) pour celles comprises entre 33 et 50 keV.

Finalement, nous avons opté pour le CsI(Tl). Outre que celui-ci a l'un des meilleurs rendements lumineux connus actuellement [Crismatec, 1992], il a la particularité de pouvoir être déposé sous forme d'aiguillettes prismatiques dont le grand axe est perpendiculaire au support. Cette caractéristique permet un guidage de la lumière émise du point de scintillation vers le support, limitant ainsi la diffusion à travers le reste du matériau. L'épaisseur du CsI(Tl) a été limitée à 150 μm (cf. §3.1.3).

De même, le support a été choisi de manière à optimiser la résolution spatiale. Il s'agit d'une plaque en fibres optiques de faible diamètre ($\varnothing 3 \mu\text{m}$) guidant la lumière émise par la couche scintillante à travers le matériau (Figure 21).

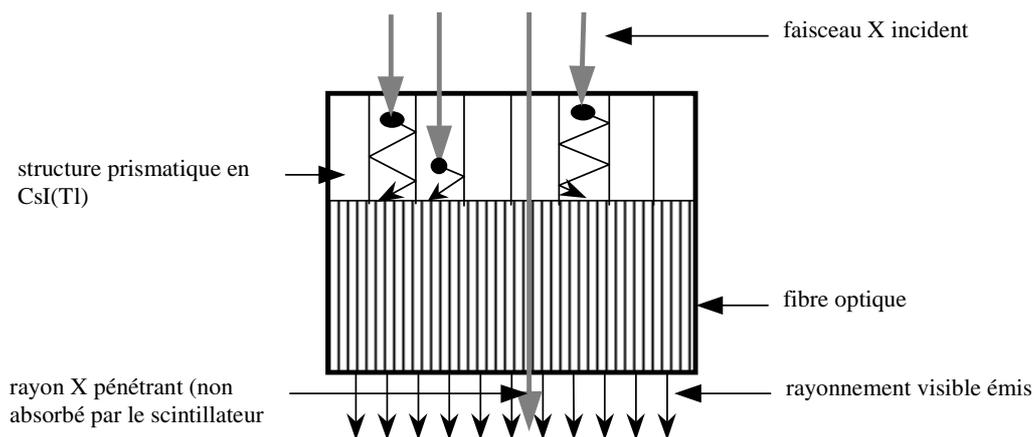


Figure 21 : Principe du scintillateur adopté : la structure prismatique du CsI(Tl) guide le rayonnement lumineux du point de scintillation au support en fibre optique. La diffusion du rayonnement lumineux dans les zones voisines est donc restreinte.

L'adjonction de ces deux structures successives permet, à épaisseur égale, d'améliorer sensiblement la résolution spatiale par rapport à l'utilisation de poudres ou de monocristaux appliqués sur support massif.

Enfin, rappelons que l'utilisation de matériaux hygroscopiques, tel le CsI(Tl), peut imposer des contraintes techniques importantes (conditionnement de l'air entourant le scintillateur). Une fine couche protectrice est donc déposée sur les aiguillettes de CsI(Tl) afin de les isoler de l'humidité de l'air ambiant [Hamamatsu, 1996].

3.3 Conception et mise au point

3.3.1 Dimensionnement

Nous l'avons vu précédemment, la structure anatomique particulière du bois influence le dimensionnement du dispositif. Afin de limiter le flou dû à l'épaisseur non nulle de l'échantillon, la distance source-échantillon (L_1) doit rester la plus grande possible (§3.1.2). Cependant, le facteur d'agrandissement doit rester important dans le but de contre-balancer la relative faible résolution spatiale du scintillateur. Ces deux remarques impliquent une distance source-détecteur (L_1+L_2) maximale. Pour des raisons pratiques de réalisation, cette distance restera limitée dans notre laboratoire à 175 cm. N'oublions pas non plus que le flux reçu par le scintillateur varie comme l'inverse du carré de cette distance. Une augmentation inconsidérée des dimensions du dispositif impliquerait donc des durées d'acquisition rapidement rédhibitoires. Cette remarque prend tout son sens lorsque nous rappelons que le flux de la source X adoptée est très faible (§3.2.1).

La Figure 22 montre le dispositif dans son ensemble. Nous l'avons volontairement conçu afin qu'il reste très évolutif ; la position de chacune des composantes pouvant être amenée à être modifiée en fonction des mises au point ou de remplacements éventuels de matériel. Les éléments sont donc fixés sur une table profilée pivotante. Deux positions sont possibles : le montage du dispositif et l'alignement des éléments sont réalisés à l'horizontale alors que la position verticale permet un positionnement aisé des échantillons lors de l'utilisation.

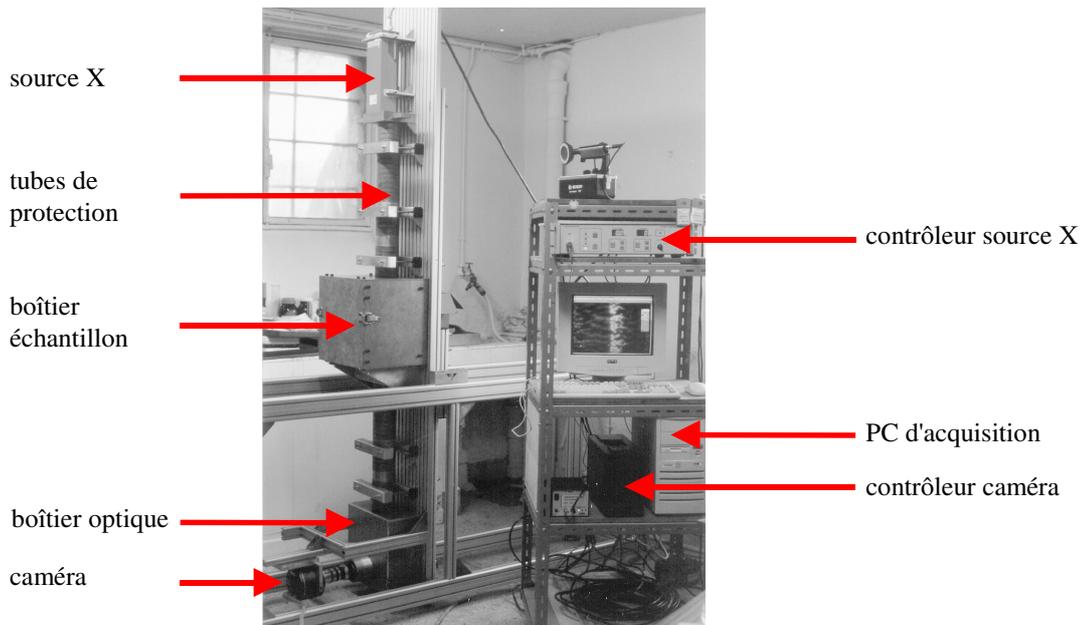


Figure 22 : Vue d'ensemble du dispositif en position verticale

La dimension totale du dispositif étant fixée, la position de l'échantillon par rapport à la source détermine le facteur de grossissement. Celui-ci peut être ajusté en fonction de divers paramètres. Une optimisation possible consiste à égaler le flou géométrique dû à la taille de la source d'émission et celui dû à la résolution du scintillateur. Une autre stratégie consiste à prendre en compte la dimension de l'échantillon, qui, après projection, doit être compatible avec celle du scintillateur. Nous avons donc opté pour un compromis permettant de visualiser environ deux à trois cernes d'accroissement annuel de chêne (soit environ 3 à 4mm) avec un grossissement légèrement inférieur à $\times 3$.

3.3.2 Alignement

L'alignement des différents éléments est réalisé à l'aide d'un petit rayon laser. Celui-ci est installé à la place de la source X et vise un miroir situé à l'autre bout du banc, dans le plan perpendiculaire à l'objectif de la caméra. Le réglage angulaire du prisme, monté sur le même banc optique que le scintillateur (Figure 24), est optimum lorsque l'image du faisceau laser se superpose à l'origine sur une feuille transparente (Figure 23). L'alignement des autres éléments (boîtier de l'échantillon, scintillateur, tube de protection...) est réalisé suivant le même principe.

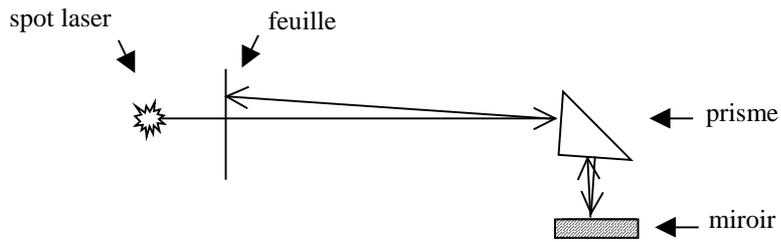


Figure 23 : Réglage angulaire du prisme par alignement laser

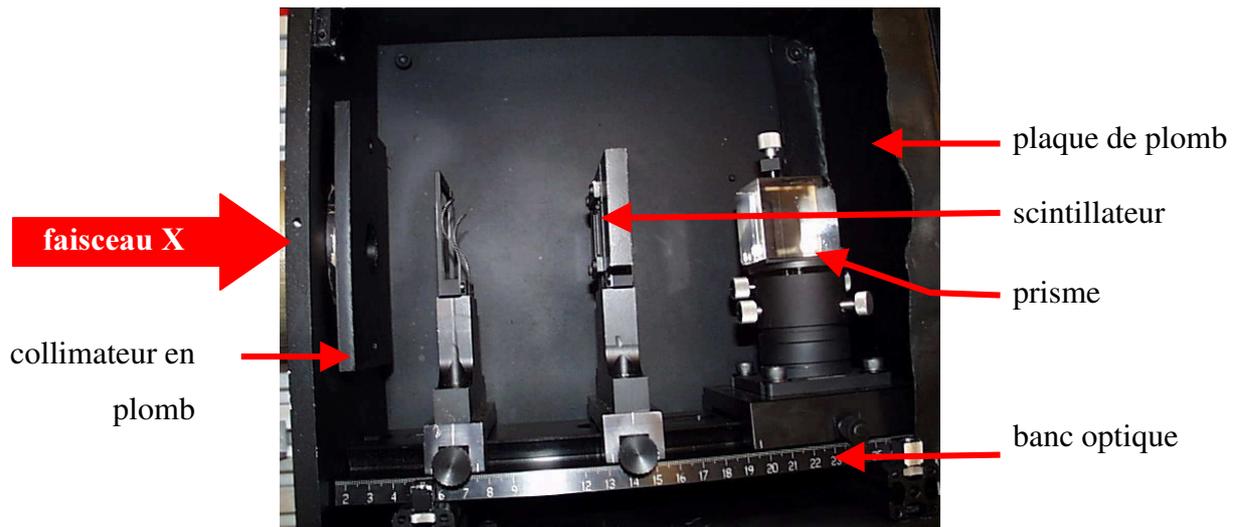


Figure 24 : Boîtier optique : Le scintillateur et le prisme sont montés sur un même banc. Le support du prisme permet le réglage angulaire du prisme dans les 3 directions.

3.3.3 Mise au point de la caméra

Le réglage optique de la caméra sur le scintillateur est réalisé par le déplacement de la caméra. A cette fin, celle-ci a été montée sur une platine de déplacement équipée d'une vis micrométrique permettant d'ajuster la distance prisme-caméra. La mise au point consiste à maximiser le contraste de l'image d'une mire formée d'un faisceau convergent de fines lignes en plomb. Le contraste calculé pour différentes positions de la caméra permet de trouver le point optimum (Figure 25). Nous reviendrons ultérieurement plus en détail sur cette notion de contraste, caractéristique permettant de déterminer la résolution spatiale d'un dispositif d'imagerie.

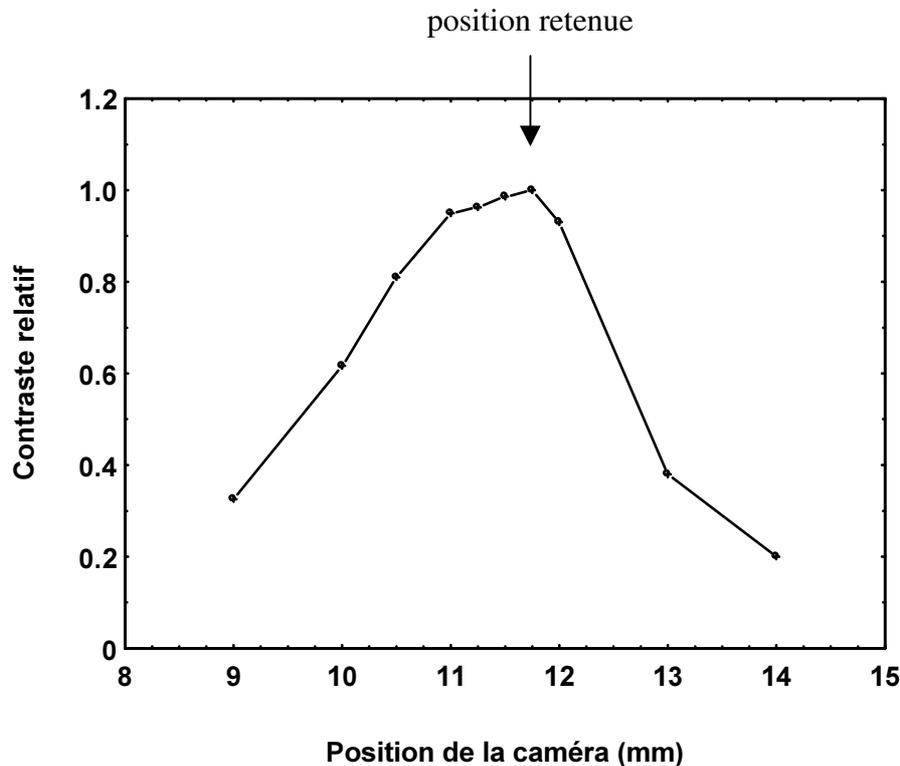


Figure 25 : Positionnement de la caméra par optimisation d'un contraste. Les valeurs indiquées en abscisse correspondent aux repères sur la platine de déplacement micrométrique permettant d'ajuster la distance prisme-caméra.

Grâce à cette technique, la précision obtenue, sur la position de la caméra est meilleure que 100 μm .

3.4 Corrections d'une image

3.4.1 Corrections de base

Une image est entachée de nombreux défauts. Si des traitements d'images plus ou moins complexes (utilisation de masques flous, filtre médian spatial...) peuvent être réalisés afin d'améliorer la visualisation, ils transforment l'information brute qui perd alors sa valeur quantitative. Par contre, certains défauts peuvent, et doivent, être corrigés sans altération grâce à l'acquisition d'images complémentaires :

- C'est le cas de la correction du "background" : l'image est réalisée avec les mêmes paramètres d'acquisition mais sans "éclairage par le rayonnement X". Par soustraction numérique à l'originale, il s'agit ici essentiellement de prendre en considération l'offset non nul de la caméra ainsi qu'une fuite éventuelle de lumière extérieure.

- C'est aussi le cas du "flatfield" : appelée aussi "image de fond", cette image correspond à l'enregistrement, en chaque point du détecteur, de l'intensité du faisceau incident. Réalisée dans les mêmes conditions que l'image initiale, mais sans échantillon, elle est ensuite corrigée par le "background". On peut donc écrire, pour chaque pixel (x,y) de l'image :

$$I_0(x,y) = \int_0^{\infty} I_{0(x,y)}(\lambda) d\lambda$$

Le flatfield permet principalement de prendre en compte la non uniformité d'éclairage dont nous avons vu précédemment les causes possibles (§3.1.5). La Figure 26 est une illustration de cette non uniformité.

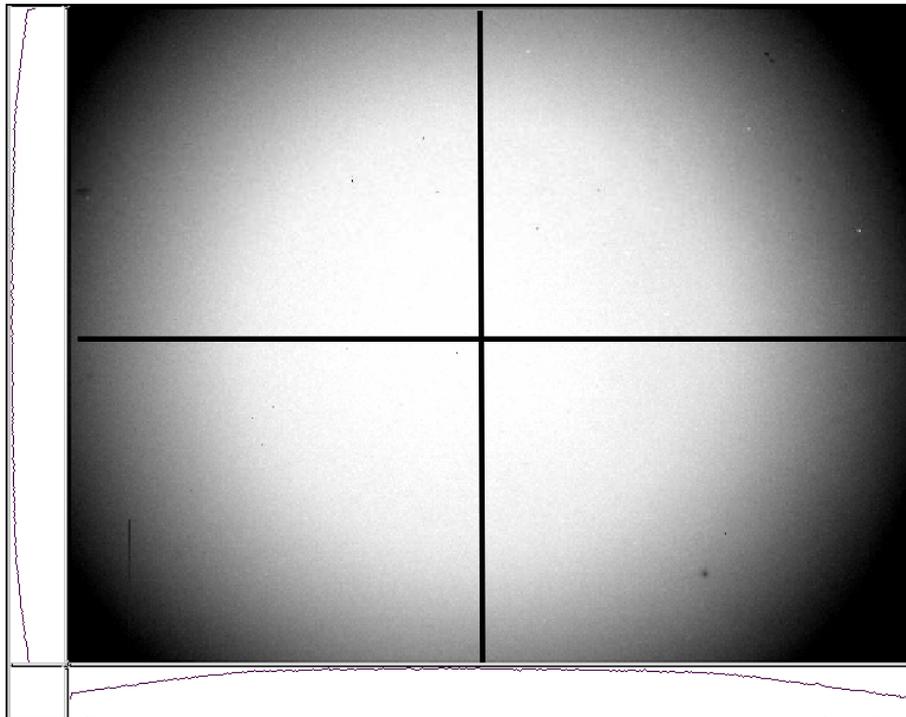


Figure 26 : *Flatfield*. Cette image de fond correspond au signal détecté sans présence d'échantillon. Une fois corrigée par une image complémentaire (le *background*), elle permet de prendre en compte la non uniformité de l'éclairage

Le calcul complet d'une correction de base s'écrit, en chaque pixel (x,y) :

$$\text{Image}(x,y) = \frac{\text{Image}_{\text{initiale}}(x,y) - \text{Background}(x,y)}{\text{Flat field}(x,y) - \text{Background}(x,y)}$$

Le résultat obtenu doit être interprété physiquement comme l'enregistrement, en chaque point, du rapport I/I_0 (Eq : 5). Les niveaux de gris sont donc le pourcentage d'intensité transmise à travers l'échantillon. Ils sont donc théoriquement compris entre 0 (absorption totale du faisceau incident par l'échantillon) et 1 (absorption nulle).

Le graphique ci-dessous illustre l'influence de chacune des composantes du calcul. Sur cet exemple, une cale a été installée sur la partie droite de l'image afin d'atténuer une partie du signal incident.

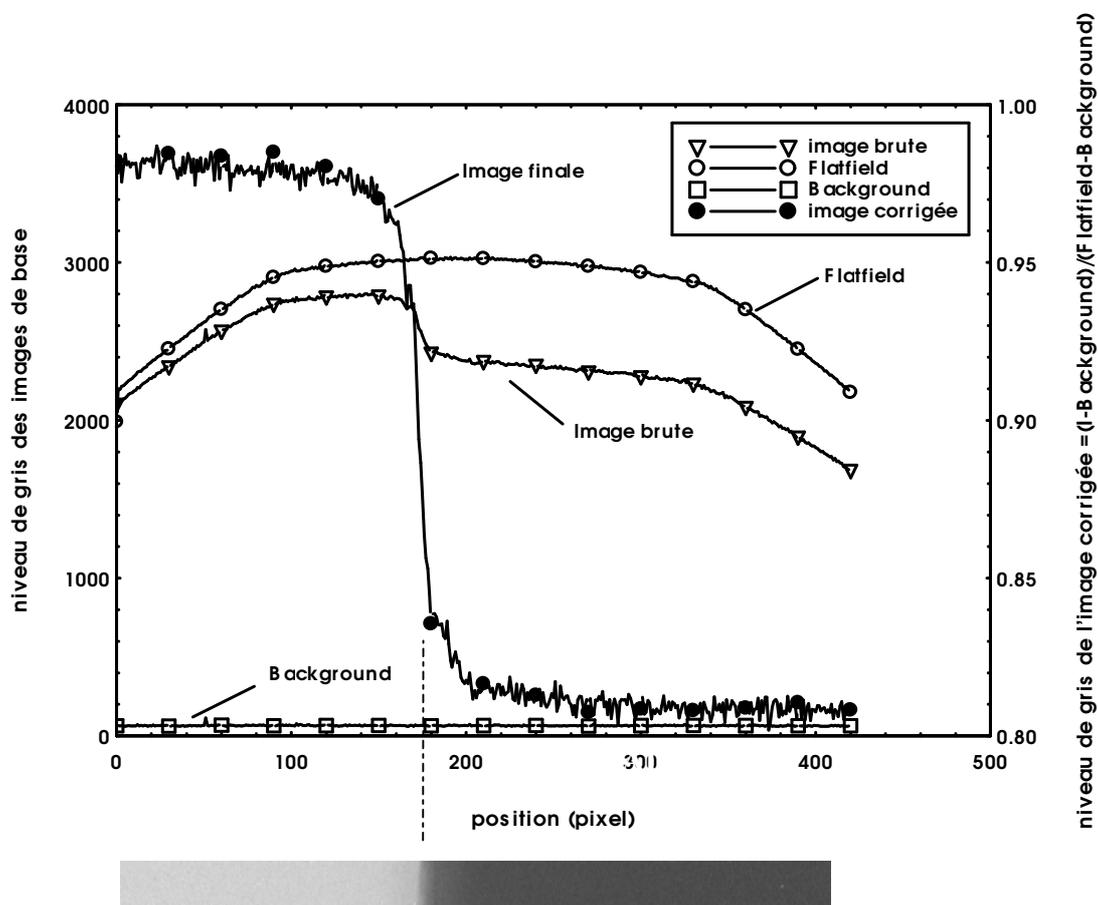


Figure 27 : Corrections d'une image. Une cale atténue le signal sur la moitié droite de la courbe.

Théoriquement, sur la zone exempte de cale (sur la partie gauche de la courbe), le signal adimensionné devrait être normalisé à la valeur 1 (à l'erreur de mesure près), reflet de l'absence de matériau absorbant. Nous discuterons ultérieurement de l'origine de cet écart et de la possibilité d'opérer une correction sans laquelle il semble difficile d'envisager un traitement quantitatif du signal.

3.4.2 Le filtre médian temporel

Pendant la durée de l'acquisition, différents bruits peuvent détériorer la qualité d'une image. Outre le bruit relatif à la caméra, des parasites extérieurs, tels les rayons cosmiques, peuvent venir frapper le scintillateur et/ou le CCD, provoquant alors un enregistrement anormal mais limité dans le temps. Un traitement classique consiste à accumuler plusieurs images afin de moyennner le signal reçu tout au long de l'acquisition. Si ce traitement limite effectivement l'influence des points aberrants, il ne les élimine pas. De plus, il est peu efficace avec un petit nombre d'images. Nous avons donc préféré utiliser, non plus la valeur moyenne, mais la valeur médiane des valeurs enregistrées sur les différentes images pour chaque pixel (x,y). Cette technique permet de ne pas prendre en compte les valeurs extrêmes.

4 Performances du dispositif

4.1 Résolution spatiale

Pour caractériser la résolution spatiale d'un dispositif d'imagerie X, il existe différentes techniques plus ou moins équivalentes. Toutes consistent en la détermination de l'amplitude de la transformée de Fourier (TF) de la réponse impulsionnelle de Dirac (δ). Cette valeur, appelée la "Fonction de Transfert de Modulation" (FTM), décrit la réponse en contraste du système en fonction de la fréquence spatiale (généralement exprimée en nombre de paires de lignes par millimètre). Elle est donc comprise entre 0 et 1 (réponse idéale : $TF(\delta)=1$ quelle que soit la fréquence spatiale). En pratique, il est physiquement impossible de générer un signal de Dirac qui permette une détermination exacte de la FMT. Différentes méthodes expérimentales ont donc été mises au point afin d'approcher le plus précisément possible la valeur recherchée. Les plus couramment utilisées sont :

- la méthode du trou,
- la méthode de la fente,
- la méthode de la mire,
- la méthode du bord.

La *méthode du trou* consiste à approcher le stimulus idéal (impulsion de Dirac) par un trou de très faible diamètre réalisé dans une plaque (généralement en plomb). La FTM est la

Transformée de Fourier du signal détecté. Le résultat s'approche d'autant plus de la valeur théorique que le trou est de faible dimension. La *méthode de la fente* est tout à fait similaire, le trou étant simplement remplacé par une fente de faible largeur.

La *méthode de la mire* consiste à calculer un contraste sur un réseau de lignes dont on connaît la fréquence d'espacement.

La dernière technique utilise *le bord* d'une plaque fine. Ce front simule la fonction de Heaviside, reliée directement à celle de Dirac par simple dérivation et donc, par définition, à la valeur de la FTM.

La Figure 28 représente la réponse des principaux stimuli utilisés pour caractériser la réponse d'un système d'imagerie en résolution spatiale.

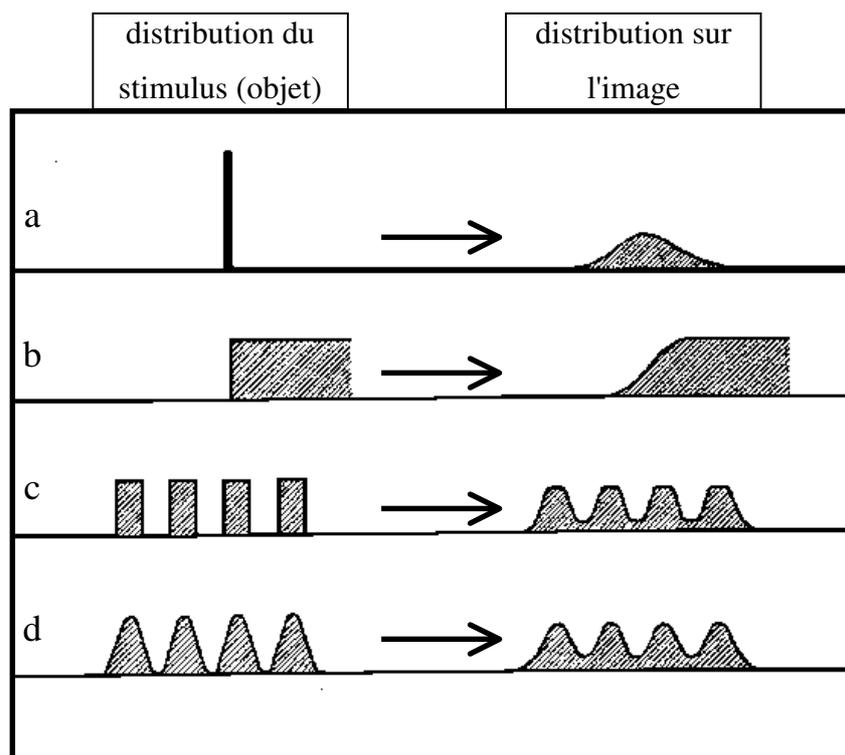


Figure 28 : Réponses d'un système d'imagerie à différents stimuli. a: impulsion de Dirac ; b: fonction de Heaviside (bord) ; c : créneaux carrés ; d : créneaux sinusoïdaux (d'après [Coltman, 1954]).

Si les techniques basées sur une impulsion de Dirac ou sinusoïdale donnent une solution théorique exacte, la difficulté de génération de tels signaux les rend difficiles, voire impossibles à mettre en œuvre.

Pour de plus amples détails sur ces différentes techniques, on pourra se référer aux articles de **Kaftandjian et al (1996a)**, **Zhu et al (1992 et 1995)** et en particulier à celui de **Kaftandjian et al (1996b)** dans lequel les auteurs comparent les résultats de ces méthodes.

Nous avons opté pour la méthode de la mire pour sa simplicité de mise en œuvre et de traitement. Le matériel utilisé, déjà cité précédemment (§3.3.3), est une mire constituée d'un faisceau de lignes convergentes en plomb de 30 μm d'épaisseur (Figure 29) maintenue entre deux plaques en plastique.

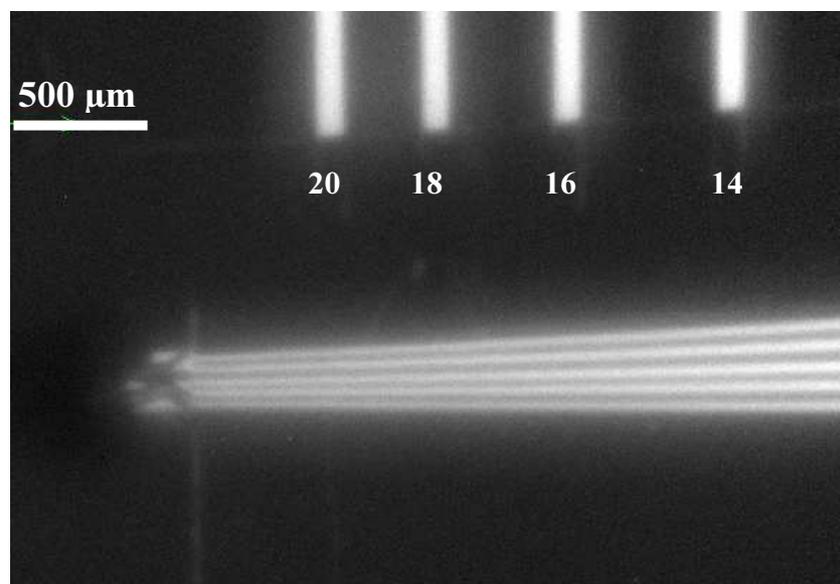


Figure 29 : Image par rayons X de la mire. Les traits verticaux situent les fréquences spatiales. De gauche à droite : 20, 18, 16 et 14 paires de lignes par millimètre (grossissement par rayons X : x 3).

Un profil réalisé perpendiculairement aux lignes permet de calculer un contraste qui est comparé au contraste "idéal" (Figure 30).

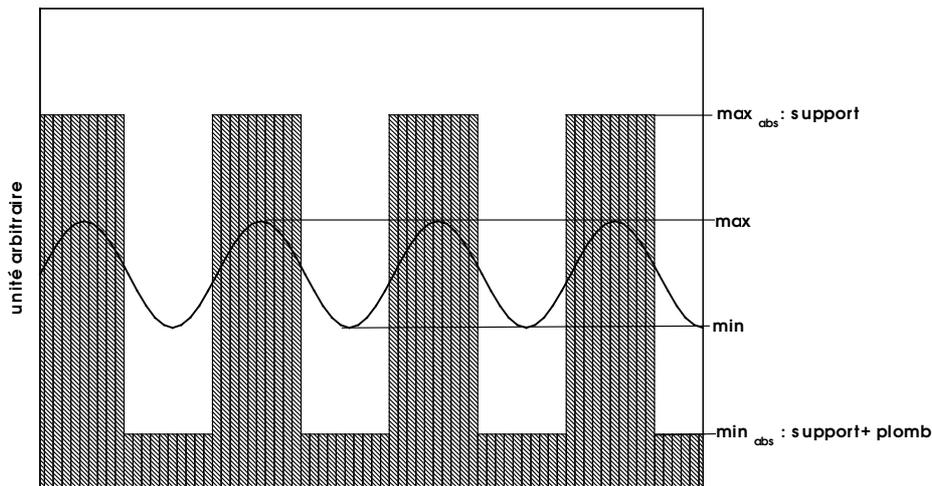


Figure 30 : Comparaison du profil réel (courbe) et du profil idéal (créneaux sans détérioration \Leftrightarrow résolution infinie)

La Fonction de Transfert de Contraste (FTC) est donc simplement le rapport :

$$FTC = \frac{\max - \min}{\max_{abs} - \min_{abs}}$$

Les valeurs de références correspondent à l'absorption propre du plomb + support (\min_{abs}) et du support seul (\max_{abs}), ou d'une autre manière, aux valeurs pour une fréquence de 0 paires de ligne/mm.

La FTC est directement liée à la FMT par le relation de **Coltman (1954)** :

$$FTM(f) = \frac{\pi}{4} \left(FTC(f) + \frac{1}{3} FTC(3f) - \dots \right)$$

où f est la fréquence spatiale exprimée en paire de lignes/mm.

Dans la pratique, nous nous limiterons à la valeur de la FTC. Le graphique ci-dessous montre un exemple de profil mesuré ainsi que l'évolution de la FTC en fonction de la résolution spatiale (Figure 31).

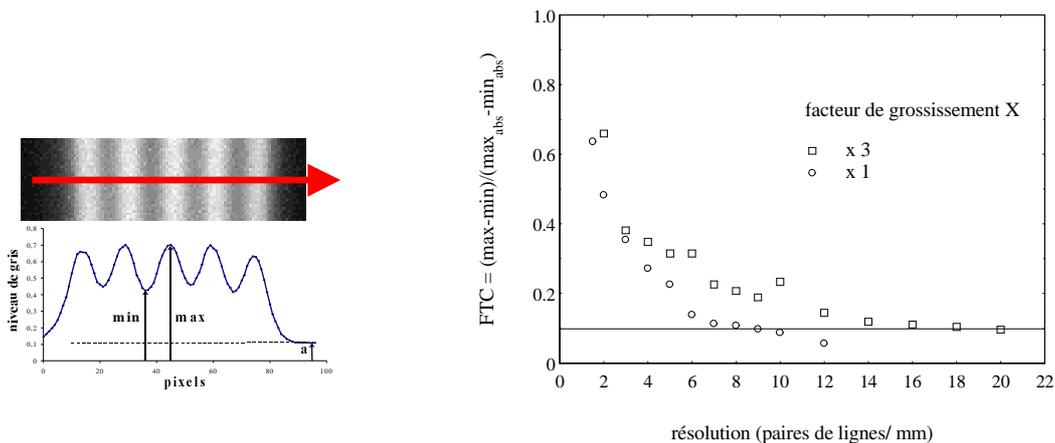


Figure 31 : Evolution de la FTC en fonction de la résolution spatiale

La résolution a été déterminée à deux positions différentes (Figure 31). Dans un premier temps, la mire a été positionnée à quelques millimètres du scintillateur ($L_1=175$ cm) puis, dans un second temps, à la distance $L_1=64$ cm de la source. La première expérience permet de caractériser la résolution de l'ensemble "optique" scintillateur-prisme-objectif-caméra. La deuxième expérience fait intervenir la dimension du spot d'émission X et son influence lors du grossissement X. La résolution maximum correspond au point où il devient impossible de distinguer les détails (ici, les lignes). Le seuil de 10% pour le contraste est alors pris comme valeur limite et correspond ici environ 6 paires de lignes par millimètre avec un grossissement X 1 et à 18 avec le grossissement X 3. Le respect du rapport de grossissement sur la résolution est dû au fait que le faible grossissement opéré fait peu intervenir la taille du spot émetteur.

4.2 Dynamique du système et résolution de I/I_0

4.2.1 Flux incident : dynamique et linéarité temporelle

L'intensité du rayonnement incident revêt une importance capitale sur la qualité d'une image. Si ce point important est étudié en détail dans le paragraphe suivant, nous citons ici les paramètres expérimentaux qui permettent de maîtriser le nombre de photons détectés.

- **La tension accélératrice** aux bornes du tube est un premier facteur : l'intensité totale émise ($I_0 = \int I_0(\lambda) d\lambda$) augmente comme le carré de cette tension (§2.1).

- Le second paramètre, **l'intensité du courant**, revêt une importance moindre. En effet, si le flux de photons X augmente proportionnellement à l'intensité circulant dans le filament du tube, pour le cas présent, la recherche constante du flux maximum conduit généralement à régler ce paramètre aux limites techniques du matériel utilisé. Nous rappellerons ici que le matériel adopté (§3.2.1) a un courant maximal très faible ($i_{\max}=100\mu\text{A}$).
- Le choix de **la durée d'acquisition** permet de contrôler à volonté le nombre de photons détectés. C'est ici un avantage majeur qu'offrent les capteurs CCD par rapport aux films radiographiques. En effet, un grain de film ne peut être excité qu'une seule fois, conduisant ainsi à une saturation progressive et donc, à une non linéarité de la détection de la réponse dans le temps. Par contre, le capteur CCD permet d'enregistrer un signal qui reste linéaire. En effet, si la dynamique de la caméra est bien finie (ici, codage sur 12 bits = 4095 coups au maximum), la possibilité d'accumulation (sommation) de plusieurs images successives permet de s'affranchir de cette limitation technique.

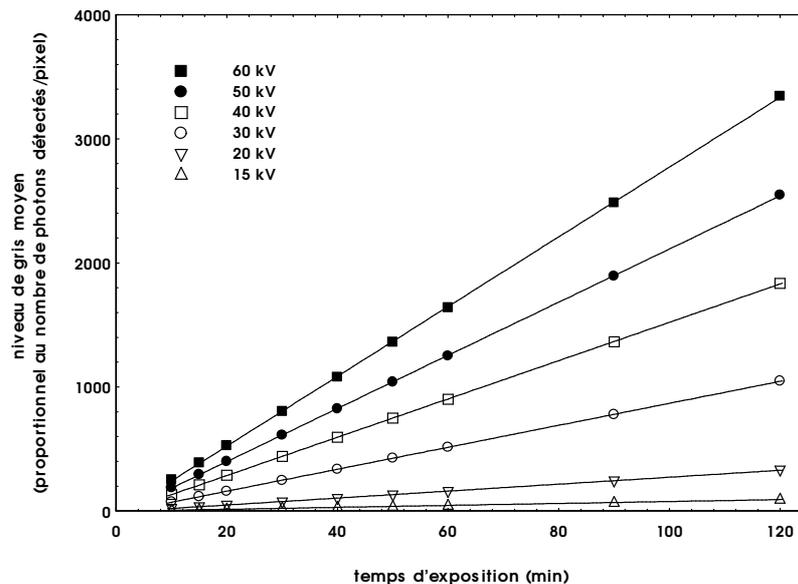


Figure 32 : Linéarité du flux détecté dans le temps ($I=90\mu\text{A}$)

Les mesures du nombre moyen de coups détectés par pixel, calculées sur des images de fond (Flatfield) corrigées uniquement de leur background, confirment bien la parfaite linéarité temporelle ainsi que l'influence de la tension accélératrice (Figure 32).

- Enfin, il existe une dernière possibilité offerte par les capteurs CCD : les super pixels (ou "binning"). Il s'agit du regroupement virtuel, lors de l'acquisition, de plusieurs pixels

voisins du CCD afin d'accumuler le signal sur une surface plus importante. Un binning 2x2 (2 pixels suivant l'axe horizontal, 2 suivant l'axe vertical) permet ainsi de multiplier par 4 le nombre de photons détectés ou de réduire d'autant la durée d'acquisition nécessaire à l'obtention de la résolution souhaitée.

Remarque : il est important, d'indiquer ici que les courbes (Figure 35 à Figure 40) ont été réalisées en utilisant la technique des super pixels (3x3) afin de limiter les temps nécessaires à la réalisation de ces courbes expérimentales.

4.2.2 Résolution quantitative du signal détecté

4.2.2.1 Stabilité et répétabilité du flux

L'erreur sur le nombre de photons enregistrés se doit d'être quantifiée dès lors qu'il est envisagé de réaliser des mesures quantitatives de l'absorption du rayonnement incident. Cette erreur ne peut être calculée sur une seule image, la non uniformité d'éclairage rendant absurde toute prise de valeur moyenne. Cependant, la simple expérience qui consiste à réaliser deux images de fond dans les mêmes conditions opératoires (corrigées de leur background) et à les comparer par division permet de constater qu'elles diffèrent globalement l'une de l'autre (Figure 33). Reprenant l'exemple de la Figure 27, nous avons déjà constaté un écart par rapport à la valeur 1 dans la zone sans cale. Si cet écart se révèle minime, de l'ordre du pourcentage, il suffit à rendre hypothétique toute tentative de mesure de l'atténuation du rayonnement par un échantillon de bois de faible épaisseur.

tension accélératrice (kV)	rapport moyen (idéalement =1)	écart-type : σ	intervalle de confiance à 99 %	N : niveau de gris
20	0.9857	0.0381	$3.8 \cdot 10^{-4}$	178
30	0.9977	0.0186	$1.8 \cdot 10^{-4}$	595
40	1.00652	0.0131	$1.3 \cdot 10^{-4}$	1158
50	0.9885	0.0105	$1.0 \cdot 10^{-4}$	1791
60	1.00211	0.0089	$8.9 \cdot 10^{-5}$	2519
70	0.9811	0.0075	$7.5 \cdot 10^{-5}$	3374

Figure 33 : Comparaison de l'intensité moyenne mesurée sur des images distinctes

Nous pouvons avancer plusieurs hypothèses explicatives de cette différence. Par exemple, nous l'avons déjà évoqué (§3.2.3), les variations de température modifient l'activité des matériaux scintillants. De même, la stabilité du refroidissement du CCD de la caméra est un paramètre important qui influe sur l'efficacité de la détection. Mais au regard des valeurs mises en jeu, il semble plus probable que l'instabilité d'émission de la source X soit le facteur déterminant. Si nous nous référons aux données du constructeur, il est nécessaire d'attendre plusieurs heures avant que l'intensité soit stabilisée à 0.2% près (Figure 34).

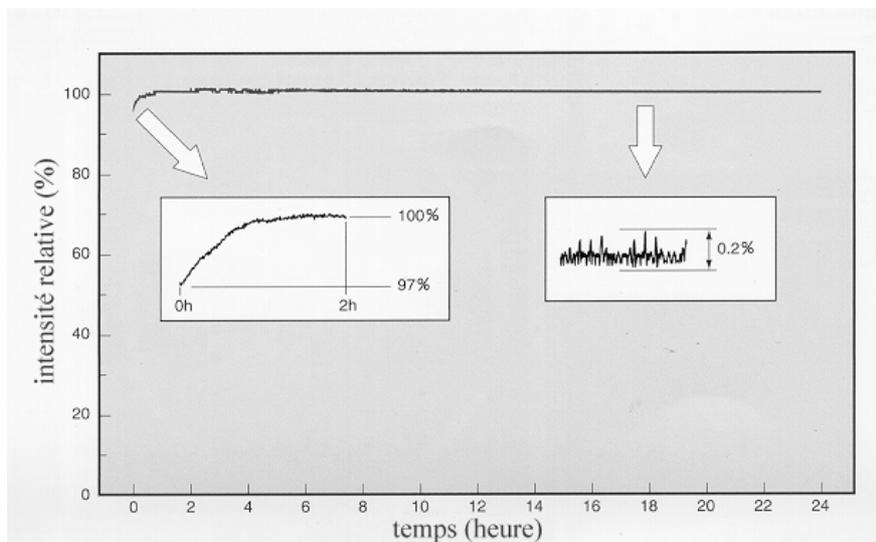


Figure 34 : Stabilisation de la source (données constructeur).

Les mesures reportées dans le tableau précédent (Figure 33), ont été effectuées sur des images réalisées pendant 10 mn après une préchauffe de la source limitée à quelques minutes. Nous sommes donc, dans cette expérience, dans la situation d'instabilité la plus défavorable qui peut expliquer une différence globale de l'intensité détectée. Le caractère "global" se vérifie grâce à l'écart type mesuré sur le rapport des deux images. Celui-ci, calculé sur 65 000 pixels, permet de calculer un intervalle de confiance (à 99%) dont la très faible largeur nous autorise à faire l'hypothèse de l'uniformité sur toute l'image. Il est donc envisageable de proposer une correction globale du flux incident.

Pour chaque pixel, le niveau de gris, rapport I/I_0 corrigé s'écrit :

$$\frac{I(x,y)}{I_0(x,y)} = \frac{I(x,y)}{I_1(x,y)} \frac{I_1(x,y)}{I_0(x,y)} = \frac{I(x,y)}{I_1(x,y)} \times C \quad \text{Eq : 7}$$

avec I : intensité (nombre de photons) détectée

I_0 : intensité de référence "vraie" (à priori inconnue)

I_1 : intensité de référence mesurée (Flatfield)

C : terme correcteur = $I_1(x,y)/I_0(x,y)$

Une simple mesure du rapport I_0/I_1 (supposé alors constant sur toute l'image) sur une zone exempte d'échantillon permet donc d'opérer la correction.

Celle-ci peut se justifier d'autant plus que le bruit expérimental qui entoure les mesures reste faible devant le nombre de photons détectés; C'est la quantification de ce bruit et les paramètres qui le régissent que nous abordons maintenant.

4.2.2.2 Bruit expérimental

La quantification du bruit expérimental est indispensable dès lors qu'il est envisagé de faire une mesure quantitative fiable de l'absorption d'un échantillon afin, par exemple, d'en estimer la densité.

L'expérience suit le même principe que celui utilisé pour mettre en évidence la non répétabilité du flux incident. Elle consiste donc en l'acquisition d'une image sans échantillon et à lui faire subir toutes les phases de corrections que nous avons pu évoquer précédemment (soustraction du Background, division par le Flatfield et correction du flux incident). Le niveau de gris moyen de l'image est donc, par construction, égal à 1. Le bruit est alors simplement assimilé à l'écart type qui entoure cette valeur. C'est donc un bruit "relatif", exprimé en terme de pourcentage du signal incident. Les courbes ci-dessous (Figure 35) représentent, pour une tension accélératrice fixée, les résultats obtenus en fonction de la durée d'exposition.

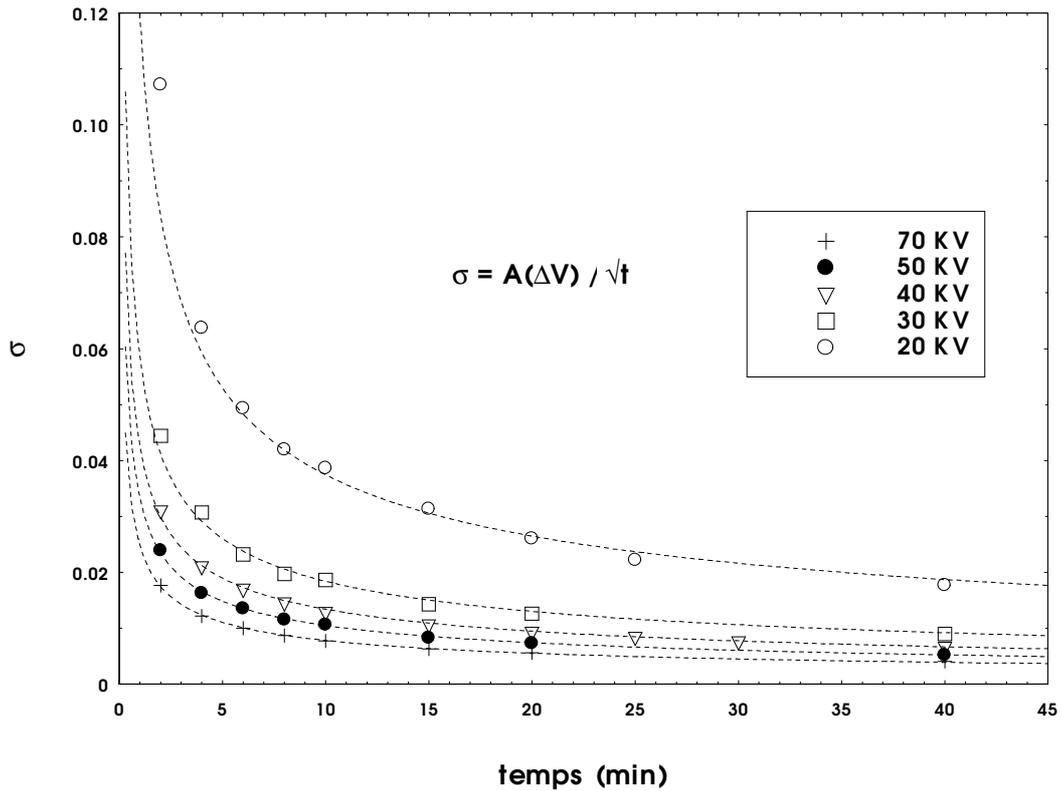


Figure 35 : Evolution du bruit expérimental en fonction de la durée d'exposition. Les points représentent les valeurs obtenues expérimentalement ; les courbes en pointillés représentent les fonctions de la forme

$$\sigma = A/\sqrt{t} .$$

Nous constatons alors que si ce bruit (relatif) diminue régulièrement avec la durée d'acquisition, il en est de même avec la tension accélératrice (Figure 33). Ceci n'est en fait que le reflet de l'augmentation du nombre N de photons X émis par la source. On retrouve donc une variation classique du bruit en \sqrt{N} . En effet, au niveau de la caméra, le bruit, exprimé en nombre de coups enregistrés, s'écrit :

$$N_T = (N_L^2 + N_C^2 + N_{ph}^2)^{1/2}$$

N_T : bruit total (en nombre de photons détectés)

N_L : bruit de lecture de la caméra

N_C : bruit de courant d'obscurité (proportionnel à la durée d'acquisition)

N_{ph} : bruit statistique, dit "bruit photonique"

Les spécificités techniques du matériel utilisé rendent les deux premières sources de bruit négligeables devant le bruit photonique. Ce dernier, résultat des fluctuations statistiques du flux mesuré, évolue lui-même comme la racine carrée du nombre N de photons détectés. La

linéarité temps-nombre de photons émis étant parfaite, nous retrouvons donc l'évolution de l'erreur relative en $1/\sqrt{t}$ (Figure 35). La Figure 36, plus générale, reflète l'évolution de l'erreur en fonction du paramètre physique qui la détermine : nombre de photons détectés (N). En particulier, l'erreur ne dépend plus de la tension accélératrice et de la durée d'acquisition nécessaire à la détection de ces N photons (représentés par le niveau de gris).

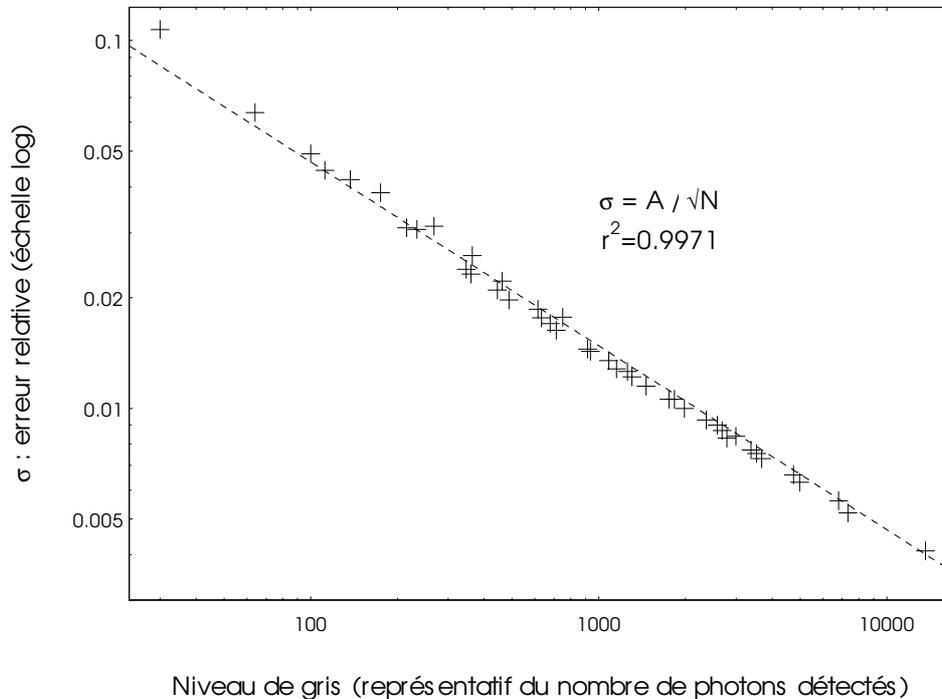


Figure 36 : Evolution du bruit expérimental en fonction du nombre de photons détectés.

Si ces considérations sur l'erreur invitent à travailler avec des rayonnements durs, il convient cependant de relativiser cette erreur par rapport au signal que nous nous proposons maintenant de quantifier.

4.2.2.3 Mesure du contraste (signal)

Les niveaux de gris d'une image, compris entre 0 et 1, correspondent au pourcentage d'intensité du rayonnement incident transmis à travers l'échantillon (I/I_0). La présence de ce dernier génère donc un signal (S), ou "contraste", qui correspond à l'atténuation du rayonnement et qui s'écrit :

$$S = 1 - \frac{I}{I_0}$$

Il ne dépend que du spectre d'émission de la source, de la nature du matériau traversé (i.e. de sa composition atomique) et de son épaisseur. Afin de réaliser cette étude, nous avons

envisagé d'utiliser du bois mais l'échelle d'observation fait ressortir des hétérogénéités, même dans du bois d'alisier (réputé très homogène), qui rendent les mesures dépendantes de l'échantillon usiné. Nous avons donc utilisé un matériau homogène dont la composition atomique est très proche de celle du bois.

Il est donc ici utile de rappeler quelques éléments sur la constitution du matériau bois. La matière ligneuse est essentiellement composée de trois types de constituants, à savoir la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Les poids approximatifs des éléments qui les composent (Carbone, Oxygène et Hydrogène) sont reportés ci-dessous .

	cellulose et hémicellulose	lignine
C %	44	61
H %	6	6
O %	50	33

Composition atomique des constituants de la matière ligneuse du bois (cité dans [Polge, 1966])

L'interaction rayonnement-matière ne dépend que de ces valeurs. De densité proche de celle de la matière ligneuse et de constitution atomique proche de celle du bois en terme de proportion des éléments constituant (proportion de C, H et O identiques), le Polyoxyméthylène (ou "Kemetal") répond au critère de "ressemblance" de propriété d'absorption des rayons X.

Cellulose : $C_6H_{12}O_6$

Kemetal : CH_2O

Nous avons donc usiné des cales de différentes épaisseurs. Préparées à l'aide d'une micro tronçonneuse, la précision, contrôlée à l'aide d'un micromètre à Palmer, montre une régularité de l'épaisseur de coupe à 1/100 mm. La cale est disposée sur le porte échantillon de façon à masquer environ la moitié du champ visuel de la caméra (Figure 37). Sur cette zone est mesuré le rapport I/I_0 après normalisation de l'image réalisée suivant l'équation 7 grâce à l'autre moitié exempte de tout élément absorbant.

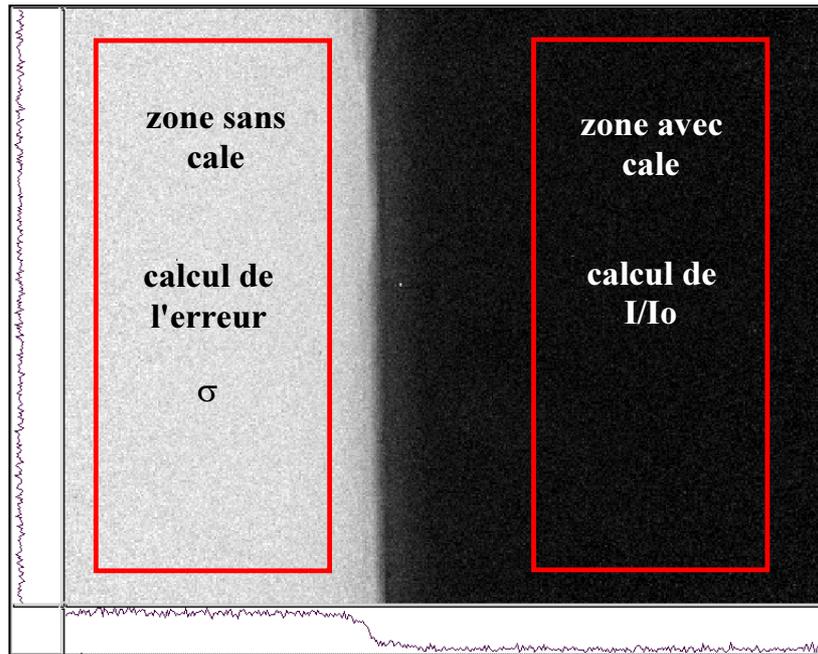


Figure 37 : Méthode de calcul du contraste. Le fond (zone sans cale) permet la normalisation à 1. La zone avec la cale permet la mesure de I/I_0 et ainsi le calcul du signal ($S=1-I/I_0$)

Les courbes de la Figure 38 représentent l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus avec 7 cales dont les épaisseurs varient de 250 μm à 3.99 mm.

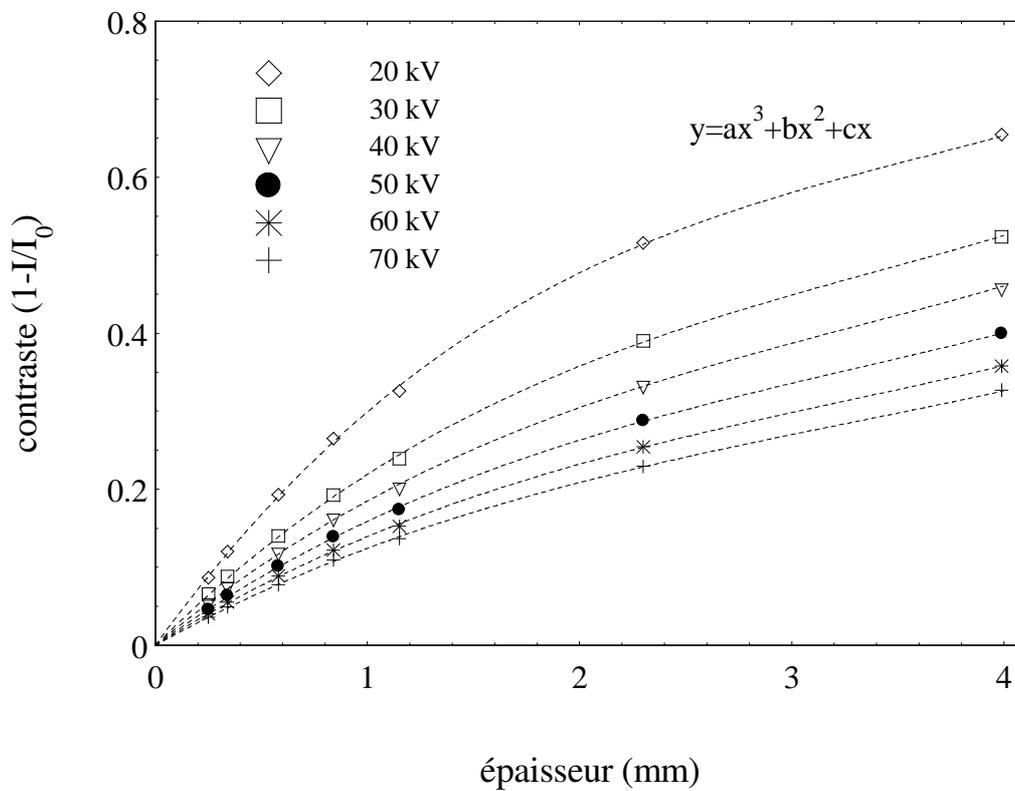


Figure 38 : Evolution du signal en fonction de l'épaisseur de Kemetal traversée

Si l'on retrouve la tendance classique à l'augmentation du contraste avec l'épaisseur de matière traversée ainsi qu'avec la baisse de la tension accélératrice, ces mesures reflètent aussi la complexité du phénomène d'atténuation dans le cas d'un rayonnement polychromatique. En particulier, contrairement au cas monochromatique, la réponse ne peut être modélisée suivant une loi exponentielle [Perré et Thiercelin, 1997].

4.2.2.4 Rapport signal-bruit

L'observation de la courbe précédente conduit logiquement à une utilisation de rayonnements mous afin de maximiser le contraste. Polge (1966) était arrivé à cette même conclusion. Cependant, nous avons pu constater (§4.2.2.2) que la tension accélératrice, par l'augmentation de l'intensité émise [Guinier, 1964], influençait fortement l'erreur relative au nombre de photons détectés. Afin de déterminer les conditions d'exposition, c'est donc le rapport Signal/Bruit (S/B) qu'il s'agit d'optimiser.

Raisonnant toujours avec les cales de Kemetal, le signal enregistré, pour une épaisseur donnée, est déterminé par le seul choix de la tension accélératrice. La durée d'exposition fixe alors le nombre de photons détectés par chaque pixel et ainsi l'erreur (σ) (Figure 35). Le rapport S/B, erreur relative que nous cherchons, est alors quantifié. Cette démarche permet de tracer, pour chaque tension accélératrice, la surface représentative de S/B en fonction de l'épaisseur et de la durée d'acquisition. A cette fin, le signal est approché par un polynôme d'ordre 3 ($r^2 > 0.998$) fonction de l'épaisseur e . Le rapport S/B s'écrit alors :

$$\frac{S}{B} = (ae^3 + be^2 + ce) \times \frac{\sqrt{t}}{d} \quad \text{Eq : 8}$$

a, b, c, d : constantes dépendantes de la tension accélératrice

t : temps

e : épaisseur de Kemetal traversée

A titre d'exemple, la Figure 39 représente deux surfaces, l'une pour 20 kV, l'autre pour 70 kV. Dans la gamme d'épaisseur de Kemetal 0-4 mm étudiée ici, la résolution du signal augmente toujours avec la tension accélératrice.

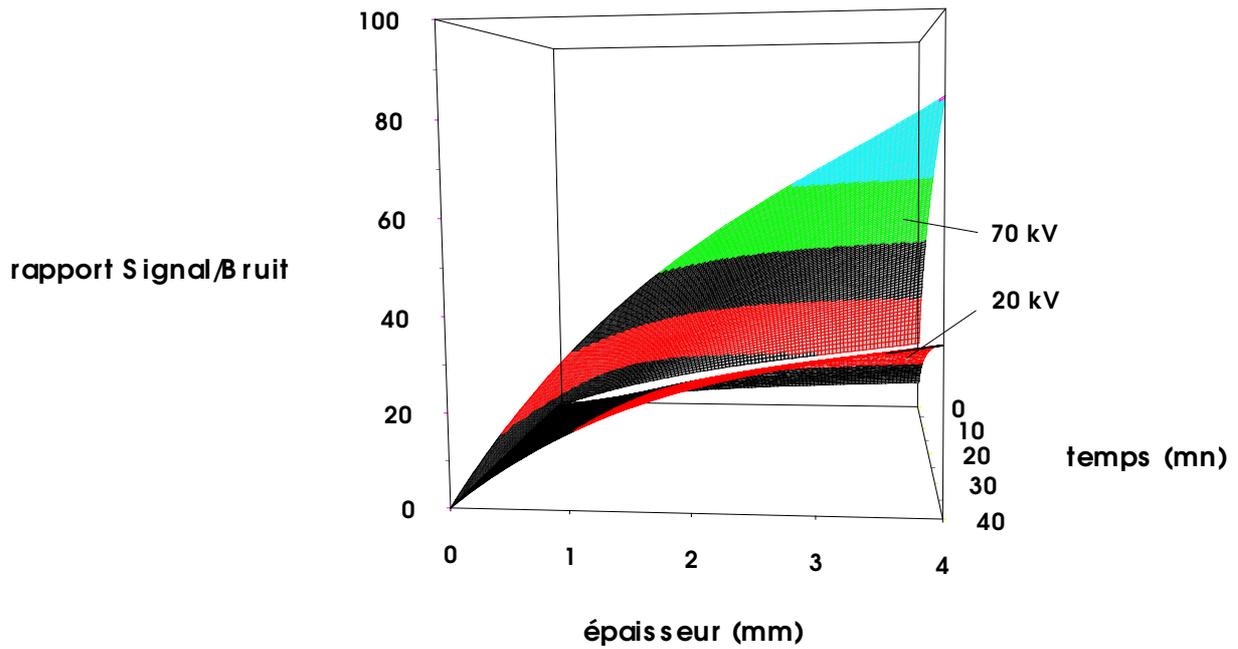


Figure 39 : Rapport Signal/Bruit : Le flux généré par l'augmentation de la tension accélératrice réduit le bruit, compensant ainsi la réduction de l'amplitude du signal détecté.

Dans la pratique, le problème peut être vu sous un autre angle, à savoir la recherche, pour une épaisseur donnée, de la durée d'acquisition minimum requise afin d'obtenir une résolution fixée. La Figure 40 représente le faisceau de courbes obtenues pour un rapport $S/B=20$ à l'aide de l'équation 8. Il apparaît alors ici plus clairement que, quelle que soit l'épaisseur de Kemetal comprise entre 0 et 4 mm, le flux doit être privilégié afin de réduire le bruit, même au détriment d'un signal plus faible.

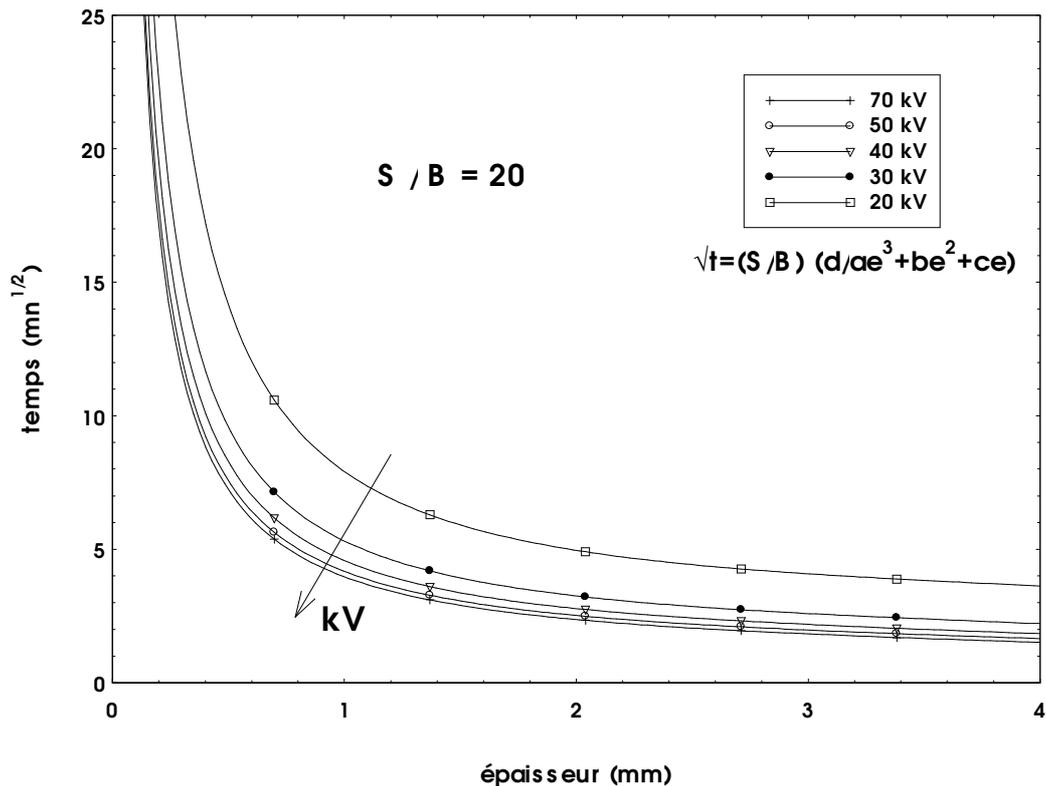


Figure 40 : Durée d'acquisition nécessaire à l'obtention d'un rapport $S/B=20$. Courbes tracées à l'aide l'équation 8:

$$\sqrt{t} = (S/B) \left(d / (ae^3 + be^2 + ce) \right)$$

ex : pour $e=1\text{mm}$ la durée minimum d'acquisition requise pour $S/B=20$ est, pour des tensions accélératrices de 70,30 et 20 kV, respectivement de 16, 28 et 63 minutes.

Cet abaque sera utilisé pour les expérimentations ultérieures. La durée d'exposition pour obtenir une résolution différente doit être re-évaluée . Ainsi, pour un rapport $S/B=20 \times 2$, les temps indiqués sur la courbe doivent être multipliés par 2^2 (cf. Eq. 8).

4.2.3 Reproductibilité

La reproductibilité ne peut être assurée entre deux images brutes (§ 4.2.2.1). La correction préconisée précédemment (Eq : 7) se proposait de maîtriser une partie de ce problème. Il convient cependant de vérifier que deux images réalisées dans des conditions expérimentales identiques et subissant le même protocole de corrections donnent finalement un résultat similaire. Afin de s'affranchir des problèmes dus à la structure hétérogène du bois de chêne (dans le cas, par exemple, d'un léger déplacement de l'échantillon entre 2 acquisitions), nous avons utilisé, à titre d'exemple, la cale de Kemetal de 1 mm. La reproductibilité dépend

fortement du bruit expérimental et donc de la durée d'acquisition. Aussi, dans un souci de rester proche des conditions normales d'utilisation du dispositif, nous limiterons ici la durée d'acquisition à 40 min (conditions d'exposition : 70 kV, 95 μ A, Binning : 3x3). Après corrections, les deux images sont comparées par division. La moyenne mesurée sur la zone où la cale a absorbé le rayonnement vaut 1.00008 avec un écart-type $\sigma = 0.0042$.

Dans ces conditions d'exposition, nous pouvons donc conclure à une excellente reproductibilité de la détection pour chacun des pixels.

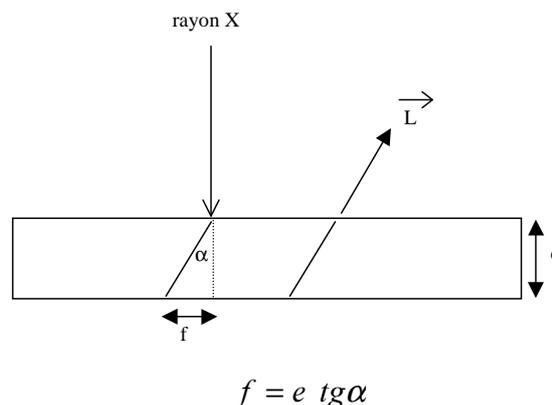
5 Utilisation du dispositif à des fins d'imagerie anatomique de bois

L'ambition de ce chapitre est la détermination des conditions optimales permettant de réaliser des images de la structure anatomique du bois de chêne en conciliant résolution spatiale, résolution sur le signal d'atténuation ainsi que durée d'exposition.

5.1 Usinage de l'échantillon

5.1.1 Flou dû à l'orientation des axes matériels du bois

Concernant la résolution spatiale, nous avons déjà évoqué les différentes causes de flou, contrôlable ou non, dont l'excentricité qui joue en faveur d'une réduction de l'épaisseur de l'échantillon. Un dernier paramètre doit cependant être pris en compte lors de l'usinage : les axes matériels du matériau. La particularité de la structure du bois (§3.1.2) est son caractère quasi bidimensionnel (du moins à l'échelle où nous le considérons). Une inclinaison de l'axe longitudinal (\vec{L}) par rapport au faisceau X génère donc un flou du même type que celui dû à l'excentricité.



A titre de comparaison, le dimensionnement du dispositif ($L_1+L_2=175$ cm ; excentricité maximum du scintillateur : 1,5 cm), implique une utilisation d'un cône de faisceau dont l'ouverture est inférieure à 0.5° .

L'orientation de l'échantillon lors de l'usinage est un paramètre qui nécessite une attention particulière mais qui reste difficile à maîtriser précisément. La réduction de l'épaisseur sera donc utilisée en complément de façon à limiter le flou.

5.1.2 Préparation – usinage de l'échantillon

Les échantillons sont sciés à l'état sec à l'aide d'une micro tronçonneuse. Cet outil permet un positionnement précis ($5 \mu\text{m}$) du porte échantillon par rapport à la lame fixe (Figure 41). La très faible vitesse d'avance ($5 \mu\text{m s}^{-1}$) permet d'obtenir une bonne qualité de surface ainsi qu'une excellente régularité d'épaisseur (mesure de contrôle : mieux que $10 \mu\text{m}$) sans détérioration de l'échantillon (fentes, arrachement de fibres...).

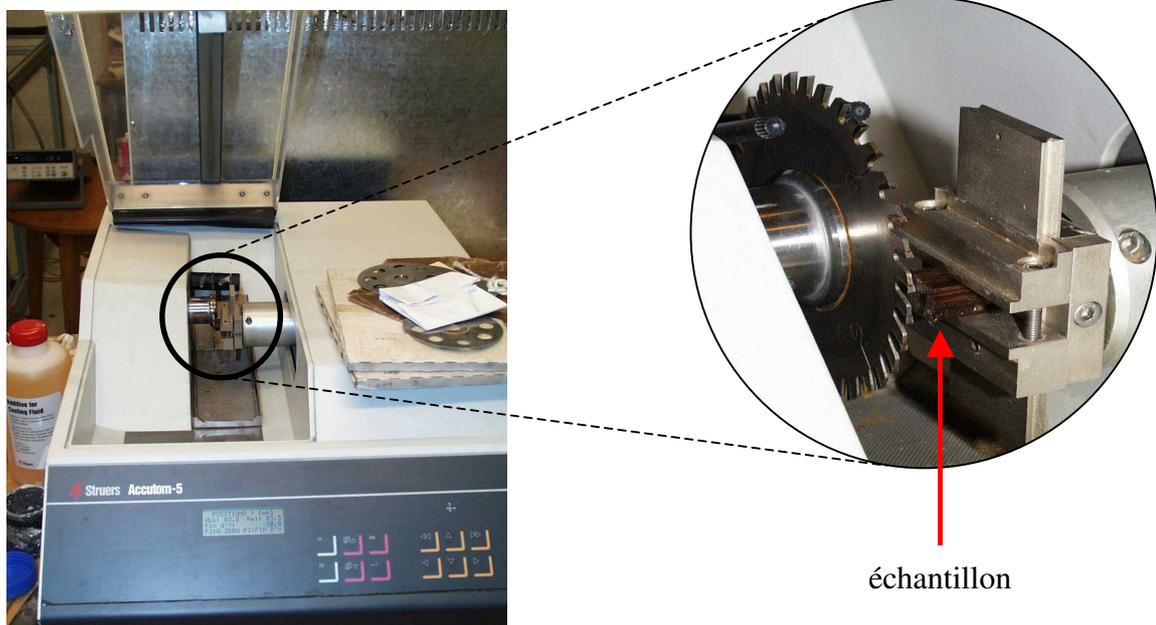


Figure 41 : Micro-tronçonneuse

S'il est possible d'usiner ainsi des échantillons de $200 \mu\text{m}$ d'épaisseur, les considérations sur la résolution du signal (§4.2.2.4) nous invitent à un minimum d'environ $400 \mu\text{m}$. La durée

d'acquisition reste alors raisonnable (de l'ordre de la dizaine de minutes), l'erreur sur l'épaisseur de l'ordre de 2,5%.

Remarque : les cales de Kemetal utilisées dans ce chapitre pour les mesures de I/I_0 ont été usinées avec ce matériel et les mêmes paramètres de coupe.

5.2 Exemple d'image d'anatomie

Nous avons discuté de l'intérêt certain de réaliser des acquisitions de longue durée. D'autre part, nous avons montré qu'il est possible de tenir compte d'une différence d'intensité globale entre deux images. Ces deux remarques permettent d'envisager une correction de fond par une image dont la durée d'acquisition peut être différente de l'image "à corriger". Aussi, dans la pratique, nous réalisons des images de fond de longue durée, donc très peu bruitées, qui deviennent les images de référence utilisées pour la correction. Par ce principe, la qualité de l'image finale, en terme de résolution de niveau de gris, est accrue et le nombre d'images à collecter restreint.

L'image ci-dessous a été réalisée avec une tension accélératrice de 70 kV et une intensité de 95 μ A (Figure 42). La faible épaisseur de l'échantillon (500 μ m) limite les flous dus à l'angle entre les rayons X et l'axe longitudinal du bois. Le grossissement x 2,75 permet de compenser en partie la faible résolution du scintillateur. Au sein de ces deux cernes d'accroissement annuels, nous distinguons nettement les gros vaisseaux dont le diamètre est typiquement de l'ordre de 300-400 μ m et les rayons ligneux.

La résolution permet également de distinguer des détails anatomiques tels que les nombreux petits vaisseaux contenus dans la zone de parenchyme du bois d'été. Leur diamètre est de l'ordre de 20-30 μ m.

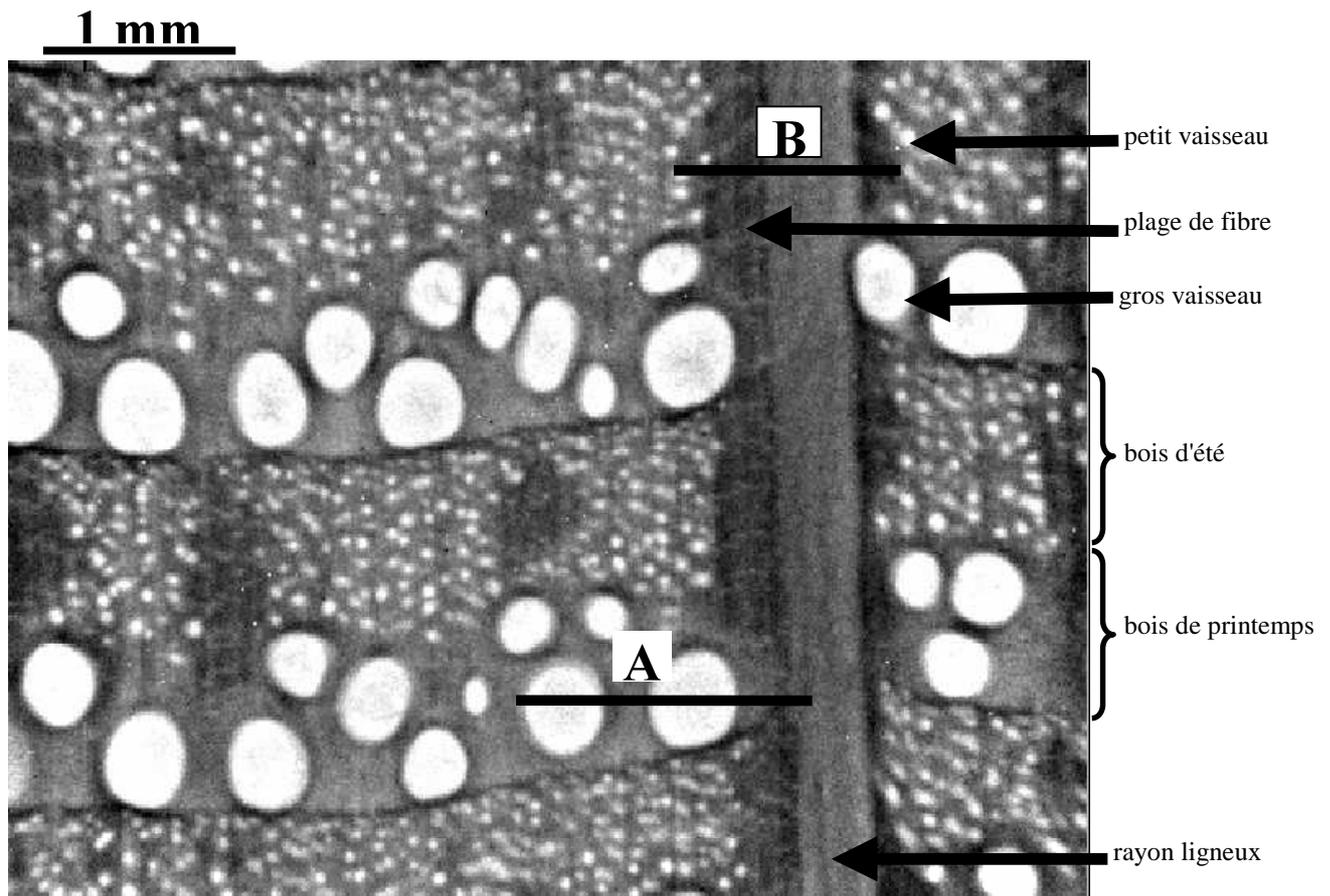


Figure 42 : Image de la structure transverse du bois de chêne (condition d'exposition : 70 kV, 95 μ A, 40 mn, binning 3x3)

La Figure 43 représente 2 profils calculés à partir des niveaux de gris de l'image précédente. On remarque en particulier l'absorption nulle des vaisseaux (profil A) et maximum dans les zones de fibre, ici situées le long du rayon ligneux (profil B). La résolution quantitative permet de distinguer nettement le rayon ligneux des plages de fibres qui l'entourent.

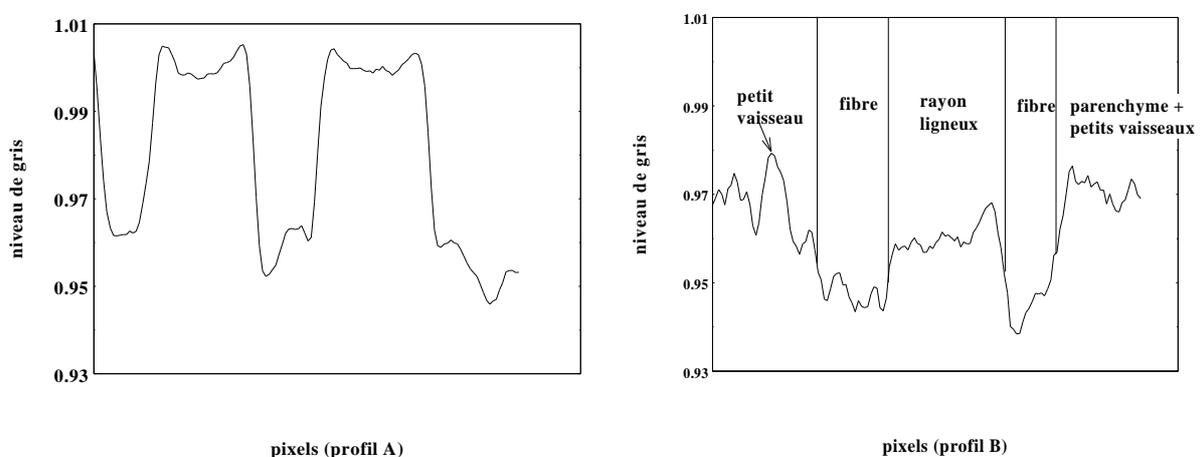


Figure 43 : Profils des niveaux de gris. Sur le profil A, les vaisseaux, de niveau de gris égal à 1, n'ont pas absorbé le rayonnement X. Sur le profil B, le rayon ligneux se détache nettement, même entouré par les plages de fibre.

6 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principaux paramètres qui ont conduit à la conception et aux choix technologiques du dispositif d'imagerie.

La structure particulière du bois, quasiment 2D, a très fortement influencé le dimensionnement et en particulier le choix des grandes distances source-échantillon et source-scintillateur. La conséquence majeure de cette caractéristique, couplée avec le faible flux de la source X, est la durée d'exposition qui reste de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes. Hormis ce paramètre non négligeable, les performances ont été évaluées tant en terme de résolution spatiale que de précision de la mesure de l'atténuation du rayonnement X incident.

Contrairement aux techniques classiques basées sur la détection du rayonnement X par l'utilisation d'un film radiographique, il s'avère que l'intérêt de l'emploi d'une forte tension accélératrice est indéniable. Il faut cependant distinguer deux types d'utilisation de notre dispositif :

- Pour une imagerie quantitative, c'est-à-dire dont l'objectif est la détermination précise de l'atténuation du rayonnement X incident, l'épaisseur de l'échantillon et la durée d'acquisition sont intimement liées. La résolution, en terme de signal, nécessitant le plus grand nombre possible de photons détectés, ne s'obtient donc qu'au prix d'une acquisition de longue durée. La génération de super pixels virtuels peut alors s'avérer une alternative intéressante tant qu'elle n'altère pas excessivement la résolution spatiale de l'image. C'est généralement selon ce principe que nous réaliserons les images de structure qui seront ultérieurement la base de la création des maillages numériques. Outre les corrections usuelles pratiquées sur l'image brute (soustraction du background, division par le flatfield), la mesure quantitative de l'atténuation du rayonnement X et sa répétabilité ne peuvent être assurées que par la prise en compte de la variation éventuelle du flux incident entre différentes expérimentations. Une nouvelle correction est alors nécessaire.

- Pour une imagerie dont l'objectif quantitatif est d'ordre spatial, il peut être nécessaire d'utiliser tout le potentiel de pixels du détecteur. Nous verrons dans le chapitre III l'utilisation du dispositif dans ces conditions (mesure du retrait libre microscopique). La résolution en

terme d'absorption ne pourra alors être obtenue qu'au prix de très longues acquisitions (9 fois supérieures à celles indiquées sur la Figure 40).

Le passage de l'information en niveaux de gris à celle en densité, paramètre explicatif important de certaines propriétés du bois, n'a pas été ici explicitement réalisé. Cependant, grâce à l'utilisation de cales d'épaisseur et densité connues (telles celle utilisées §4.2.2.3), ce passage devient immédiat dès lors que l'épaisseur de l'échantillon est déterminée. On prendra alors soin de contrôler le taux d'humidité, l'eau contenue dans le bois concourant à l'atténuation du rayonnement X.

Enfin, en guise de perspective, notons que ce dispositif d'imagerie est une première approche de ce domaine dans le laboratoire et que la conception volontairement très évolutive du système nous permet d'envisager le passage de la projection simple à la microtomographie. Les problèmes de flou, ici dus essentiellement à l'épaisseur de l'échantillon, seront alors, par principe, partiellement résorbés. Les dimensions du banc pourront alors être considérablement réduites et permettre un grossissement par rayons X bien supérieur à celui utilisé ici, limitant ainsi l'influence de la résolution spatiale du scintillateur. Si la réduction de la distance source-scintillateur diminue fortement la durée d'acquisition d'une seule image, n'omettons pas de souligner qu'une reconstruction de qualité en nécessite plusieurs centaines.

2^{ème} Partie :

*Mesures des propriétés microscopiques des
principaux éléments du plan ligneux*

CHAPITRE II

MESURES DES PROPRIETES ELASTIQUES PAR DES ESSAIS DE TRACTION SOUS MICROSCOPE

1 Introduction

Outre, la compréhension du comportement mécanique du bois de chêne, les propriétés mécaniques individuelles des constituants du plan ligneux jouent un rôle essentiel dans le phénomène du retrait. Ce sont donc des paramètres importants à estimer.

La difficulté réside dans l'échelle d'investigation requise pour notre étude : en dessous du millimètre, et parfois jusqu'au micromètre. En particulier, afin d'éviter toute perturbation, le champ de déformation devrait se mesurer sans contact, ce qui n'est pas toujours le cas.

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des propriétés mécaniques élastiques (modules d'Young et coefficients de Poisson) des principaux éléments du plan ligneux de chêne. Le principe expérimental est le même que celui qui fut mis au point par **Farruggia et Perré (1999)** pour des résineux. En revanche, la faible dimension des échantillons rend leur préparation encore plus délicate. Du point de vue expérimental, il n'est pas imaginable d'accéder aux propriétés des différents composants à partir d'un même échantillon de bois. Aussi notre ambition se limitera-t-elle à tenter de mesurer le maximum de propriétés sur des échantillons de provenance différentes (nous entendons ici par provenance des arbres différents ou des positions différentes dans l'arbre). La zone d'échantillonnage est choisie en fonction de l'expression particulière du plan ligneux afin de permettre le prélèvement d'une éprouvette composée de tissu "homogène" à l'intérieur du cerne.

2 Matériel et méthode

2.1 *Machine d'essais micro mécaniques*

La méthode expérimentale utilisée dans ce travail est celle qui fut mise au point par **Farruggia et Perré (1999)**. Elle a pour base une micro-machine d'essais (Figure 44) qui permet d'effectuer des tests en traction sur des éprouvettes de faibles dimensions : une platine de déplacement permet de solliciter l'échantillon alors qu'une cellule de force restitue la valeur de la charge appliquée. L'ensemble est installé sous un microscope optique (Figure 45) équipé d'une caméra pilotée par ordinateur. Un logiciel d'analyse d'image permet l'acquisition de vues qui serviront au calcul du champ de déformation.

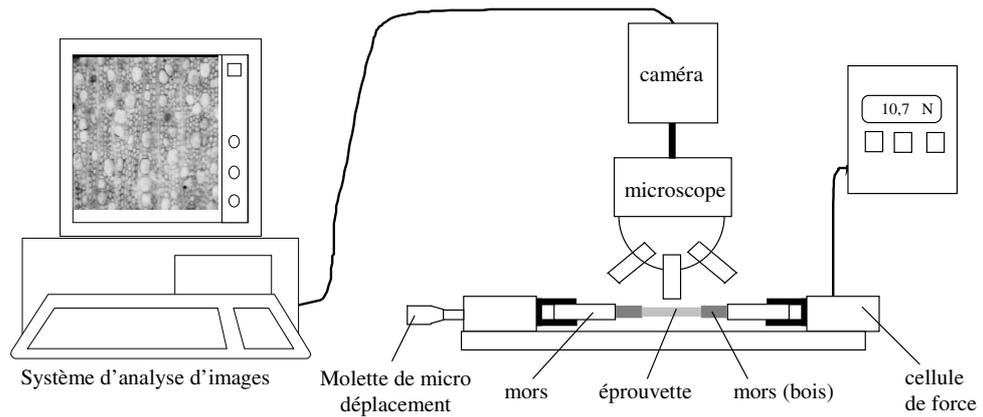


Figure 44 : Système expérimental d'essai mécanique sous microscope. La comparaison d'images avant et après sollicitation permet de calculer le champ de déformation alors que le capteur de force permet d'accéder à la contrainte correspondante.

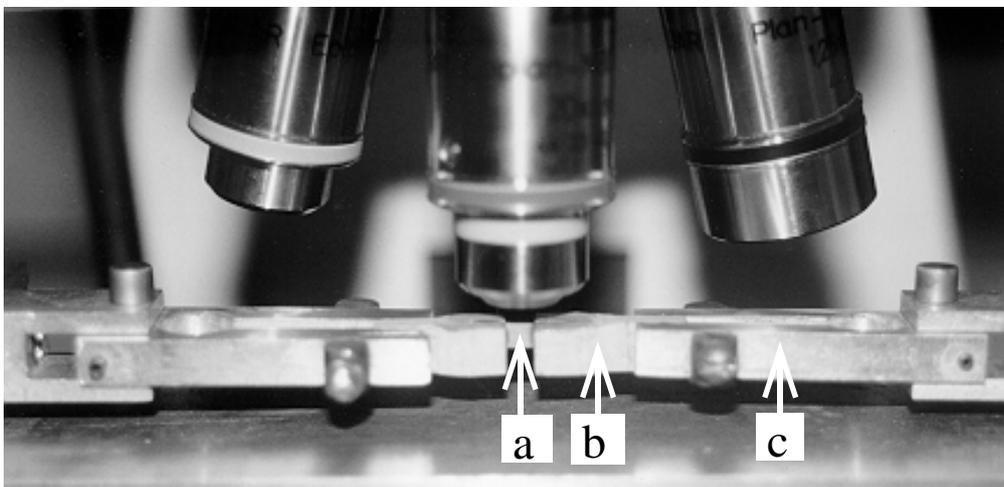


Figure 45 : Micro machine d'essai placée sous microscope. L'éprouvette de traction (a) est collée dans des mors en alu (b) eux même serrés dans des mâchoires métalliques (c)

Pour des échantillons dont les dimensions n'excèdent pas quelques millimètres de longueur et quelques centaines de micromètres dans la section, il incombe à l'expérimentateur d'accéder au champ de déformation sans contact. Une méthode utilisant l'image comme source d'information pour accéder au tenseur de déformation de l'éprouvette a été mise au point au laboratoire [Lahbabi, 1995]. Son principe repose sur la comparaison de la distribution des niveaux de gris des pixels entre l'image déformée et l'image de référence prise avant sollicitation. Le calcul permet d'accéder à trois composantes du tenseur de déformation dans le plan RT: ϵ_{xx} , ϵ_{yy} et ϵ_{xy} (x étant la direction de la traction et y son orthogonale dans le plan de l'image) supposé uniforme dans la fenêtre d'exploration. Le tenseur des contraintes, lui-même supposé uniforme dans la section, est réduit à une seule composante non nulle :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S}$$

σ : contrainte (MPa)

F : force appliquée (N)

S : section de l'échantillon (m²)

Les deux composantes ϵ_{xx} et ϵ_{yy} mesurées en fonction de la charge F permettent de tracer les courbes déformation-contrainte. En exprimant la loi de comportement élastique dans la cas d'une traction unidirectionnelle, la valeur du module d'Young E_x dans la direction de la sollicitation et celle du coefficient de Poisson, ν_{xy} sont données par :

$$\sigma_{xx} = E_x \epsilon_{xx} \quad \text{et} \quad \epsilon_{yy} = -\nu_{xy} \epsilon_{xx}$$

La valeur de la déformation en cisaillement ϵ_{xy} est utilisée afin de vérifier, à posteriori, que la traction a bien été réalisée selon les axes principaux du matériau. Par ailleurs, seuls les points situés dans la zone élastique linéaire sont pris en considération. A cette fin, les dernières images sont éliminées lors de l'analyse des courbes expérimentales. Le calcul de chaque point de la courbe, effectué par comparaison de deux images nécessite, environ 2 minutes sur un PC à base de Pentium II.

Après avoir appliqué une précharge de quelques newtons, une première prise de vue de l'échantillon est réalisée. Elle constituera l'image de référence. La fenêtre d'exploration est choisie en fonction de la section de l'éprouvette afin de se situer dans la partie centrale de la face observée. Le grossissement est adapté à la taille et la structure anatomique de chaque échantillon. En général, l'objectif x10 est utilisé. Il permet de cadrer un champ de mesure correspondant à un carré de 700 μm d'arête pour une image numérisée de 256 par 256 pixels. A chaque incrément de chargement, une nouvelle image est mémorisée et la force appliquée est notée. L'essai prend fin avec la rupture de l'échantillon ou lorsque la valeur maximale supportée par la cellule de force est atteinte (100 N).

Une macrocommande a été écrite sur le logiciel de traitement d'images (VISILOG) afin de réduire le laps de temps entre les différentes acquisitions et de diminuer les effets dus au phénomène de relaxation des contraintes.

La qualité de l'image étant un paramètre important pour le calcul ultérieur du champ de déformation, le bruit propre à la caméra est largement atténué en intégrant le signal sur une trentaine d'images durant l'acquisition.

2.2 Echantillonnage et préparation des éprouvettes

La préparation d'un essai mécanique est la phase la plus longue et la plus délicate du processus. Elle se décompose en deux parties : la sélection de l'échantillon et la préparation de l'éprouvette de traction.

Le plan ligneux du chêne est extrêmement complexe par son hétérogénéité. Au sein d'un accroissement annuel, nous distinguons quatre zones principales, discernables à l'œil nu : le gros rayon ligneux, bien différencié par l'orientation de ses cellules dans la direction radiale, la zone initiale poreuse, constituée essentiellement de gros vaisseaux, de parenchyme longitudinal et de fibres trachéides, et le bois final dans lequel nous séparons encore les plages de fibre et les plages de parenchyme contenant des petits vaisseaux (Figure 46). S'il est à noter que l'on trouve quelques cellules de parenchyme longitudinal dans des zones de fibre, et réciproquement, nous garderons dans la suite du texte, par commodité, les appellations générales « plage de fibres » et « plage de parenchyme ».

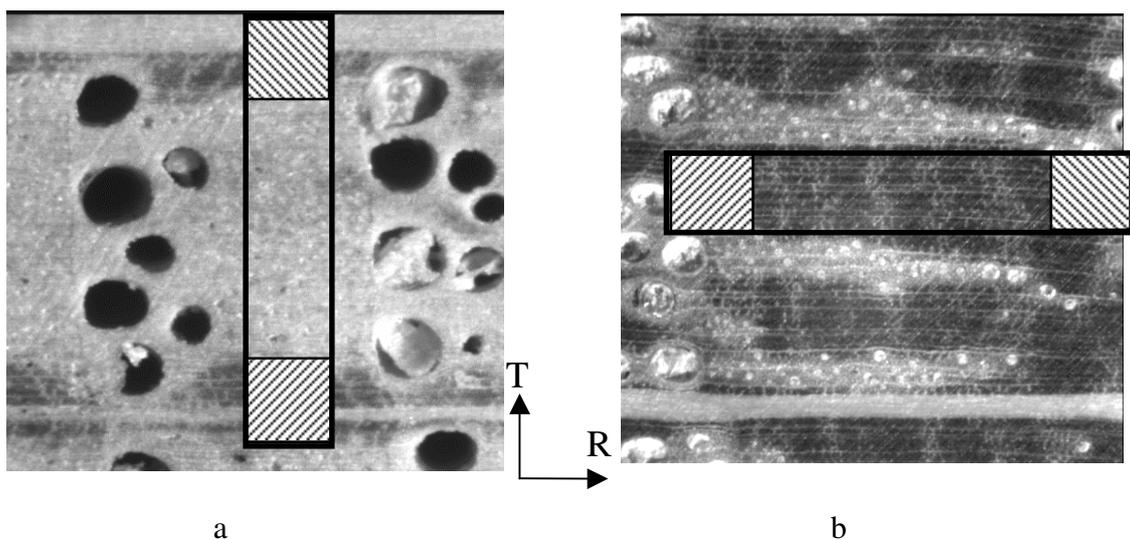


Figure 46 : Photo a : Echantillonnage d'une zone de parenchyme et petits vaisseaux (zone claire) de bois d'été destinée à un essai mécanique de traction dans la direction tangentielle. Photo b : Echantillonnage d'une zone de fibre (zone sombre) de bois d'été destinée à un essai de traction dans la direction radiale

Nous intéressent ici aux propriétés mécaniques dans le plan transverse, cette distinction nous amène donc à envisager huit types d'essais mécaniques. Chacun d'eux nous conduit à la recherche de cernes particuliers permettant l'isolement d'une plage de tissu de taille suffisamment importante pour pouvoir y usiner une éprouvette. Pour un essai de traction tangentielle dans une plage de parenchyme, l'expérimentateur recherchera une zone à forts accroissements annuels sans développement de fibres et sans gros rayon ligneux (Figure 46a). Par opposition, un essai de traction sur la zone de fibre dans la direction radiale nécessitera un échantillonnage dans une zone à très faible proportion de parenchyme (Figure 46b).

Cette recherche de cernes d'accroissement aussi particuliers ne peut malheureusement se faire qu'au détriment de l'homogénéité de l'échantillonnage. Aussi devons nous avoir à l'esprit que les échantillons peuvent provenir de cernes ou d'arbres différents. Les propriétés mécaniques à l'échelle cellulaire, c'est-à-dire les propriétés même des parois sont donc vraisemblablement différentes en raison de leur composition chimique, de l'arrangement des différentes couches qui les composent ainsi que de la structure même de ces dernières (angle des microfibrilles, différence de cohésion entre les couches S1 et S2...). Cette remarque est en grande partie responsable de la forte variabilité attendue, et obtenue, dans les résultats.

L'échantillon est obtenu par ponçages successifs à l'aide de disques abrasifs de plus en plus fins collés sur des plateaux de verre. Ce polissage a pour objectif d'obtenir une éprouvette de section rectangulaire constante et homogène, c'est-à-dire constituée d'un seul type de tissu au sens où nous les avons définis précédemment. La section et la longueur de l'échantillon dépendent du type de tissu considéré, l'épaisseur n'étant souvent que de quelques centaines de micromètres. Cette étape longue et délicate conditionne très fortement la qualité des résultats de l'expérience et nécessite de l'ordre d'une journée de préparation. La difficulté et le temps de préparation sont des éléments qui restreignent considérablement le nombre d'essais à envisager. Enfin, afin de garantir une certaine stabilité hydrique, les essais sont réalisés pendant la période hivernale dans une pièce chauffée. Ainsi les échantillons ont-ils une teneur en eau comprise entre 6 et 8 %.

Après polissage, les éprouvettes sont collées pendant une nuit à l'intérieur de fentes, préparées par un sciage fin, dans des mors en bois préalablement fixés sur la machine d'essai (Figure 47).

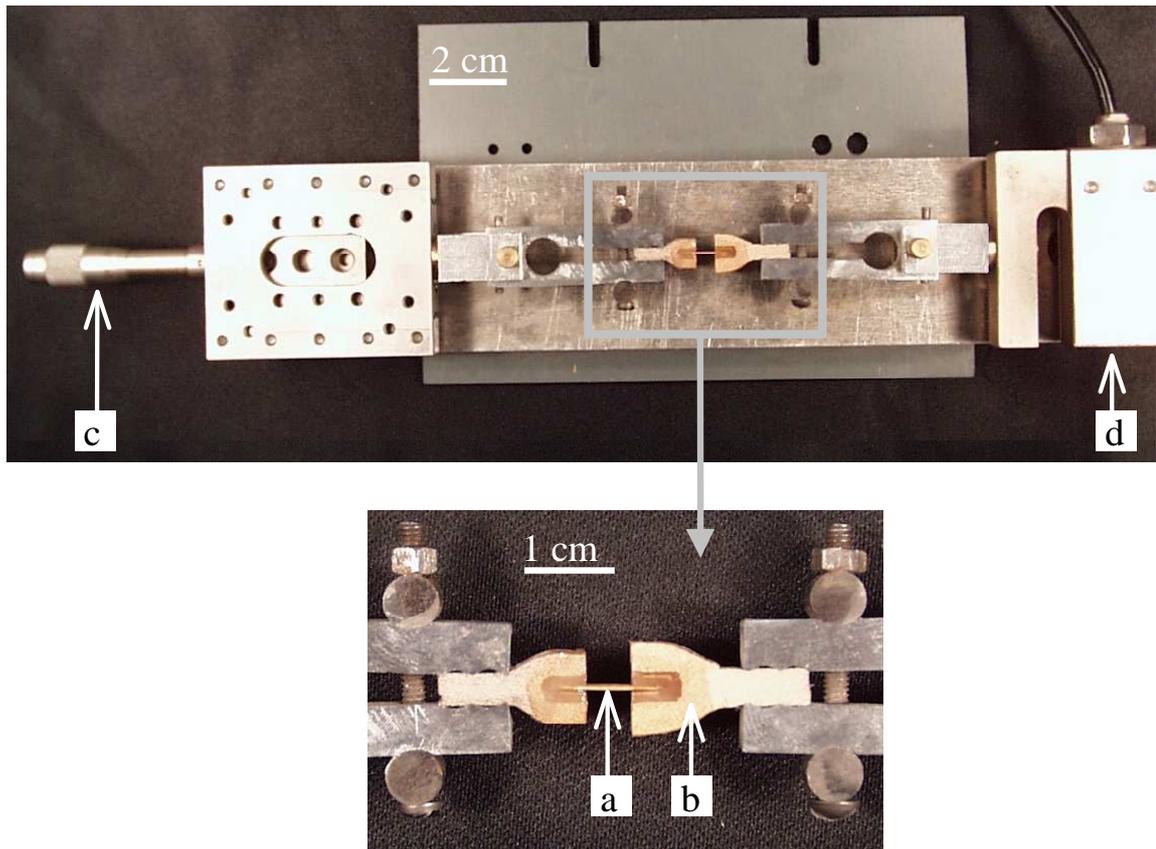


Figure 47 : Micro machine de traction. L'éprouvette (a) est collée dans des mors en bois (b). Une micro molette de déplacement (c) permet de solliciter l'échantillon en traction, la force appliquée étant mesurée grâce au capteur (d)

En raison de la faible taille des éprouvettes, cette opération est très délicate. La qualité du positionnement de l'échantillon étant primordiale pour la suite de l'expérience, il est parfois nécessaire de réaliser cette opération sous microscope.

2.3 Estimations des erreurs expérimentales

La première source d'erreur provient de l'usinage de l'échantillon. La précision de ses dimensions, en particulier la régularité de sa section, est un facteur essentiel pour pouvoir appliquer les formules simples énoncées plus haut. Des mesures sont donc réalisées en différents points à l'aide d'un pied à coulisse dont les indications sont précises au 1/100 mm (Figure 48). L'usinage est achevé lorsque toutes les valeurs mesurées sont égales à 10 μ m près pour une section voisine de 1 mm par 2 mm. Il est donc possible de chiffrer l'erreur sur la section de l'éprouvette à environ 5%.

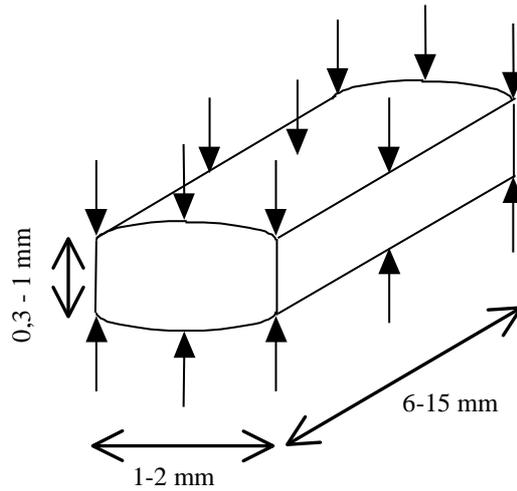


Figure 48 : Points de mesures permettant le contrôle du parallélisme des faces de l'éprouvette (les valeurs sont données à titre indicatif)

Durant l'essai mécanique, on peut observer, après chaque nouvel incrément de force, une relaxation de l'échantillon. Celle-ci varie en fonction de la nature de l'éprouvette et augmente au cours de l'essai mais ne dépasse pas 5% de la valeur mesurée entre 2 prises de vue.

Nous avons déterminé l'erreur due au calcul du champ de déformation. Le nombre d'intégrations réalisées lors de l'acquisition joue ici un rôle important (Figure 49). Cependant, un compromis doit être trouvé entre le temps d'intégration et les problèmes de relaxation cités ci-dessus. En pratique, les conditions expérimentales choisies sont telles que la précision reste de l'ordre de 10^{-4} .

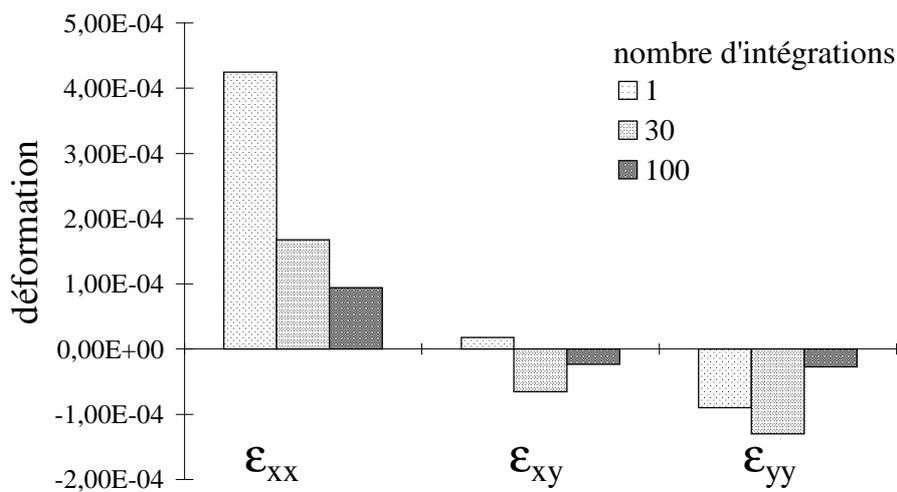


Figure 49 : Influence du nombre d'intégrations réalisées lors de l'acquisition sur la précision de la mesure du champ de déformation. Comparaison de deux images 256 x 256 translattées.

Les propriétés mécaniques sont calculées à partir de droites de régressions. L'essai est validé lorsque les coefficients de corrélation sont assez grands pour que les valeurs calculées soient considérées comme significatives. Pour le module d'Young, la valeur limite a été fixée à $R^2=0,95$. Les valeurs de déformation relatives au coefficient de Poisson étant généralement plus faibles, et donc plus difficiles à mesurer, nous avons été moins exigeants sur cette corrélation. Les Figure 50 et Figure 51 montrent deux exemples dont les valeurs sont jugées significatives pour les deux paramètres calculés.

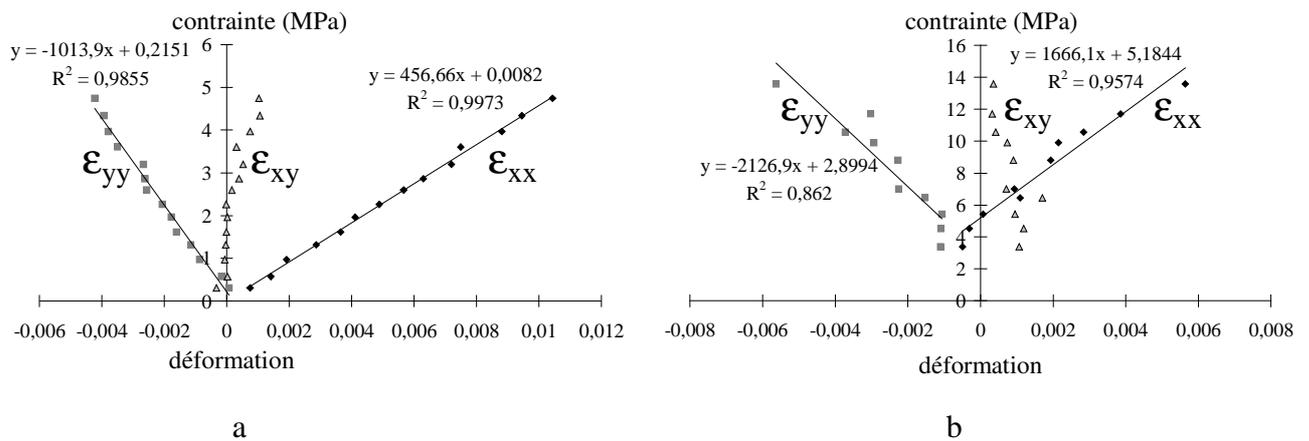


Figure 50 : Calcul du module d'Young par la relation contrainte-déformation, $\sigma=f(\epsilon)$, lors d'un essai de traction dans le plan transverse : les indices xx et yy correspondent respectivement à la direction de sollicitation de l'échantillon et à son orthogonale. Chaque point expérimental est le résultat de la comparaison de la distribution des niveaux de gris d'une image avec ceux de l'image de référence (éprouvette non chargée) – a : cas d'une zone initiale poreuse. $E_R=456$ MPa – b : cas d'une plaque de parenchyme. $E_R=1666$ MPa

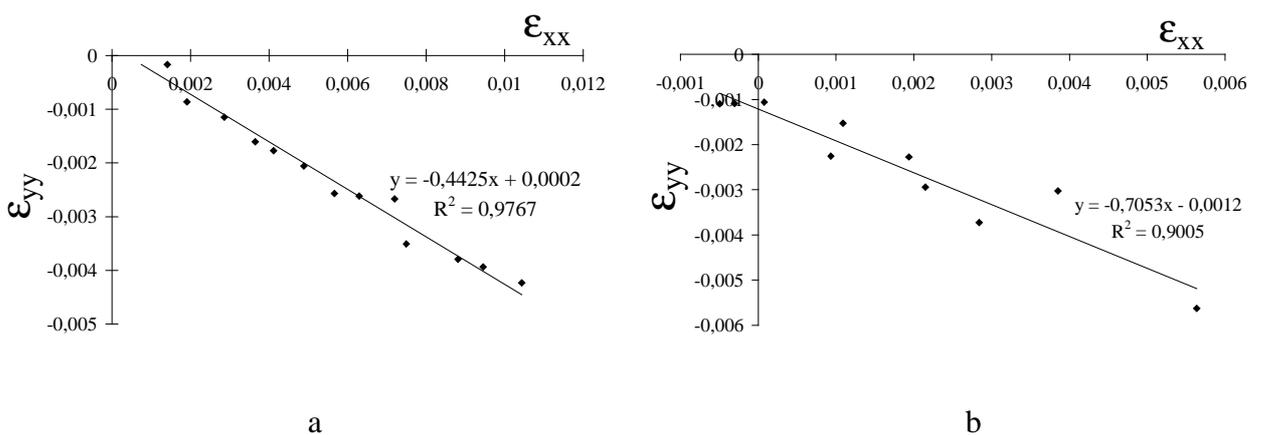


Figure 51 : Calcul du coefficient de Poisson par la relation $\epsilon_{yy} = f(\epsilon_{xx})$. – a : cas d'une zone initiale poreuse. $\nu_{RT} = 0,44$ – b : cas d'une plaque de parenchyme. $\nu_{RT} = 0,70$ (traction radiale)

Le premier essai est caractéristique d'un excellent essai : les points sont pratiquement placés sur une droite. Le second a été choisi afin d'illustrer le minimum requis pour que l'essai soit

déclaré acceptable. Ici, l'alignement des points reste bon, mais la dispersion des points est bien perceptible.

Deux méthodes sont *a priori* possibles pour obtenir le coefficient de Poisson :

- Utiliser l'opposé du rapport des pentes calculées sur les deux courbes expérimentales, $\varepsilon_{yy} = f_1(\sigma_{xx})$ et $\varepsilon_{xx} = f_2(\sigma_{xx})$.
- Calculer la pente de la courbe $\varepsilon_{yy} = -f_3(\varepsilon_{xx})$.

La première méthode est facile à mettre en œuvre et est utilisable même avec des essais médiocres. Cependant, nous avons préféré utiliser la deuxième méthode, dont le principe repose sur la définition même du coefficient de Poisson. Par ailleurs, en traçant la courbe correspondante, à partir de la valeur de r^2 , il est possible d'utiliser le même critère de validation (Figure 51).

3 Résultats

Les contraintes liées à l'échantillonnage limitent fortement le nombre d'expériences : nous avons effectué une quarantaine d'essais mécaniques au cours de deux campagnes. 34 ont été jugés concluants. Les Figure 52 et Figure 53 résument l'ensemble des mesures réalisées. Les déformations dues à l'effet Poisson étant plus petites que celles nécessaires au calcul du module d'Young, il n'est pas toujours possible de calculer le coefficient correspondant. Seuls une vingtaine de points apparaissent donc sur la Figure 53.

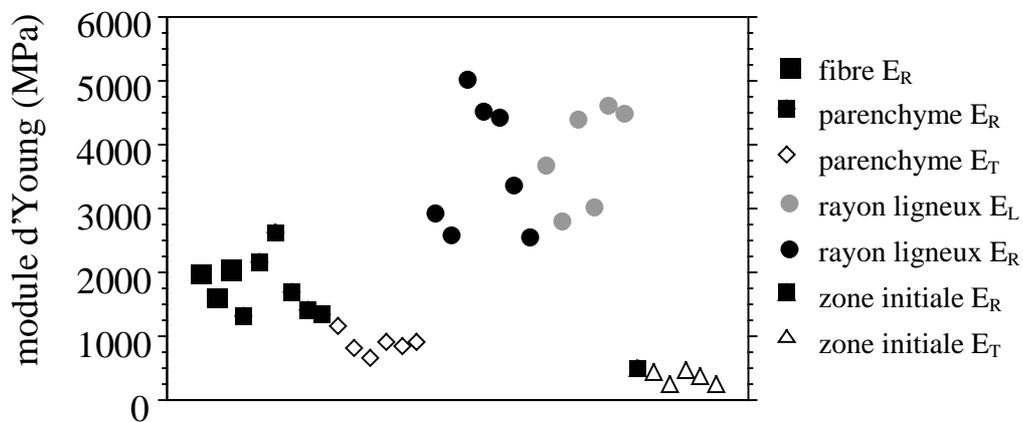


Figure 52 : Graphique récapitulatif des résultats obtenus sur les modules d'Young mesurés par traction de plages de tissu isolées

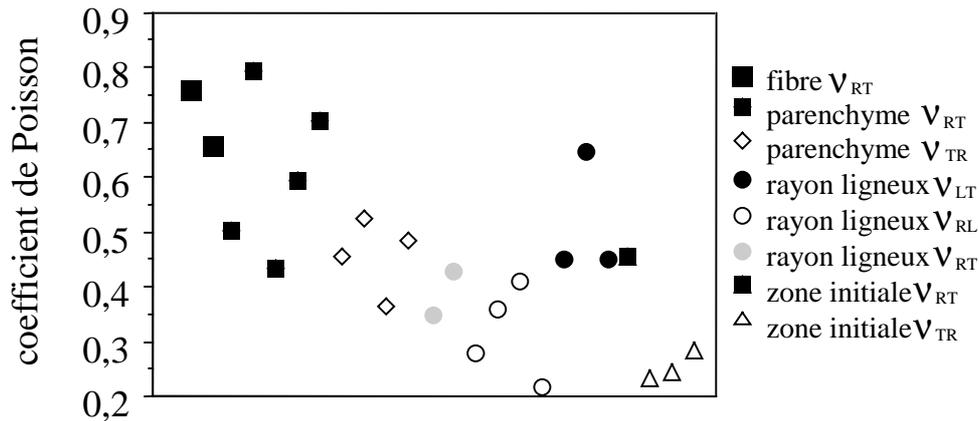


Figure 53 : Graphique récapitulatif des résultats obtenus sur les coefficients de Poisson mesurés par traction de plages de tissu isolées

Si, pour certains éléments, les résultats semblent relativement reproductibles (zone de parenchyme, de fibre), d'autres montrent une variabilité plus importante. Le retour à une description anatomique sommaire du matériau permet de formuler les hypothèses explicatives de son comportement et de la dispersion éventuelle des résultats. Les valeurs indiquées sont des moyennes suivies de leur écart-type.

3.1 La zone initiale poreuse

Il est relativement aisé d'usiner des éprouvettes afin de les solliciter dans la direction tangentielle. Il est pour cela nécessaire de trouver un spécimen comportant des gros rayons ligneux suffisamment espacés dans cette direction, ceci conditionnant la longueur finale de l'échantillon. Cinq essais ont été réalisés et leur reproductibilité nous permet d'accorder une bonne confiance dans ces mesures. Les résultats donnent un module d'élasticité E_T toujours très faible d'environ 320 ± 85 MPa et un coefficient de Poisson v_{TR} d'environ $0,25 \pm 0,02$.

En revanche, il est utopique de vouloir réaliser un essai de traction radiale dans un seul cerne. S'il fut envisagé de travailler sur un échantillon comportant une alternance de bois d'été et de bois de printemps en n'explorant que cette dernière zone lors du calcul des composantes du champ de déformation, le couplage mécanique entre ces deux parties se révèle trop important pour pouvoir ensuite analyser les résultats. Nous avons donc cherché un spécimen où l'accroissement annuel reste, pendant plusieurs années, si fin que le bois final est inexistant (Figure 54).

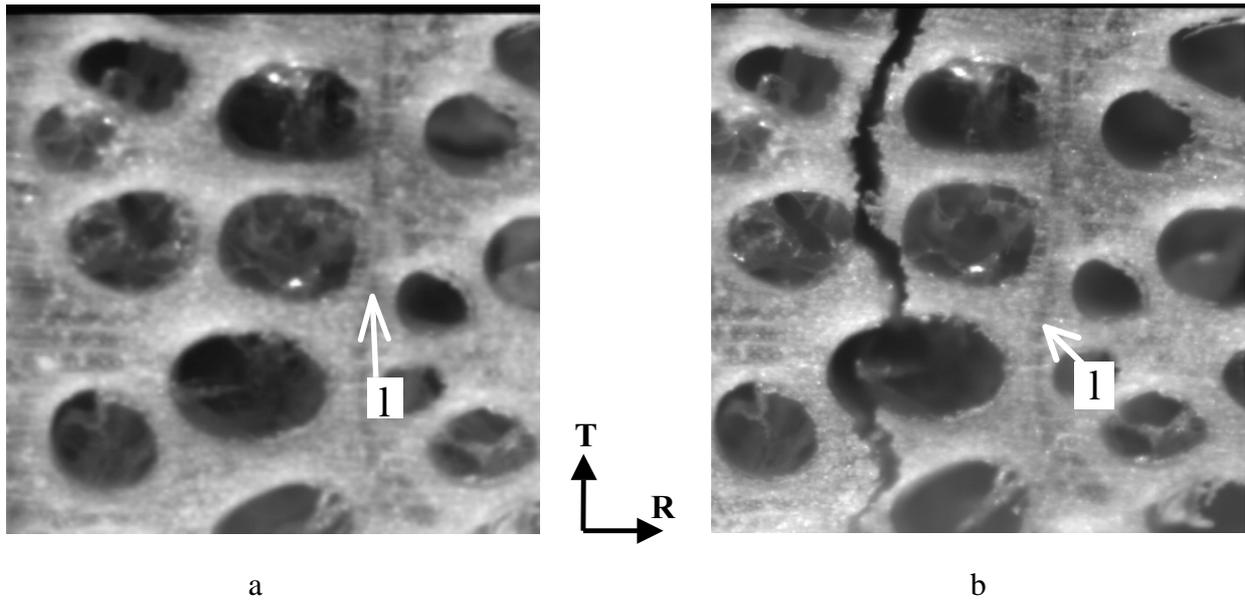


Figure 54 : Zone initiale poreuse. La zone de bois final quasiment inexistante (on distingue ici la limite (I) entre deux accroissements annuels) permet de réaliser un essai en traction radiale. Eprouvette avant sollicitation (a) et après rupture (b)

La mesure, qui n'a pas pu être répétée, donne un module d'élasticité encore très faible ($E_R = 450$ MPa) mais supérieur à toutes les rigidités mesurées jusqu'alors pour la même zone dans la direction tangentielle. Un fort coefficient de Poisson ν_{RT} , d'une valeur de 0,45, a pu être mesuré. Nous retrouvons quasiment ici une propriété de base liée à la symétrie du tenseur des rigidités :

$$\frac{E_R}{\nu_{RT}} \approx \frac{E_T}{\nu_{TR}}$$

Cependant, devant l'unicité de ce résultat, et en dépit de la faible valeur du cisaillement pourtant caractéristique d'un essai concluant (Figure 50a), nous nous garderons d'avancer des conclusions hâtives sur les propriétés mécaniques de la zone initiale poreuse dans la direction radiale.

Lors d'observations anatomiques, on constate que la forme et la disposition des différents éléments qui composent la zone initiale poreuse varient considérablement d'un échantillon à l'autre. Il est donc très difficile de se prononcer sur une quelconque anisotropie marquée ou non. En particulier, les gros vaisseaux jouent un rôle primordial. Leur nombre, leur taille et leur forme influencent considérablement la nature des résultats. Cependant, nous constaterons qu'ils sont généralement plus allongés dans la direction radiale que dans la direction

tangentielle. De plus, la présence des petits rayons ligneux unisériés tend à rigidifier le matériau dans cette direction. Ces deux remarques concourent à renforcer la valeur du module d'Young E_R (essai en traction radiale) et à diminuer celle du coefficient de Poisson ν_{TR} ².

3.2 Les plages de fibre

Les plages de fibres sont les zones les plus denses du plan ligneux du Chêne ($\approx 1200 \text{ kg/m}^3$). Elles ont essentiellement un rôle de soutien mécanique dans l'arbre. Si expérimentalement il est possible d'usiner des éprouvettes dans la direction radiale, cela n'est malheureusement pas le cas dans la direction tangentielle en raison de l'agencement de ces plages en bandes radiales au sein de l'accroissement annuel (Figure 46b). Quatre essais, dont trois concluants, ont montré des résultats très forts, tant pour le module d'Young ($E_R = 1900 \pm 175 \text{ MPa}$) que pour le coefficient de Poisson ($\nu_{RT} = 0,71 \pm 0,05$).

Si aucune valeur ne peut être avancée dans la direction tangentielle, l'observation anatomique nous renseigne sur la disposition des cellules qui peut être tout à fait irrégulière ou légèrement orientée dans la direction radiale [Keller, 1994] mais jamais de façon très prononcée. Cependant, la présence de petits rayons ligneux unisériés confère au matériau une légère prédominance de la direction radiale (Figure 55). Nous pouvons donc présumer que l'éventuelle anisotropie du matériau ne pourra pas être très marquée.

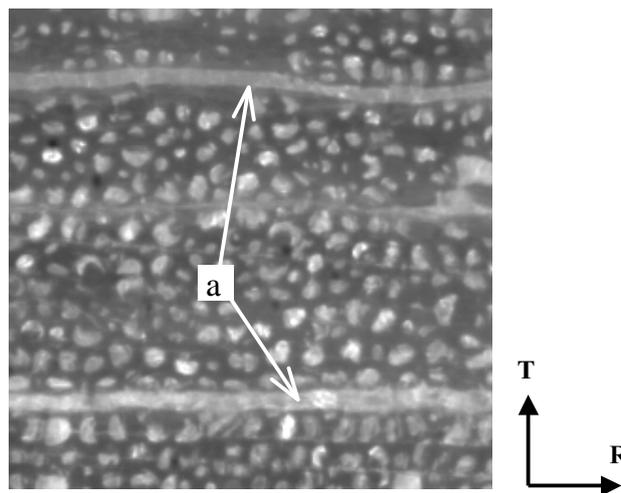


Figure 55 : Plage de fibre traversée de petits rayons ligneux unisériés (a) dans la direction radiale

² Rappel : ce paramètre quantifie la déformation radiale mesurée lors d'un essai en traction tangentielle

3.3 Les gros rayons ligneux

Les cellules de parenchyme constitutives des rayons ligneux sont allongées dans la direction radiale de l'arbre. Leur organisation particulière en un plan longitudinal-radial peu épais dans la direction tangentielle (Figure 56) ne permet pas l'échantillonnage d'éprouvette dans cette direction. Par contre, en sélectionnant des spécimens à rayons très épais, sept essais ont pu être réalisés en traction radiale et six dans la direction longitudinale.

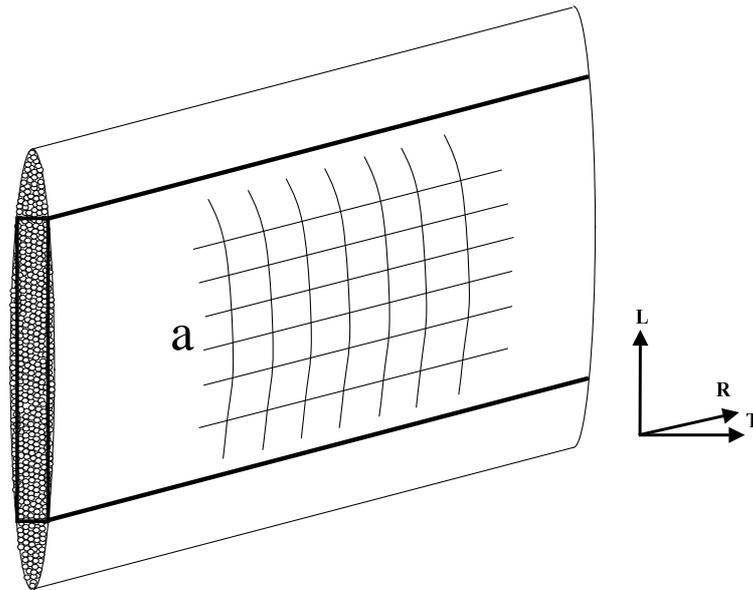


Figure 56 : Découpe d'une éprouvette de traction dans un rayon ligneux – ici pour un essai en traction radiale, un réseau est tracé sur la face RL observée par le microscope.

La géométrie particulière des rayons ligneux nous a conduit à observer la face RL pour le calcul du champ de déformation lors des essais en traction radiale. Dans cette configuration, nous avons accès au module d'Young E_R et au coefficient de Poisson ν_{RL} . Dans ce plan RL, les repères anatomiques ne sont pas suffisamment visibles pour calculer le champ de déformation (mauvais contraste entre vides et parois cellulaires). Nous traçons donc une grille sur la surface observée à l'aide d'une mine très fine (Figure 56). Lors des essais en traction longitudinale, la face observée peut être LR ou LT. Nous pouvons donc mesurer E_R et ν_{LR} , ou ν_{LT} , suivant l'orientation de l'échantillon sur la machine d'essai.

Si les valeurs obtenues pour E_R , de l'ordre de 3600 ± 900 MPa (Figure 52), sont les plus fortes qui aient pu être mesurées dans le plan transverse, il n'en demeure pas moins qu'elles sont nettement en dessous de ce que nous attendions. En effet, l'orientation des cellules (Figure 56) tendrait à faire l'hypothèse, généralement retenue dans la littérature, que les propriétés radiales des rayons ligneux sont du même ordre de grandeur que celles du bois

massif en longitudinal. Or les valeurs de module d'Young mesurées ici lors d'essais de traction longitudinale ne montrent pas d'anisotropie marquée entre les directions R et L. Deux hypothèses, déjà avancées par **El Amri (1987)**, peuvent être formulées pour expliquer ce résultat expérimental :

- La longueur des cellules de parenchyme est beaucoup plus faible dans les rayons ligneux que dans les autres types de tissu [**Keller, 1994**] limitant ainsi le caractère particulier du grand axe des cellules.

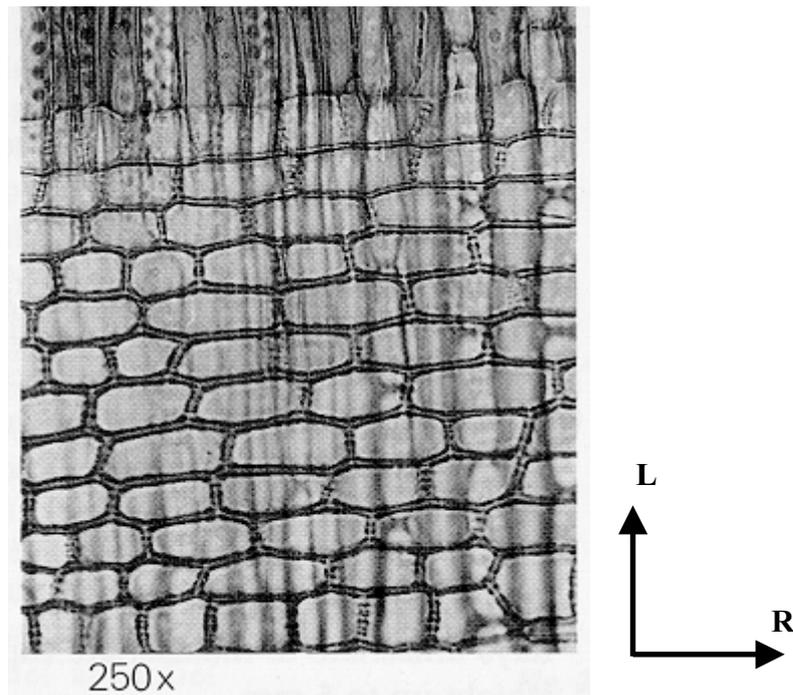


Figure 57 : Coupe anatomique représentant la structure du rayon ligneux dans le plan radial-longitudinal (RL) [**Schweingruber, 1990**]. On remarque en particulier le caractère peu allongé des cellules de parenchyme dans la direction radiale.

- Au sein de la paroi cellulaire, l'angle des microfibrilles est très élevé par rapport au grand axe [**Barkas, 1941**].

Selon cette seconde hypothèse, les rigidités dans le plan TL, plan transverse des cellules, devraient être très fortes. C'est ce qui a pu être constaté lors des essais dans la direction longitudinale (Figure 52) avec des valeurs mesurées pour le module d'Young ($E_L = 3800 \pm 700$ MPa) près de deux fois supérieures à celles des plages de fibre, matériau pourtant plus dense et très rigide.

Pour les raisons évoquées précédemment, nous ne pouvons pas donner de valeurs dans la direction tangentielle et seule l'observation anatomique dans le plan TL peut nous renseigner sur une éventuelle anisotropie. Si l'organisation cellulaire semble ne privilégier aucune direction dans la partie centrale du rayon ligneux, on remarque un alignement progressif dans la direction longitudinale lorsque l'on se rapproche des bords avec une tendance générale à l'ovalisation des cellules selon cette direction. En conséquence, la rigidité serait donc plus faible dans la direction tangentielle.

En fonction de la face observée par la caméra, nous avons pu mesurer trois coefficients de Poisson : $\nu_{LT} = 0,48 \pm 0,11$, $\nu_{RT} = 0,34 \pm 0,05$ et $\nu_{RL} = 0,32 \pm 0,06$.

3.4 Les plages de parenchyme longitudinal de bois final

Cette zone, constituée de cellules de parenchyme longitudinal et de petits vaisseaux, est moins dense que les plages de fibre ($\approx 800 \text{ kg.m}^{-3}$). Douze essais ont été validés ; six dans chaque direction. Les mesures mettent en évidence une forte anisotropie transverse, avec une valeur de module d'Young de $850 \pm 110 \text{ MPa}$ et $1700 \pm 450 \text{ MPa}$, respectivement dans les directions tangentielle et radiale. On observe une variabilité importante sur les résultats des coefficients de Poisson $\nu_{RT} = 0,6 \pm 0,11$ et $\nu_{TR} = 0,45 \pm 0,05$. Lors de l'observation de la zone de parenchyme, on constate que la structure est fortement conditionnée par la présence ou non de petits vaisseaux dont le nombre et la taille peuvent se révéler importants. Ils sont généralement alignés dans la direction radiale en semblant être guidés par les nombreux petit rayons ligneux unisériés (Figure 58).

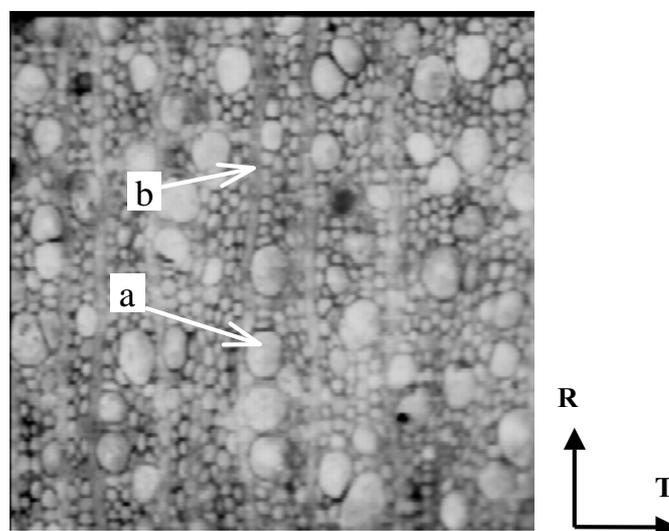


Figure 58 : Zone de parenchyme contenant de nombreux petits vaisseaux (a) et rayons ligneux unisériés (b)

L'organisation de ce tissu est donc nettement dépendante de ces deux paramètres qui confèrent à la direction radiale un rôle particulier. Cette structure explique aussi l'importante variabilité des résultats.

4 Conclusion

Le travail présenté dans ce texte a permis de mesurer un grand nombre des rigidités des différents composants du plan ligneux du Chêne dans le plan transverse. L'usinage d'éprouvettes homogènes de taille suffisante pour réaliser les essais reste une difficulté majeure de cette partie expérimentale. La première conséquence directe est l'inaccessibilité de certaines valeurs (module d'Young tangentiel du rayon ligneux ou de la fibre).

L'impossibilité de travailler dans le même cerne, voire dans le même arbre est une autre contrainte importante liée à la préparation de l'éprouvette. Cet aspect limite fortement la possibilité de maîtriser une part de la variabilité du matériau. Dans ces conditions, il est évident que les valeurs mesurées ne peuvent être prises comme données absolues des propriétés du chêne. Elles permettent néanmoins de dégager des ordres de grandeur de propriétés d'éléments du plan ligneux inconnues jusqu'à lors.

Le rayon ligneux se révèle être la structure la plus rigide du plan transverse. L'agencement des cellules, très courtes, de parenchyme radial qui le composent ne semble pas lui conférer de propriétés plus importantes dans la direction radiale que dans le plan TL. A l'opposé, la zone initiale poreuse montre des modules d'élasticité près de 10 fois moins importants. Le module radial de cette zone initiale semble légèrement plus fort que le module d'Young tangentiel. Entre ces deux éléments, nous retrouvons les plages de fibre et de parenchyme du bois final. Contrairement aux autres tissus, ces dernières présentent une forte anisotropie transverse $E_R/E_T \approx 2$ (Figure 59).

	Zone initiale poreuse		Plage de fibres		Rayon ligneux		Plage de parenchyme longitudinal	
	moyenne et écart-type	Nb	moyenne et écart-type	Nb	moyenne et écart-type	Nb	moyenne et écart-type	Nb
E_R (MPa)	450	1	1900 ± 175	3	3600 ± 900	7	1700 ± 450	6
E_T (MPa)	320 ± 85	5					850 ± 110	6
E_L (MPa)					3800 ± 700	6	0.6 ± 0.11	5
v_{RT}	0.45	3	0.71 ± 0.05	2	0.34 ± 0.05	2	0.4 ± 0.05	4
v_{TR}	0.25 ± 0.02	1						
v_{RL}					0.29 ± 0.06	4		
v_{LT}					0.48 ± 0.11	3		

Figure 59: Tableau récapitulatif des valeurs moyennes mesurées lors des essais de traction sur des plages de tissu isolées. Les valeurs moyennes, leur écart-type ainsi que le nombre d'essais validés sont à chaque fois indiqués.

Enfin, notons que dans le cadre des calculs d'homogénéisation visant à prédire les propriétés macroscopiques d'un cerne annuel de chêne, il sera nécessaire d'avoir une estimation de toutes les valeurs microscopiques. Un outil d'homogénéisation mis au point au laboratoire par **Farruggia (1998)**, permet alors d'évaluer le rapport d'anisotropie d'un groupe de cellules à partir de la description de leur organisation. Un calcul réalisé sur l'image de la structure d'une plage de fibre à l'échelle cellulaire dans le plan transverse (RT) et un autre sur un rayon ligneux dans le plan TL permet alors d'accéder à des valeurs que nous utiliserons ultérieurement par défaut de mesures expérimentales.

CHAPITRE III

MESURES DES PROPRIETES DE RETRAIT LIBRE PAR IMAGERIE X

1 INTRODUCTION

Au même titre que les propriétés mécaniques, le retrait libre est un paramètre microscopique à prendre en compte pour la compréhension et la modélisation du comportement d'une pièce de bois lors d'une variation d'humidité. Après un bref rappel de l'intérêt de la mesure de cette propriété et une revue des différentes méthodes utilisées, nous présentons une nouvelle application du dispositif d'imagerie X développé dans le premier chapitre. Grâce à un contrôle de l'humidité relative de l'air, nous proposons alors des mesures de coefficients de gonflement de petites éprouvettes échantillonnées dans des plages homogènes de tissus de chêne.

2 LE RETRAIT MICROSCOPIQUE

Les mesures de retrait sur des échantillons massifs reflètent le comportement moyen du bois et intègrent toutes les hétérogénéités (aux diverses échelles d'observation) contenues dans l'échantillon. En particulier, les interactions entre les différents composants d'un matériau hétérogène influent considérablement sur son comportement global. Il faut donc introduire ici les notions de *retrait libre* et *retrait lié*.

2.1 *Retrait libre - retrait lié*

Si **Schniewind (1959)** fut le premier à parler de retrait lié à propos du bois, plus tard, **Guitard (1994)** a proposé un modèle explicatif reposant sur des considérations mécaniques. Considérons deux pièces A et B constituées de deux matériaux au comportement hygroscopique différent. Sous l'effet d'une diminution de son taux d'humidité, chaque pièce se rétracte librement proportionnellement à son coefficient de retrait α_R . C'est le *retrait libre*.

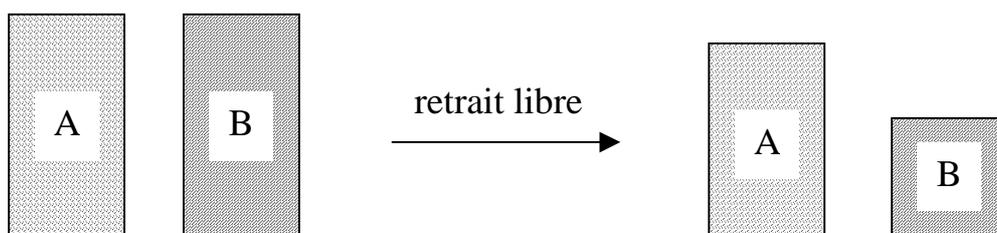


Figure 60 : Retrait libre. Chaque constituant se déforme librement en fonction de ses propres coefficients (ici, $\alpha_R(B) > \alpha_R(A)$)

Supposons maintenant que ces deux pièces soient parfaitement collées l'une à l'autre. Les retraits individuels ne peuvent plus s'exprimer. On parle alors de *retrait lié*. Sur l'exemple de la Figure 61, la pièce A subit une déformation plus importante que lors du retrait libre (nous observons le phénomène inverse pour la pièce B). Elle est donc mécaniquement comprimée (et la pièce B tendue). Ce nouvel état génère donc des contraintes internes dans le composite.

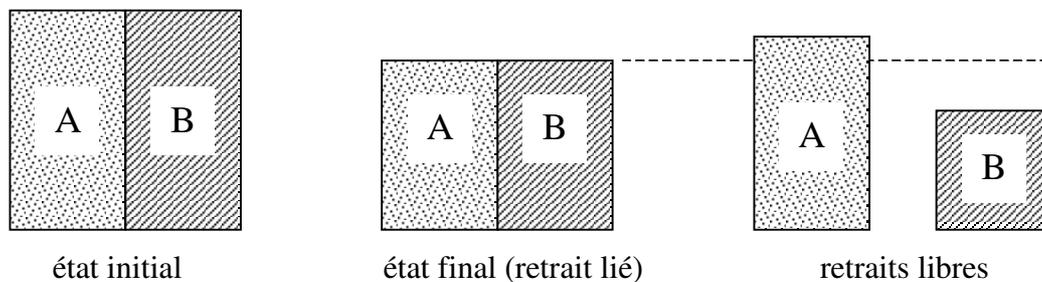


Figure 61 : Retrait lié. Le niveau de déformation globale est intermédiaire entre les deux déformations individuelles (*libres*). Il dépend des propriétés de retrait et mécaniques des deux matériaux.

Contrairement au retrait libre, le retrait lié fait intervenir les propriétés mécaniques des différents matériaux. Dans le cas de géométries très particulières, la connaissance de tous les paramètres microscopiques (propriétés mécaniques et de retrait) permet alors de calculer analytiquement les propriétés macroscopiques du composite.

Si comme nous l'avons vu dans le chapitre II, de nombreuses recherches ont porté sur la mesure de propriétés mécaniques microscopiques, d'autres, très nombreuses également, s'intéressent aux propriétés de retrait, dit *libre*, afin de caractériser localement les éléments constitutifs du bois et de comprendre leur rôle dans le phénomène global observé à l'échelle macroscopique.

2.2 Les mesures de retrait microscopique

Différentes méthodes de mesure locales ont été mises au point. A l'échelle de la pièce massive, les déformations peuvent être mesurées par un capteur tactile. Cependant, il est préférable de privilégier les techniques sans contact afin d'assurer une déformation sans contraintes externes et ainsi de préserver le caractère "*libre*" du retrait. Cette remarque est d'autant plus importante que l'on descend dans la structure fine et vers des échantillons de très faible taille. **Botosso (1997)** a réalisé une revue bibliographique très complète à laquelle le lecteur pourra se référer pour de plus amples détails. Il y décrit les différentes méthodes

expérimentales mises au point et en particulier leurs avantages et inconvénients. Elles diffèrent les unes des autres en fonction de l'échelle d'observation. On y distinguera essentiellement deux grands types d'instrumentation sans contact : les systèmes optiques et les lasers.

2.2.1 Les systèmes basés sur l'image

Ces dispositifs permettent de visualiser en deux dimensions l'une des faces de l'échantillon. Suivant le matériel utilisé, de l'appareil photographique ou caméra simple à ceux montés sur microscopes, les variations dimensionnelles mesurées sont à l'échelle d'une petite pièce de bois [Lahbabi, 1995] ou d'un groupe de cellules et ce jusqu'à la paroi cellulaire [Mariaux et Masserann, 1985]. Les éprouvettes utilisées peuvent encore être séparées en deux classes :

- Les premières ont une dimension longitudinale très réduite ($<100\ \mu\text{m}$). L'intérêt est de s'approcher au mieux du comportement 2D du matériau tout en limitant les gradients d'humidité dans l'épaisseur de l'échantillon. Les inconvénients de ce principe sont de deux ordres. D'une part, l'éprouvette peut être dégradée lors de l'usinage qui est généralement réalisé à l'aide d'un microtome. Les arrachements de fibre ou les fissures occasionnées peuvent alors complètement modifier le comportement global de la pièce étudiée [Futo, 1981]. D'autre part, l'adhérence de l'éprouvette à son support est un facteur de restriction de la déformation de l'échantillon [Boutelje, 1962a], effet qu'il n'est pas possible de quantifier. Les résultats sur coupes microtomées sont donc difficiles à interpréter au point que certains auteurs trouvent des retraits supérieurs à ceux observés sur bois massif alors que d'autres font état de la constatation inverse [Kelsey, 1963].
- Afin de s'affranchir de ces problèmes, d'autres techniques consistent à étudier le retrait sur des échantillons qui, bien que restant de faible taille, s'apparentent plus à du bois massif. Si l'usinage reste une partie délicate pour l'expérimentateur, les problèmes de fissures sont nettement limités. Les problèmes inhérents à ce type d'échantillons résident dans la difficulté d'obtenir une excellente qualité d'image (et qui le reste durant toute l'expérience, c'est-à-dire aux différents taux d'humidité envisagés) [Lahbabi, 1995].

2.2.2 Les lasers

La mesure de l'ombre d'un objet générée par un faisceau laser est une autre technique sans contact. Le dispositif est constitué en deux parties : un émetteur projette un faisceau de rayons laser sur l'objet dont l'ombre est mesurée par un récepteur. (Figure 62).

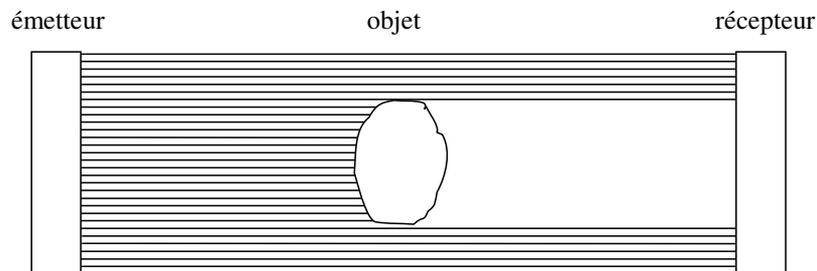


Figure 62 : Principe de la mesure par laser. L'objet coupe une partie du faisceau laser émis qui n'est plus détectée par le récepteur.

La forme de l'échantillon est alors un paramètre important. Les éprouvettes parallélépipédiques ont alors l'une de leurs dimensions (celle parallèle au faisceau) réduite afin d'éviter que la mesure 1D ne soit entachée d'une erreur due à une déformation autre que celle étudiée. La Figure 63 illustre le type d'erreur alors possible.

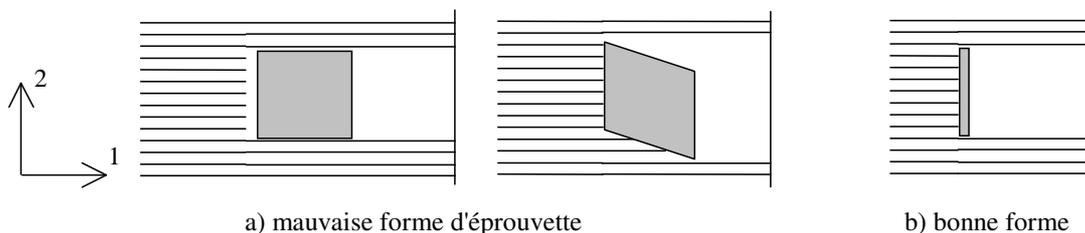


Figure 63 : Erreur due à la forme parallélépipédique de l'échantillon. La mesure ne reflète pas une modification de dimension dans la direction 2 (a). La faible épaisseur de l'échantillon dans la direction 1 limite cet effet (b).

Botosso (1997) a travaillé sur des éprouvettes fines ($600\ \mu\text{m}$) parallélépipédiques afin de mesurer leur retrait tangentiel. L'utilisation d'une scie à fil de précision lui a permis, sans les endommager, d'usiner plusieurs échantillons au sein d'un même accroissement annuel. Le soin apporté à l'usinage de telles éprouvettes est un facteur déterminant de la qualité de la mesure.

Si les méthodes optiques permettent de bonnes mesures (2D) grâce à une information en surface de l'échantillon et les lasers (1D) grâce à ses contours, il est apparu possible d'utiliser le dispositif d'imagerie X développé au laboratoire et décrit dans le premier chapitre.

Quelle que soit la méthode utilisée, l'une des difficultés majeures est le contrôle de l'humidité de l'échantillon [Futo, 1978]. C'est ce point très important qui conditionne la validité des mesures que nous abordons ici.

2.3 Contrôle du taux d'humidité

2.3.1 Problématique générale

Si la mesure précise de la déformation est un problème expérimental important sur des éprouvettes de petite taille, une autre difficulté majeure rencontrée par les chercheurs est le contrôle de l'état hygrométrique de l'échantillon à l'instant de l'acquisition de l'information sur ses dimensions. [Kelsey, 1963]. La seule méthode fiable permettant de connaître avec précision le taux d'humidité d'une pièce de bois est la pesée. Les dispositifs expérimentaux s'efforcent donc d'acquérir simultanément le couple de données masse – dimension [Botosso, 1997]. Par ailleurs, la masse globale ne fournit qu'une information sur la quantité d'eau totale contenue dans l'échantillon. Tant que celui-ci n'a pas atteint un état d'équilibre, il présente alors des gradients d'humidité qui reposent alors le problème du *retrait lié* par l'interaction des zones d'humidité différente. Afin de s'affranchir de ces considérations, il est donc nécessaire d'effectuer les mesures entre deux états d'équilibre ce qui impose alors un conditionnement de l'air. C'est ce paramètre important qui, généralement, rend complexe la conception des dispositifs expérimentaux [Wijesinghe, 1959] [Kato et Nakato, 1968].

Dans le plan transverse, les dimensions les plus courantes des plages de tissu homogènes dépassent rarement quelques centaines de micromètres. Nous avons réalisé une expérience visant à évaluer l'ordre de grandeur des cinétiques auxquelles nous serons confrontés.

2.3.2 Cinétique des éprouvettes microscopiques de chêne

Nous avons isolé un cube, taillé dans une plage de fibre dont les dimensions sont typiquement celles des éprouvettes envisagées (environ $0.4 \times 0.4 \times 0.4 \text{ mm}^3$). Initialement à l'état saturé, il a été simplement posé sur une balance de précision dans les conditions ambiantes du laboratoire. Un ordinateur, relié à la balance, enregistre régulièrement la masse. La Figure 64 représente l'évolution de la masse en fonction du temps.

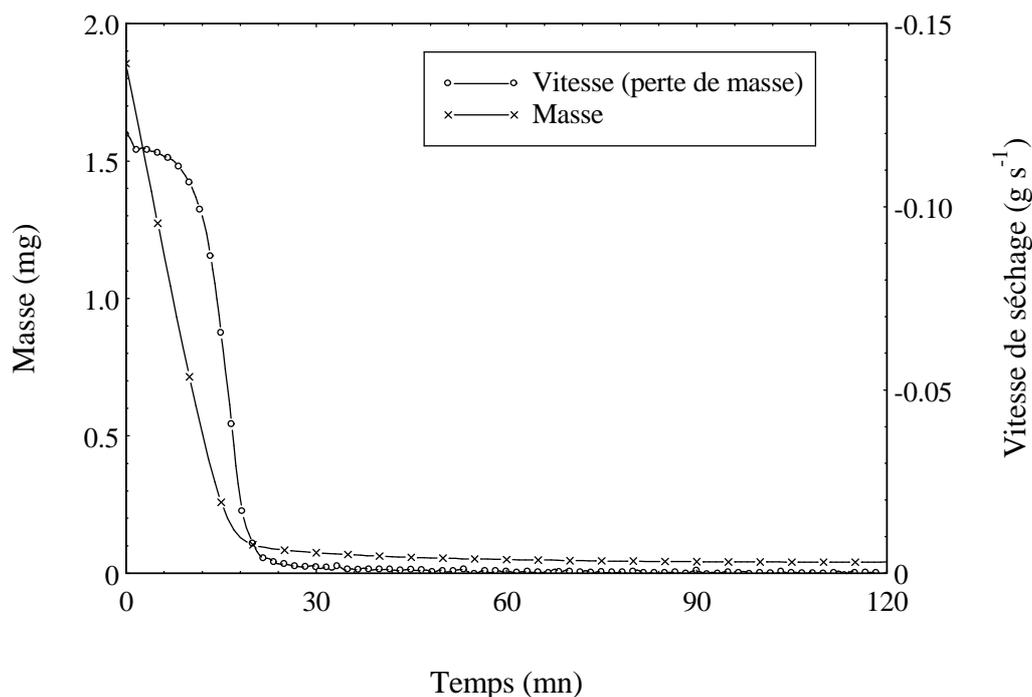


Figure 64 : Cinétique de séchage. Posé à l'état saturé sur une balance dans les conditions ambiantes du laboratoire, l'échantillon de quelques milligrammes atteint son état d'équilibre en quelques minutes.

S'il ne faut pas accorder un grand intérêt aux valeurs mesurées, cette simple expérience permet de constater la très grande rapidité avec laquelle l'échantillon atteint son équilibre avec le milieu ambiant. Si en moins de 20 minutes l'éprouvette passe de l'état saturé à quelques pour-cent d'humidité, cela suffit à rendre illusoire toute tentative d'acquisition d'image dans ces conditions. Cette expérience, réalisée en préambule de la conception du dispositif expérimental, confirme la nécessité de travailler sur des échantillons stabilisés ce qui implique un conditionnement de l'air.

3 Mise au point du dispositif

3.1 Choix du dispositif d'imagerie X

L'utilisation des rayons X a été envisagée comme source d'information sur la dimension d'un échantillon car il répond au premier critère de base indispensable dès lors que l'on envisage une mesure de retrait *libre* : la mesure sans contact. L'échantillon peut être simplement posé

sur un support (quasi-transparent aux rayonnements X) lui permettant de se déformer sans contrainte extérieure autre que l'éventuel frottement sur celui-ci.

Cette nouvelle utilisation du banc d'imagerie est rendue possible grâce à la résolution spatiale qu'il offre. En effet, les déformations dues au retrait sont de quelques pour-cent dans le plan transverse. Sur des plages de tissu dont les dimensions sont inférieures au millimètre, ce paramètre impose une excellente résolution spatiale du dispositif de mesure. Cependant, nous avons vu au chapitre précédent (essais de traction sous microscope) que l'utilisation de l'image permet de détecter de très petites déformations (déplacement inférieur au pixel) par la prise en compte de nombreux points de mesures. A titre d'ordre de grandeur, dans la configuration actuelle du dispositif, un pixel représente environ 3 μm . Une déformation de 1% sur un échantillon de 1mm doit donc se concrétiser par une variation de dimension de plus de 3 pixels sur l'image. Si nous comparons ces valeurs avec celles mesurées lors des essais mécaniques sous microscope, nous pouvons espérer travailler ici dans des conditions théoriquement plus favorables.

Par rapport aux méthodes proposées dans la littérature, l'imagerie X cumule deux avantages :

- L'information recueillie est intégrée sur toute l'épaisseur de l'échantillon. Contrairement aux systèmes optiques [**Lahbabi, 1995**], la variation des niveaux de gris entre les images suite aux changements d'humidité restera faible.
- Le banc d'imagerie fournit une information en deux dimensions. A l'instar des essais mécaniques, il est donc envisageable de mesurer simultanément le retrait suivant deux directions. Le principe de base reste identique et consiste en la comparaison d'images d'échantillons réalisées à différents états de déformation, correspondant ici à différents taux d'humidité dans le bois.

3.2 chambre climatique

Le conditionnement peut être envisagé par différents moyens. La méthode la plus couramment utilisée consiste à utiliser des solutions salines saturées. Dans un espace hermétiquement clos, la présence d'un excès de sel dans de l'eau conduit à une pression de

vapeur et à une humidité de l'air dépendant de la température. L'humidité relative de l'air suit alors la loi [**Handbook of Chemistry and Physics, 1996**]:

$$H_r \% = A e^{\left(\frac{-B}{T}\right)} \quad \text{Eq : 9}$$

H_r : humidité relative de l'air (%)

A, B : constantes dépendantes de la nature du sel utilisé

T : température (K)

Le cahier des charges du système peut alors être résumé ainsi :

- le positionnement de l'échantillon doit rester simple
- la chambre de conditionnement doit rester transparente aux rayons X
- le changement de la solution saline doit pouvoir être réalisé facilement.

Le dispositif développé, assez compact pour être contenu dans le boîtier dédié à l'échantillon, est constitué en deux corps. Le premier reçoit l'éprouvette et le second la solution saline. Dans la première partie, l'échantillon repose simplement sur une fine feuille de Mylar. Le couvercle de la chambre contient lui aussi en son centre une fenêtre du même type. Après fermeture, la distance entre les deux feuilles n'est que de quelques millimètres. Le tout est aligné dans l'axe du faisceau de rayons X.

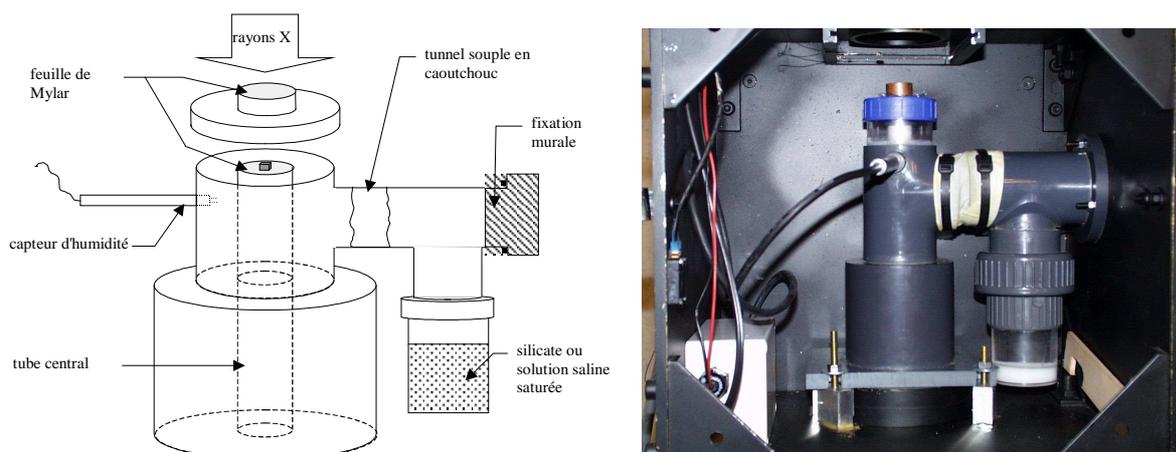


Figure 65 : Chambre de conditionnement. Le récipient amovible permet le changement de solution saline. Un thermocouple (non visible sur la photo) et un capteur d'humidité permettent l'acquisition des conditions atmosphériques.

L'autre partie est fixée à l'une des parois du boîtier. On peut y visser hermétiquement un récipient apte à recevoir les solutions salines. Une chambre à air relie ces deux éléments (Figure 65). Sa souplesse permet la manipulation des récipients en limitant les risques de perturbation dans l'autre partie.

Un capteur d'humidité est vissé à travers la paroi de la chambre de façon à contrôler les conditions hydriques de l'air au plus près de l'échantillon. De même, un thermocouple est installé près de celle-ci. Ces deux capteurs, reliés à une centrale d'acquisition, permettent le suivi des conditions pendant la durée de l'expérience.

De la nature des sels utilisés dépend le taux d'humidité de l'air. Afin d'observer sur l'échantillon les variations dimensionnelles les plus importantes possibles, nous choisissons donc un sel produisant un taux élevé d'humidité relative de l'air et un second permettant de l'assécher au maximum. Pour la première phase, nous utilisons une solution de NaCl. Le taux d'humidité suit la loi citée précédemment (entre 10 et 40°C) avec les paramètres $A=69.2$ et $B=25$ (Eq 9). La faible valeur du coefficient B en fait une solution stable, peu sujette aux variations de température (Figure 66).

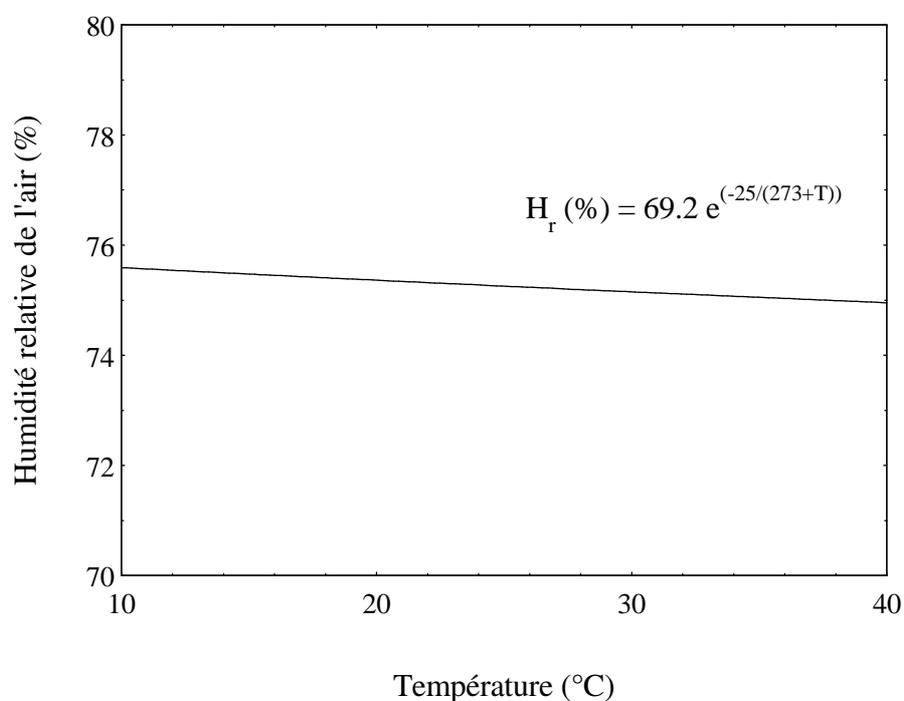


Figure 66 : Stabilité de l'humidité relative de l'air produite par une solution saline saturée en NaCl (d'après [Handbook of chemistry and physics, 1996])

Pour la seconde phase, la stabilisation de l'air dans un état plus sec est obtenue par utilisation de gel de silice. Son rôle est d'absorber l'eau contenue dans l'air et ce jusqu'à saturation des grains qui le composent. La Figure 67 représente un exemple d'enregistrement de l'humidité et de la température au cours du temps.

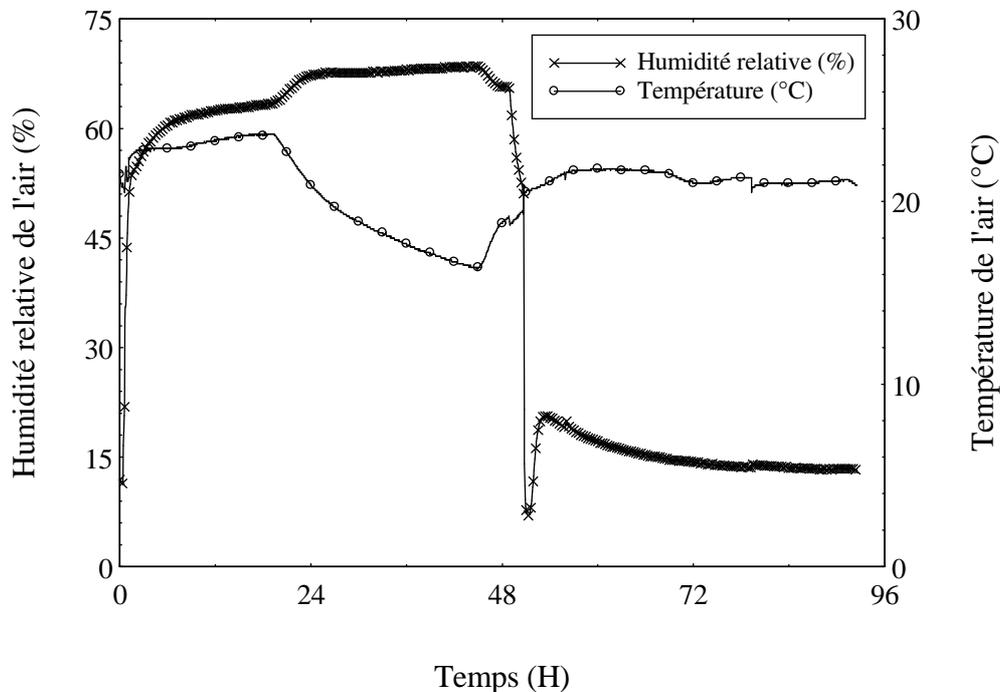


Figure 67 : Enregistrement des conditions de température et d'humidité relative de l'air autour de l'échantillon.

Bien que le volume total à conditionner ait été minimisé, nous constatons une inertie importante du système (de l'ordre de plusieurs heures). Malgré les soins apportés à l'étanchéité (utilisation de graisse à vide sur les joints), l'hypothèse de très légères fuites à travers les matériaux utilisés pour la confection du dispositif ne peut être écartée. Ces très lentes variations offrent cependant la possibilité de réaliser des acquisitions de longue durée (plusieurs dizaines de minutes) avant même la stabilisation totale des conditions hydriques.

4 Essai de retrait

4.1 Préparation des échantillons

Les échantillons sont initialement à l'état saturé. Issus d'arbres fraîchement abattus, des planches ont été conservées dans l'eau et n'ont jamais subi de séchage. Nous y découpons une fine tranche ($\approx 400 \mu\text{m}$) dans le plan transverse à l'aide de la micro tronçonneuse décrite dans

le chapitre I. Réalisée soigneusement, la technique du sciage n'occasionne que très peu de contraintes et donc d'endommagements qui pourraient modifier le comportement des échantillons [Erickson, 1955]. L'usinage s'effectue sous un jet d'eau continu afin de maintenir l'échantillon dans son état hydrique et d'éviter toute phase de séchage.

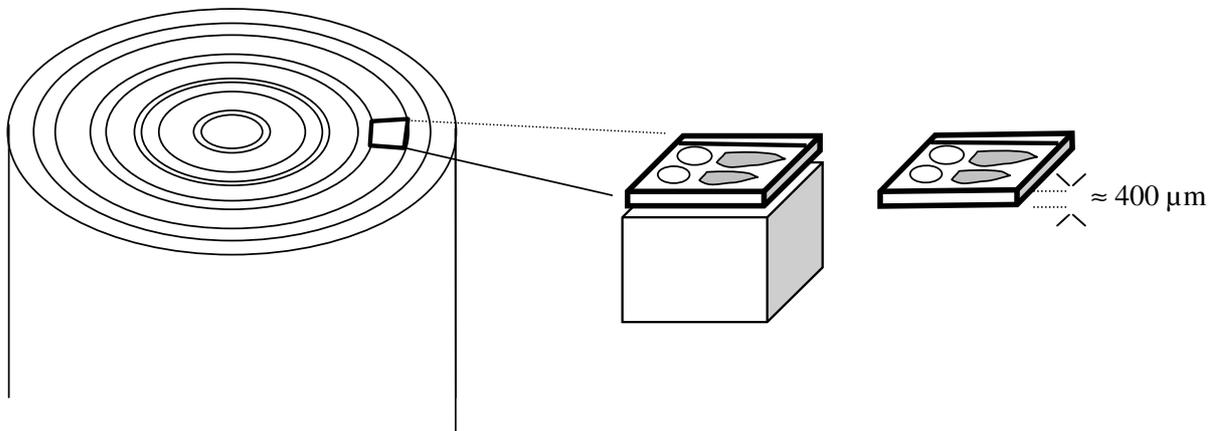


Figure 68 : Découpe d'une fine tranche dans le plan transversal.

La phase finale consiste en la séparation des différentes plages de tissu. Contrairement aux essais mécaniques, cette découpe ne requiert aucune attention particulière, les dimensions et la forme de l'échantillon n'ayant a priori aucune importance. C'est sous une binoculaire et à l'aide d'une fine lame de scalpel que la plage de tissu désirée est isolée.

4.2 Déroulement de l'essai

Positionné dans la chambre de conditionnement sur la fenêtre en Mylar, l'échantillon sèche afin d'équilibrer son taux d'humidité en fonction des conditions qui l'entourent (air conditionné à l'aide de la solution saline de NaCl). Après stabilisation, une première image est réalisée. La solution saline est alors remplacée par le gel de silice. Après nouvelle stabilisation (plusieurs heures), la seconde image est enregistrée. Lors de la première phase, le taux d'humidité relative de l'air est généralement compris entre 70 et 75%. L'acquisition de l'image dans la deuxième phase est réalisée alors que ce taux est descendu aux alentours de 10%. Le taux d'humidité de l'échantillon est estimé grâce à des isothermes de sorption, abaques couramment utilisés dans le domaine du bois (Figure 69). Nous supposons alors que tous les échantillons ont un comportement hygroscopique identique à celui d'un bois "moyen".

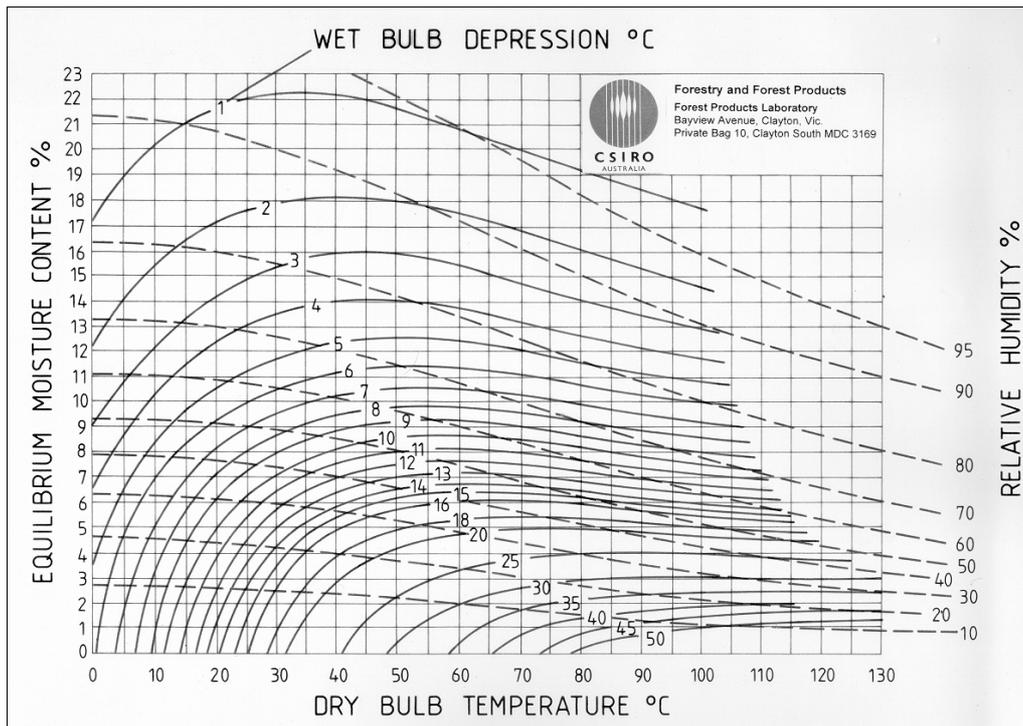


Figure 69 : Isotherme de sorption. L'humidité relative de l'air et sa température déterminent le taux d'humidité de l'échantillon qui y est plongé. (Forest and Forest Product Laboratory-CSIRO-Australie)

Le taux d'humidité de nos échantillons passe d'environ $H=13\%$ à moins de 3% .

4.2.1 Conditions d'imagerie

Les choix des paramètres d'imagerie sont issus du Chapitre I. Au niveau de l'émission du rayonnement X, nous avons pu conclure à l'intérêt d'une forte tension accélératrice (70 kV). Si Concernant la détection, le choix de réaliser les mesures à deux états stables permet des acquisitions d'assez longue durée. Il est donc envisageable d'utiliser la totalité du potentiel de pixel offert par le capteur CCD (1317x1035 pixels) afin de discrétiser au plus fin les échantillons sur l'image.

La Figure 70 montre un exemple du type d'image que nous enregistrons. Le fond, sans échantillon permet de normaliser les niveaux de gris suivant la procédure développée dans le paragraphe 4.2.2.1 du Chapitre I (équation 7).

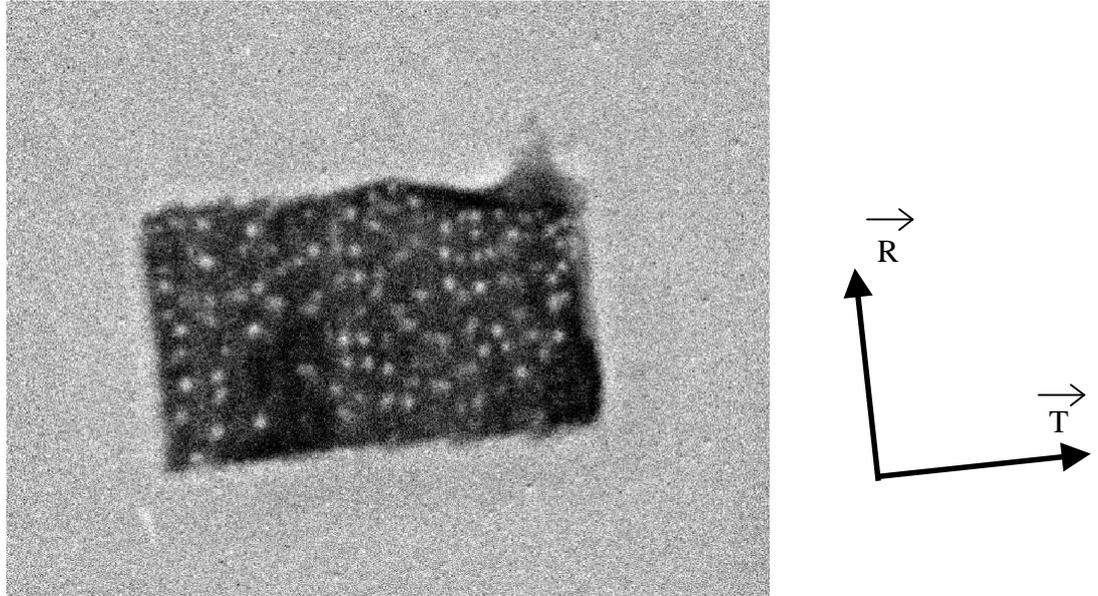


Figure 70 : Image d'une plage de parenchyme dans le plan radial - tangential.

4.3 Calcul des coefficients de retrait

Reprenant le principe du calcul du champ de déformation par comparaison de deux images utilisé lors des essais mécaniques sous microscope (Figure 71) [Farruggia et Perré, 1999] nous allons l'adapter ici au problème de la mesure du retrait.

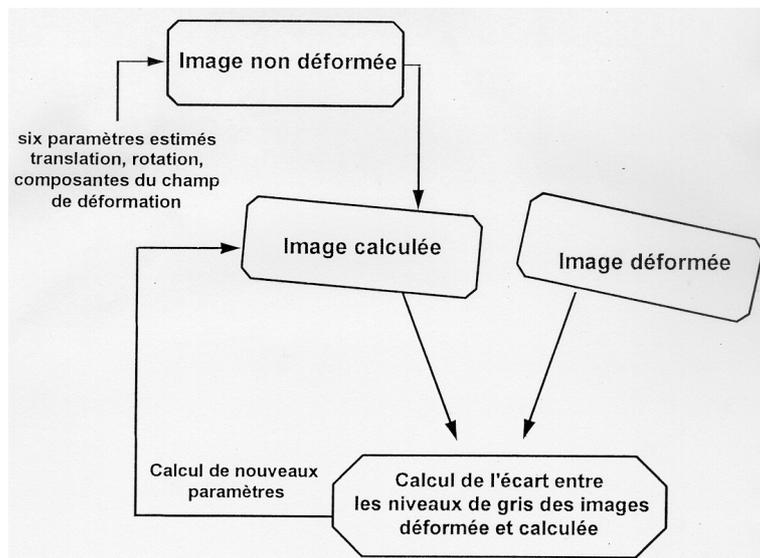
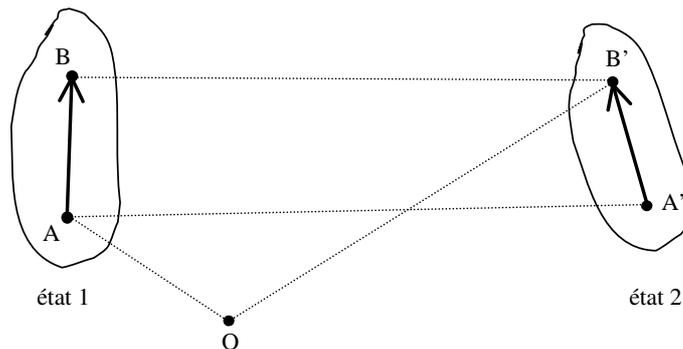


Figure 71 : Principe du calcul du champ de déformation par comparaison d'images ([Lahbabi, 1995]).

4.3.1 Champ de déformation calculé à partir de deux images

L'expérience a montré que les aléas des manipulations des récipients contenant les sels pouvaient provoquer un déplacement relativement important de l'échantillon sur le support et donc, sur l'image. En particulier, dans la formulation utilisée précédemment pour les essais mécaniques, le cas de la grande rotation n'avait pas été envisagé.



Considérons deux points matériels (A et B) dans l'état 1. Après déformation et déplacement solide, les nouvelles coordonnées du point B (noté B') sont donc :

$$\overrightarrow{OB'} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AA'} + \overrightarrow{A'B'}$$

$$\text{avec } \overrightarrow{A'B'} = \overline{\overline{F}} \overrightarrow{AB} = \left(\overline{\overline{R}} \overline{\overline{S}} \right) \overrightarrow{AB}$$

$\overline{\overline{F}}$: application linéaire tangente

$\overline{\overline{R}}$: tenseur de rotation (anti symétrique)

$\overline{\overline{S}}$: tenseur des déformations (symétrique)

La différence avec le calcul en petite rotation solide utilisé lors des essais mécaniques sous microscope réside dans le tenseur $\overline{\overline{R}}$ qui, ici, n'est pas linéarisé. La suite du traitement permettant le calcul de l'image virtuelle qui sera comparée à l'image expérimentale reste inchangée. Le critère à minimiser, lui aussi identique, repose sur la différence entre la distribution des niveaux de gris sur l'image virtuelle calculée et l'image expérimentale :

$$C = \frac{\sum_{image} (n_{cal} - n_{exp})^2}{N}$$

C : critère à minimiser

n_{cal} : niveaux de gris de l'image calculée

n_{exp} : niveaux de gris de l'image expérimentale

N : nombre de pixels

Les paramètres de la minimisation sont les 3 composantes du tenseur symétrique de déformation S (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} et ϵ_{xy}), et les 3 composantes du déplacement solide (2 pour la translation, 1 pour la rotation). Dans le cas d'un déplacement solide important effectivement constaté, une première estimation de ces 3 derniers paramètres est réalisée par analyse d'image en vue de les injecter dans le calcul comme valeurs initiales.

Afin de retrouver les déformations de l'échantillon suivant ses axes matériels (\vec{R} et \vec{T}), nous supposons alors que le retrait libre s'effectue sans cisaillement. La matrice \bar{S} devient alors diagonale et le problème se réduit à la recherche de ses valeurs propres représentatives de la déformation de l'échantillon suivant ses axes principaux.

L'amplitude de la rotation implicitement effectuée peut être vérifiée a posteriori sur l'image. Elle correspond à l'orientation des axes matériels principaux par rapport à ceux de l'image (Figure 72).

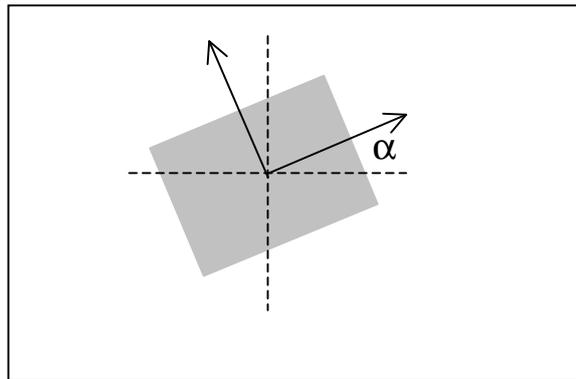


Figure 72 : Rotation à effectuer sur le tenseur des déformations afin de calculer les variations dimensionnelles dans les axes principaux de l'échantillon. Une vérification de l'angle calculé par la diagonalisation du tenseur est effectuée par comparaison avec l'angle mesuré sur l'image.

4.3.2 Pré traitement de l'image

Le principe de comparaison d'images est théoriquement applicable quel que soit leur type. Cependant, l'hypothèse stipulant que le niveau de gris d'un point matériel ne change pas entre les deux états pose ici quelques problèmes. En particulier, le changement des conditions hydriques dans la chambre climatique génère une modification de l'absorption du rayonnement X et donc du niveau de gris.

Afin de s'affranchir de ces considérations, nous avons opté pour une solution basée sur une normalisation radicale des niveaux de gris des deux images, c'est-à-dire une binarisation. La quantité d'information est alors considérablement réduite et se réduit finalement à la définition des contours de l'objet. Sur chaque image, du choix du seuil dépendent les dimensions de l'objet. Cet aspect qualitatif impose l'utilisation d'une procédure automatique. En particulier, ce traitement ne doit pas influencer le champ de déformation ensuite calculé.

Différentes techniques sont couramment utilisées afin de distinguer deux classes sur un histogramme de niveau de gris ; la plus simple étant la recherche du minimum local entre les deux pics. Mais le bruit de l'image introduit de nombreuses irrégularités qui peuvent altérer cette détection de minimum.

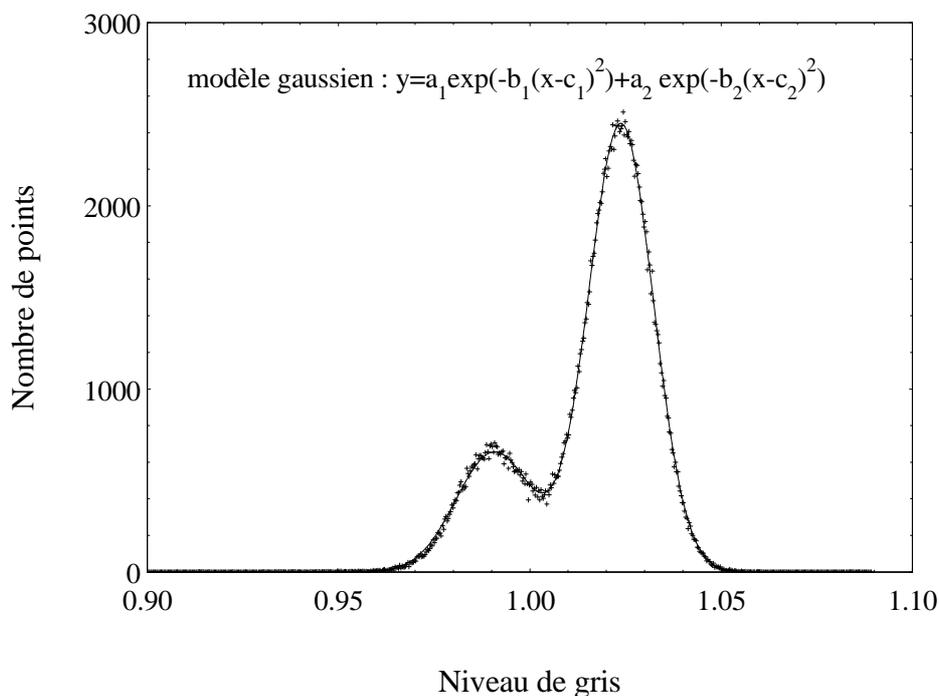


Figure 73 : Histogramme des niveaux de gris. Les points représentent les données mesurées sur l'image et la courbe continue le modèle de distribution gaussienne des deux classes. Le premier pic correspond aux niveaux de gris observés sur l'échantillon et le second à ceux du fond de l'image.

Nous avons choisi d'utiliser un algorithme basé sur la modélisation de chacune des classes de niveaux de gris en une distribution gaussienne. La méthode de Fisher, applicable à des histogrammes multi classes (3,4,...), consiste à localiser les seuils comme les séparateurs de ces distributions. Ceci est réalisé à l'aide d'un critère de minimisation de la somme des inerties

associées aux différentes classes [Cocquerez et Philipp, 1998]. Dans le cas où le problème se réduit à la différenciation de deux classes (C_1 et C_2), il s'agit de trouver leurs bornes afin de minimiser l'inertie I :

$$I = \sum_{ng \in C_1} h(ng) (ng - G(C_1))^2 + \sum_{ng \in C_2} h(ng) (ng - G(C_2))^2$$

G : centre de gravité de la classe

C_1, C_2 : classe de niveau de gris

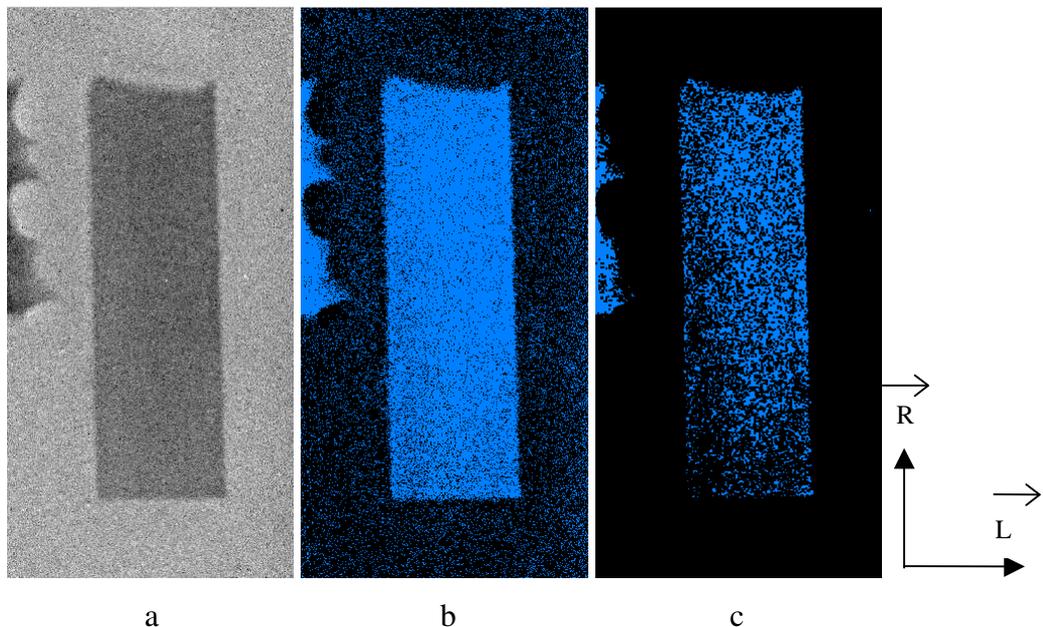
ng : niveau de gris

h : poids du niveau de gris dans l'histogramme

Un développement de cette expression permet de formuler le problème en terme de maximisation d'une quantité J :

$$J = \frac{\left(\sum_{ng \in C_1} ng h(ng) \right)^2}{\sum_{ng \in C_1} h(ng)} + \frac{\left(\sum_{ng \in C_2} ng h(ng) \right)^2}{\sum_{ng \in C_2} h(ng)} \quad \text{Eq : 10}$$

La solution, seuil recherché permettant de distinguer les deux classes, est donc le niveau de gris tel que J soit maximum.



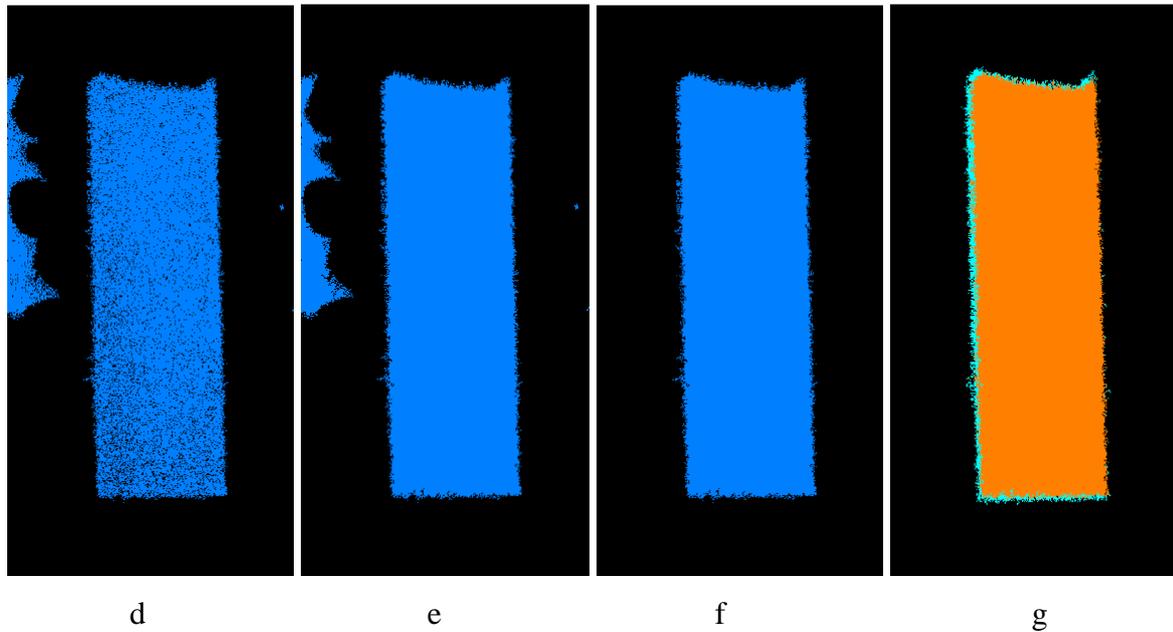


Figure 74 : Pré traitement des images. L'image en niveaux de gris (a) est seuillée (b), puis débarrassée du bruit par les opérations classiques que sont : l'érosion (c), la reconstruction (d), remplissage des vides (e) et isolement de l'échantillon (f). L'image (g), purement démonstrative, représente une superposition des deux images à comparer. Il s'agit ici d'un rayon ligneux vu sur sa face longitudinale - radiale entre les taux d'humidité $H_2=13\%$ (bleu) et $H_1=2\%$ (orange).

Après binarisation (suivant l'équation 10), les images subissent quelques traitements classiques (érosion, reconstruction) dans le but de supprimer les points isolés qui peuvent subsister sur le fond de l'image ou à l'intérieur de l'objet (Figure 74). Les contours de l'objet, définis par l'opération de seuillage, ne sont en rien affectés par ces opérations.

4.3.3 choix et calcul des coefficients de gonflement

La comparaison d'image permet de calculer le champ de déformation (noté ϵ_{cal}) d'un échantillon entre deux états d'humidité (H_1 et H_2) connus :

$$\epsilon_{cal} = \frac{l_{H_2} - l_{H_1}}{l_{H_1}} \quad \text{Eq : 11}$$

ϵ_{cal} : déformation calculée (mesurée) par comparaison d'images

l : dimensions de l'échantillon

Il est alors possible d'exprimer le coefficient de retrait (le lecteur pourra se reporter à l'annexe 1 pour les définitions des différents coefficients) :

$$\alpha_R = \frac{l_S - l_H}{l_S} \frac{1}{H_{PSF} - H} \Rightarrow l_H = l_S (1 - \alpha_R (H_{PSF} - H))$$

Cette dernière relation, injectée dans l'équation 11, permet de calculer le coefficient de retrait α_R en fonction de la déformation ϵ_{cal} mesurée entre les états H_1 et H_2 :

$$\epsilon_{cal} = \frac{\alpha_R (H_2 - H_1)}{1 - \alpha_R (H_{PSF} - H_1)} \Rightarrow \alpha_R = \frac{\epsilon_{cal}}{(H_2 - H_1) + \epsilon_{cal} (H_{PSF} - H_1)} \quad \text{Eq : 12}$$

Cette expression fait intervenir le taux d'humidité du Point de Saturation des Fibres. L'utilisation d'une telle formule suppose une déformation linéaire entre les taux d'humidité considérés (H_1 ou H_2) et celui du PSF, hypothèse que les courbes expérimentales ne peuvent justifier (Figure 75).

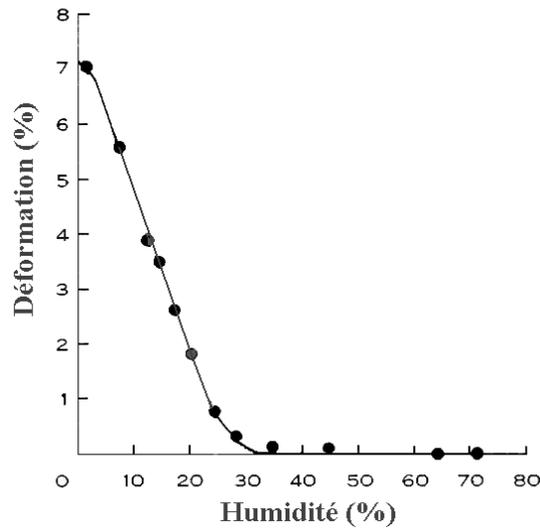


Figure 75 : Courbe de retrait. La déformation s'exprime à partir de l'entrée de l'échantillon dans le domaine hygroscopique. L'hypothèse de linéarité se justifie entre 0 et 20% d'humidité mais pas dans la zone transitoire qui mène à l'état saturé (d'après [Kelsey, 1963]).

Aussi, nous préférons utiliser la définition du coefficient de gonflement. Le point de référence est alors l'état anhydre ($H=0\%$). Nous écrivons alors :

$$\alpha_G = \frac{l_H - l_0}{l_0} \frac{1}{(H - 0)} \Rightarrow l_H = l_0 (1 + \alpha_G H)$$

$$\epsilon_{cal} = \frac{\alpha_G (H_2 - H_1)}{1 - \alpha_G H_1} \Rightarrow \alpha_G = \frac{\epsilon_{cal}}{(H_2 - H_1) - \epsilon_{cal} H_1} \quad \text{Eq : 13}$$

Il peut être déconcertant d'utiliser une formule de gonflement alors que l'expérience consiste à suivre le séchage d'un échantillon. Par défaut, les taux d'humidité H_1 et H_2 sont effectivement évalués grâce aux isothermes de sorption classiques, admettant ainsi que nos échantillons ont un comportement identique à celui du bois moyen (supposant ainsi que $H_{PSF}=30\%$). Cependant, la remarque sur la plage de linéarité de la déformation justifie de prendre l'état anhydre pour référence.

5 resultats

L'ambition initiale de ces expériences n'est pas la détermination précise des propriétés de retrait. Au même titre que pour les essais mécaniques du chapitre précédent, la variabilité entre arbres ou même entre cernes, nécessiterait une étude approfondie et de très nombreux essais. Conscients de cette grande variabilité, l'objectif est ici de proposer des ordres de grandeurs raisonnables de retrait des différents tissus du chêne.

L'inertie de la chambre de conditionnement conduit à une durée d'expérimentation de l'ordre de 3 à 4 jours. Contrairement aux essais mécaniques, l'usinage, moins contraignant, permet d'usiner les éprouvettes dans une zone restreinte à quelques cernes d'une pièce de duramen (Figure 76). Cet échantillonnage offre l'intérêt de pouvoir s'affranchir de l'effet arbre paramètre réputé pour générer une très grande variabilité [Eyono Owoundi, 1992].

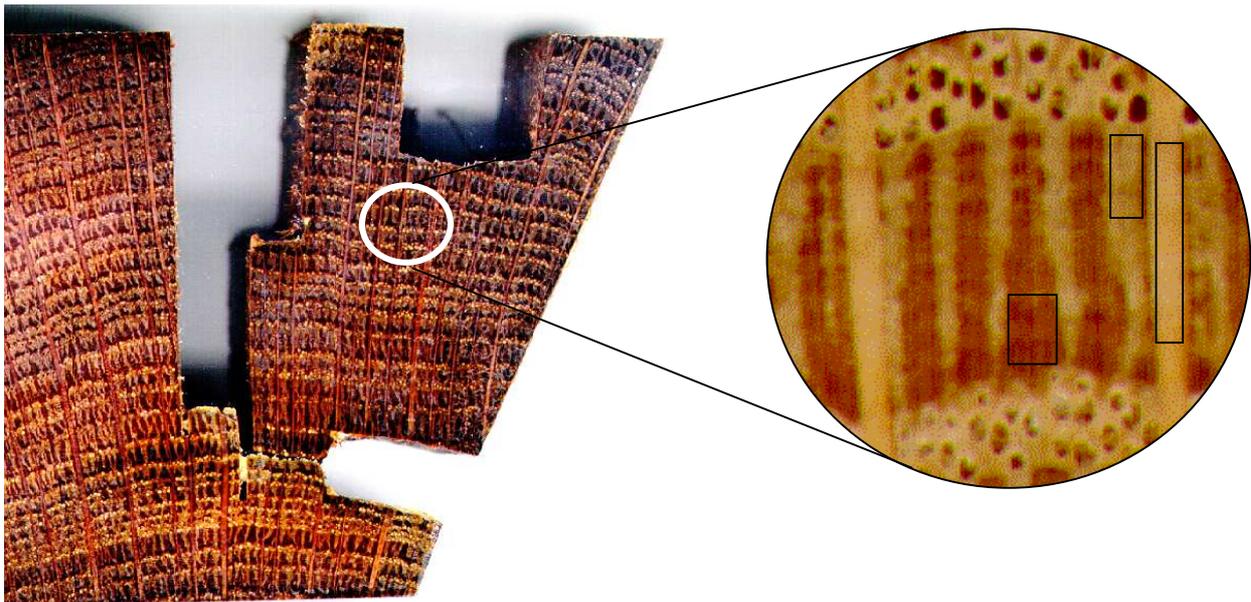


Figure 76 : Echantillonnage dans les différentes parties du cerne annuel. Les petites dimensions requises pour l'expérimentation permettent de confectionner les éprouvettes dans une zone très restreinte.

Cinq essais ont été réalisés sur des rayons ligneux, quatre sur plages de fibre et quatre sur plages de parenchyme. Pour chaque échantillon, les coefficients de gonflement sont calculés suivant l'équation 13 dans les deux directions du plan de l'image. Le graphique ci-dessous (Figure 77) et le tableau ci-dessous (Figure 78) résument l'ensemble des résultats obtenus pour les différents tissus dans les directions radiale et tangentielle.

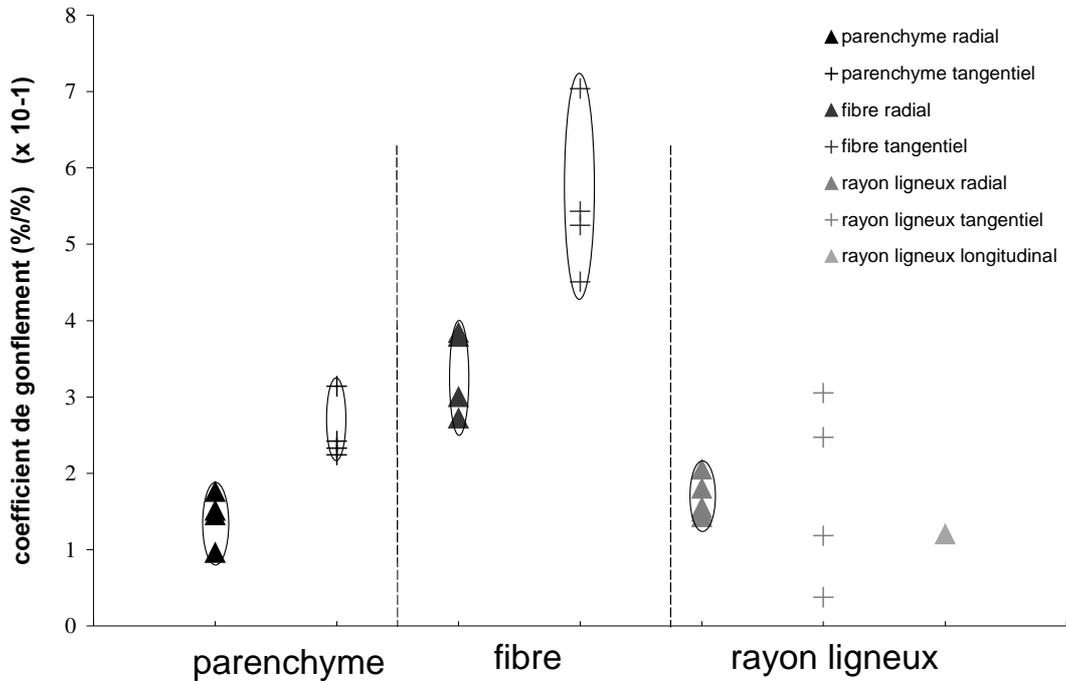


Figure 77 : Graphique récapitulatif de l'ensemble des mesures effectuées. Les coefficients de gonflement sont calculés suivant l'équation 13.

Tissu	α_{GT} (10^{-1})	Gonflement tangential total (%)	α_{GR} (10^{-1})	gonflement radial total (%)	α_{GL} (10^{-1})		
parenchyme	2.33	6.99	1.76	5.88			
parenchyme	2.42	7.26	1.45	4.35			
parenchyme	2.24	6.72	0.96	2.88			
parenchyme	3.14	9.42	1.51	4.53			
fibre	7.04	21.12	3.79	11.37			
fibre	5.25	15.75	3.84	11.52			
fibre	5.43	16.29	2.72	8.16			
fibre	4.41	13.23	3.0	9.0			
rayon ligneux	3.05	9.15	1.80	5.4			même échantillon
rayon ligneux	0.37	1.11	2.05	6.15			
rayon ligneux	2.47	7.41	1.50	4.5			
rayon ligneux	1.18	3.54	1.55	4.65			même échantillon
rayon ligneux			1.43	4.29	1.20	3.6	

Figure 78 : Ensemble des mesures réalisées. Les coefficients de gonflement sont exprimés en pour-cent de déformation par pour-cent de variation d'humidité. Les valeurs de gonflement total sont données ici à titre indicatif. Elles sont calculées sur la base d'une déformation linéaire entre l'état anhydre et le PSF (avec $H_{PSF}=30\%$)

Un essai particulier a consisté à couper un rayon ligneux en deux échantillons distincts. L'un a été positionné de manière à mesurer ses dimensions dans le plan radial - tangentiel, le second dans le plan radial - longitudinal. Cette expérience permet de comparer les coefficients calculés dans la direction radiale ($\alpha_R=1,43 \cdot 10^{-1}$ et $\alpha_R=1,55 \cdot 10^{-1}$). Une seconde expérience de répétabilité, similaire, a été réalisée en séparant 2 échantillons sur un même rayon ligneux et en les comparant dans les mêmes directions. Si toutes les mesures effectuées dans la direction radiale semblent montrer des résultats cohérents, le second essai fait ressortir la difficulté d'obtenir une valeur fiable dans la direction tangentielle. Ceci peut s'expliquer par les faibles dimensions mises en jeu mais il semble aussi que la forme très allongée de l'éprouvette puisse être un facteur d'erreur lors du calcul du champ de déformation. Il est alors possible que l'optimisation du critère s'effectue préférentiellement suivant ce grand axe au détriment de la direction tangentielle. Une évaluation des longueurs des échantillons, réalisée avec des outils manuels d'analyse d'image, montre en effet que la déformation calculée dans la direction tangentielle semble plus cohérente dans le cas de la forme (presque) carrée que dans celui où le rapport d'élanement est de l'ordre de 10. Il faudrait donc envisager de renouveler ces expériences avec des pièces dont la forme soit plus appropriée. En l'état actuel, nous ne tirons donc aucune conclusion quant à la propriété de gonflement tangentiel des rayons ligneux.

Par contre, il semble possible de donner un ordre de grandeur dans la direction radiale. Avec une valeur de l'ordre de $1,6 \cdot 10^{-1}$, le rayon ligneux présente le coefficient de gonflement le plus faible que nous mesurons dans cette direction. Cette constatation rejoint la littérature sur ce point [**Keller et Thiercelin, 1975**]. Les rayons ligneux sont couramment et depuis longtemps rendus responsables de l'anisotropie du bois massif dans le plan RT en restreignant le retrait radial et, par effet Poisson, en augmentant considérablement les déformations tangentielles [**Schniewind, 1959**].

Si les valeurs ici mesurées sont relativement faibles, elles restent du même ordre de grandeur que celles des autres tissus. Or, les rayons ligneux sont constitués de cellules de parenchyme radiales, généralement supposées identiques à celles longitudinales contenues dans le bois final. Leurs propriétés sont donc supposées similaires, à l'orientation près [**Barkas, 1941**]. Nous sommes ici amenés à revenir sur nos résultats précédents concernant les essais mécaniques. En effet, de la même manière, nos valeurs expérimentales ne corroborent pas les hypothèses de la littérature. Nous avons alors proposé deux types d'explications possibles. L'une reposait sur la forme peu allongée des cellules et l'autre sur la propriété intrinsèque de la

paroi fortement influencée par l'angle des microfibrilles qu'elle contient. Facteur déterminant dans le phénomène du retrait [**Koponen et al, 1989**], ce second point apparaît ici capital.

Les résultats semblent indiquer que les zones de fibres jouent un rôle important dans le phénomène du retrait. En effet, leurs coefficients sont très nettement supérieurs à ceux des autres tissus ; ceci dans les deux directions du plan transverse. De plus, le caractère anisotrope s'avère prononcé avec un retrait plus fort dans la direction tangentielle. Cela confirme les résultats de **Wijesinghe (1959)** ou **Botosso (1997)**. Ce dernier a mesuré les retraits tangentiels les plus importants dans la zone de densité maximale du cerne ; ceci correspondant à la présence d'une très forte proportion des plages de fibre. Les retraits mesurés alors entre l'état saturé et un taux d'humidité de l'échantillon d'environ $H=11\%$ sont de l'ordre de plus de $8,5\%$. A titre de comparaison, le coefficient moyen que nous mesurons ici ($\alpha_{GT}=5.5 \cdot 10^{-1}$), ramené à une variation d'humidité ΔH de l'ordre de 19% ($\Delta H=H_{PSF}-H$), générerait une déformation d'environ $10,5\%$. Si cette valeur peut paraître plus importante, rappelons que, par définition, l'utilisation du coefficient de gonflement donne des résultats plus élevés que ceux donnés par la formule du retrait et nous avons fait ici l'hypothèse d'un point de saturation des fibres $H_{PSF}=30\%$. De plus, Botosso utilise des éprouvettes dont la composition est moins homogène que dans notre travail (présence de rayon ligneux, petite proportion de parenchyme longitudinal). Ce détail important peut être à l'origine d'une différence significative.

Cette dernière remarque paraît pouvoir être généralisée à l'ensemble des tissus. En effet, même si cela semble moins marqué pour les zones de parenchyme, nous retrouvons une tendance à l'anisotropie pour ce tissu dont le comportement se situe entre celui du rayon ligneux et celui de la fibre avec un coefficient de gonflement de l'ordre de $2,4 \cdot 10^{-1}$ et $1,6 \cdot 10^{-1}$ respectivement dans les directions tangentielle et radiale.

6 Conclusion – perspectives

Nous avons présenté ici une méthode expérimentale originale de mesure des propriétés de gonflement de très petits échantillons de bois. La résolution spatiale du dispositif d'imagerie X a permis en particulier de travailler avec des éprouvettes taillées dans des plages de tissu homogène. Seules les variations dimensionnelles dans la direction tangentielle n'ont pu être évaluées correctement pour le rayon ligneux.

Il est difficile de comparer nos résultats avec ceux de la littérature, les expérimentateurs ayant très rarement complètement isolé les tissus. Cependant, les ordres de grandeurs concordent avec les mesures réalisées sur des échantillons de bois massif. En particulier, les points importants qu'il semble possible de dégager peuvent se résumer ainsi :

- les différents tissus semblent individuellement anisotropes avec des variations dimensionnelles plus importantes dans la direction tangentielle. Les hypothèses explicatives peuvent être distinguées en deux groupes. A l'échelle du groupe de cellules, leur organisation spatiale ainsi que leur forme peuvent être invoquées [**Quirk, 1984**]. A une autre échelle, plus fine, les variations de structure de la paroi cellulaire en fonction de son orientation (angle des microfibrilles, épaisseur de la lamelle mitoyenne, composition chimique...) sont couramment citées dans la littérature [**Boutelje, 1962b**] [**Harris et Meylan, 1965**] [**Mariaux et al, 1985**].
- les plages de fibre présentent les déformations les plus importantes. L'anisotropie est très marquée pour ces tissus.
- les valeurs de retrait radial des rayons ligneux, bien que relativement faibles, n'apparaissent pas assimilables à celle classiquement mesurées sur du bois massif en direction longitudinale. L'hypothèse d'un angle important entre microfibrilles et l'axe principal d'allongement des cellules (direction radiale) semble être une piste intéressante à explorer. Paramètre cependant difficile à mesurer [**Boyd, 1974**][**Boyd, 1977**], nous évoquons ici la possibilité d'utiliser les rayonnements X en tant que moyen d'investigation.

Lors du calcul des coefficients de gonflement, à chaque étape, le taux d'humidité de l'échantillon a été évalué grâce à des isothermes de sorption, abaques standards couramment

répandues dans le domaine du séchage du bois. Cependant, soumises aux mêmes conditions, les essences n'ont pas toute la même valeur de point d'équilibre. Il paraît donc difficile d'affirmer que les différents tissus que nous avons pu tester suivent les mêmes lois de comportement hydrique vis à vis des conditions extérieures. Afin de répondre à cette question, deux études complémentaires sont envisagées :

- Une nouvelle expérimentation basée sur l'utilisation d'une micro balance de précision (utilisée dans ce chapitre pour réaliser une cinétique de séchage) installée dans une enceinte climatique est depuis récemment opérationnelle dans le laboratoire. La grande précision qu'elle offre permet d'envisager une étude sur le comportement hydrique des différents tissus que nous avons isolés en fonction des conditions contrôlées de température et d'humidité relative de l'air.
- L'augmentation de la masse d'eau contenue dans l'éprouvette contribue à une plus grande atténuation du rayonnement X incident. Il est envisageable de mesurer les changements d'humidité dans l'échantillon in situ pendant le déroulement de l'expérience. Il serait alors nécessaire d'adapter les conditions d'imagerie afin d'atteindre une résolution quantitative du signal capable de détecter des variations de masse de l'ordre du pour-cent.

3^{ème} Partie :

*Calcul des propriétés homogénéisées d'un
accroissement annuel de chêne*

CHAPITRE IV

MAILLAGES ET CALCULS D'HOMOGENEISATION SUR DES IMAGES DE STRUCTURES REELLES ET ARTIFICIELLES

1 Introduction

Dans le cas de la structure hétérogène du bois de chêne, les proportions des éléments constitutants sont des paramètres explicatifs particulièrement étudiés. Ainsi, de nombreuses études tendent-elles à corréler les propriétés mécaniques ou la sensibilité au phénomène du retrait à des caractéristiques anatomiques telles que le nombre et la taille des rayons ligneux, des gros vaisseaux ou les proportions de bois de printemps ou d'été, de plages de fibres....

L'objectif de notre étude est non seulement de prendre en compte ces paramètres importants à l'échelle de l'accroissement annuel mais aussi de considérer la morphologie du milieu hétérogène, c'est-à-dire la distribution spatiale des différents constituants. Les techniques mathématiques d'homogénéisation seront naturellement utilisées pour prendre ces deux aspects en considération.

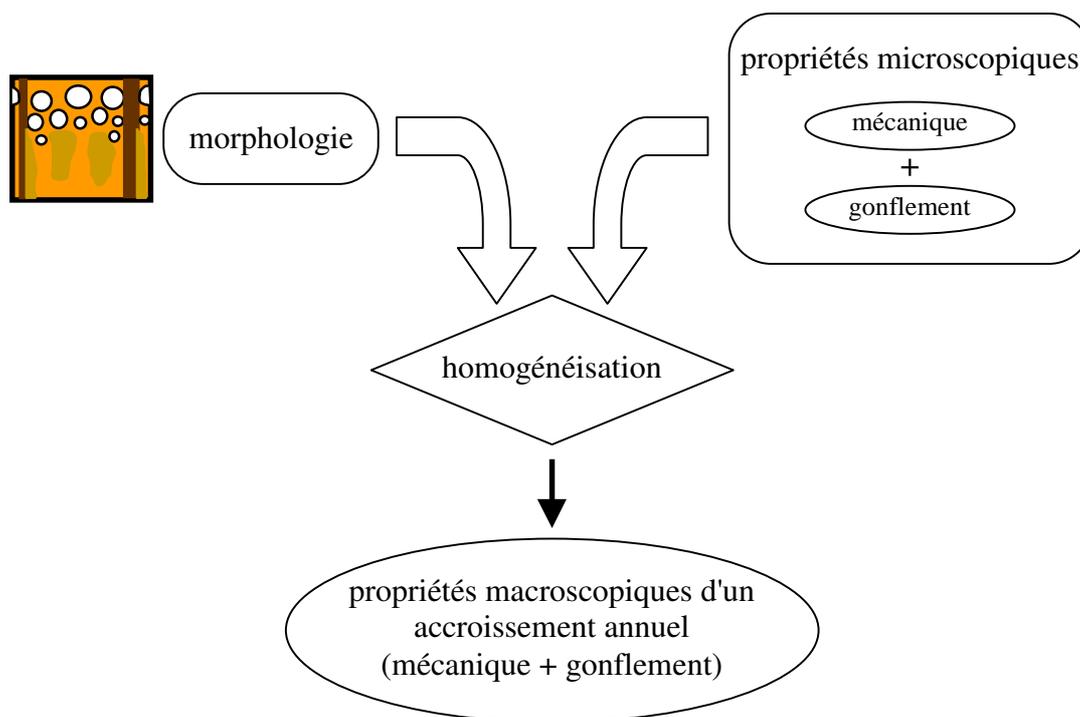


Figure 79 : Homogénéisation. La connaissance de la morphologie et des propriétés microscopiques des constituants permet de calculer les propriétés macroscopiques (homogénéisées) du matériau hétérogène (ici, un cerne annuel de croissance)

C'est donc par ce chapitre final que nous allons pouvoir assembler les connaissances acquises dans les deux premières parties à savoir respectivement, la morphologie et les propriétés individuelles des principaux éléments du plan ligneux du chêne, afin de prédire le comportement macroscopique d'un accroissement annuel.

Après un exposé théorique des équations qu'il est nécessaire de résoudre, nous présentons un principe de génération de maillages par éléments finis à partir d'une image décrivant la structure anatomique de l'accroissement annuel.

Ensuite quelques résultats de calculs réalisés sur des structures artificielles et réelles sont proposés afin d'étudier l'influence de certains paramètres microscopiques ou morphologiques sur les propriétés macroscopiques.

2 Homogénéisation

L'homogénéisation est une formulation qui permet la prédiction des propriétés macroscopiques d'un matériau hétérogène à partir de sa description microscopique. Dans le cas d'un milieu supposé périodique, l'homogénéisation se réduit à la résolution de problèmes sur une cellule unitaire, le Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R.).

Afin de déterminer les problèmes à résoudre, une méthode classique consiste à développer la formulation physique par rapport aux puissances successives d'un petit paramètre ε [Sanchez et Palencia, 1992]. Il est défini comme le rapport entre l'échelle macroscopique, représentée par le vecteur x , et l'échelle microscopique, représentée par le vecteur y (Figure 80). Ce double système de coordonnées permet de distinguer les variations spatiales macroscopiques pour deux points occupant la même position dans la cellule de base (M et M'' par exemple) des variations spatiales dues à l'effet de la courte distance séparant deux points situés à la même position macroscopique mais à des positions différentes dans le V.E.R. (M et M').

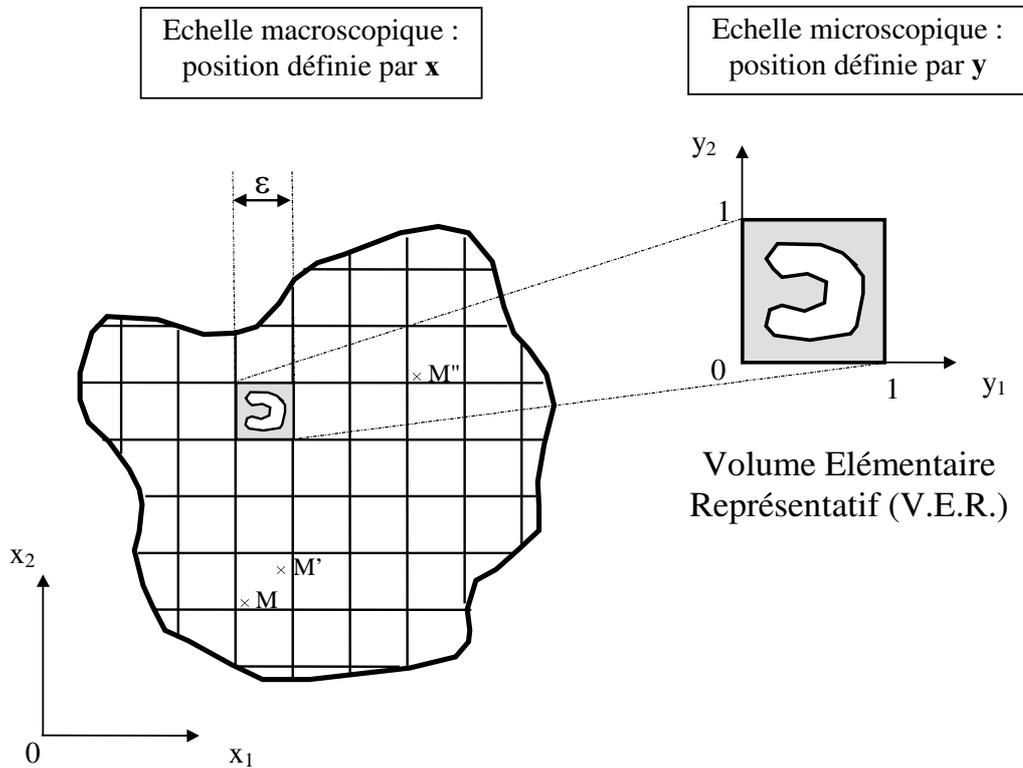


Figure 80 : Principe du système de doubles coordonnées utilisé en homogénéisation périodique (d'après [Sanchez et Palencia, 1992])

Sur la base de ce système de doubles coordonnées, le principe de l'homogénéisation est la résolution d'un problème local afin de prédire les propriétés macroscopiques. Dans le cas du problème couplé mécanique-gonflement, le problème à résoudre commence par une formulation d'équilibre classique prenant en considération les propriétés de gonflement [Perré, 1998]. A l'échelle de la cellule de base représentative, des conditions de bord périodiques particulières apparaissent à la place des conditions habituelles (conditions de contraintes ou/et de déplacement). Le problème peut donc être formulé comme suit :

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} = 0 \\ \sigma_{ij} = a_{ijkl} \{e_{kl}(u) - s_{kl}H\} \\ \sigma \cdot n \text{ anti - périodique} \\ e(u) \text{ périodique} \end{cases} \quad \text{Eq : 14}$$

avec

σ : le tenseur de contraintes

a : le tenseur des propriétés élastiques

e : le tenseur de déformations résultant du champ de déplacement u

s : le tenseur de déformations dues au gonflement

n : le vecteur unité normal aux bords

Un développement asymptotique suivant les puissances de ϵ du champs de déplacement permet de le mettre sous la forme :

$$u_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = u_i^{(0)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \varepsilon u_i^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \varepsilon^2 u_i^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots \quad \text{Eq : 15}$$

Les dérivations spatiales s'écrivent sous la forme :

$$\nabla \psi = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{y}} + \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{x}} \quad \text{Eq : 16}$$

Appliquées à la loi de comportement du système 1, les équations 15 et 16 conduisent à un développement asymptotique du tenseur des contraintes :

$$\sigma_{ij} = \varepsilon^{-1} \sigma_{ij}^{(-1)} + \sigma_{ij}^{(0)} + \varepsilon \sigma_{ij}^{(1)} + \varepsilon^2 \sigma_{ij}^{(2)} + \dots \quad \text{Eq : 17}$$

où

$$\begin{cases} \sigma_{ij}^{(-1)} &= a_{ijkl} \{ e_{ykl}(\mathbf{u}^{(0)}) \} \\ \sigma_{ij}^{(0)} &= a_{ijkl} \{ e_{ykl}(\mathbf{u}^{(1)}) + e_{xkl}(\mathbf{u}^{(0)}) - s_{kl} \mathbf{H} \} \\ \sigma_{ij}^{(1)} &= a_{ijkl} \{ e_{ykl}(\mathbf{u}^{(2)}) + e_{xkl}(\mathbf{u}^{(1)}) \} \\ \sigma_{ij}^{(2)} &= \dots \end{cases} \quad \text{Eq : 18}$$

La même loi de dérivation spatiale peut être appliquée à la divergence du tenseur des contraintes :

$$\sigma_{ij,j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_j} (\sigma_{ij}) \quad \text{Eq : 19}$$

Différentions les échelles spatiales en faisant tendre le terme ε vers 0, supposant ainsi que les deux échelles sont indépendantes. Il faut alors s'assurer que tous les termes en puissance de ε sont nuls.

A l'ordre -2, il faut donc :

$$\frac{\partial}{\partial y_j} \{ a_{ijkl} (e_{ykl}(\mathbf{u}^{(0)})) \} = 0 \text{ avec } u^{(0)} \text{ Y - périodique} \quad \text{Eq : 20}$$

Cette équation impose alors que, $u^{(0)}$ ne peut être qu'une fonction de \mathbf{x} .

A l'ordre -1 :

$$\frac{\partial}{\partial y_j} \{ a_{ijkl} [(e_{ykl}(\mathbf{u}^{(1)})) + (e_{xkl}(\mathbf{u}^{(0)})) - s_{kl} \mathbf{H}] \} + a_{ijkl} \frac{\partial}{\partial x_j} (e_{ykl}(\mathbf{u}^{(0)})) = 0 \quad \text{Eq : 21}$$

$u^{(0)}$ ne dépendant que de x , le dernier terme de la parenthèse (à gauche) disparaît.

Finalement, il faut remonter à l'ordre 0 afin de fermer le problème. Sachant que $\sigma_{ij}^{(1)}$ est anti-périodique et en intégrant l'équation résultante sur la cellule de base représentative, on obtient finalement :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \langle \sigma_{ij}^{(0)} \rangle - \langle a_{ijkl} s_{kl} \rangle \frac{\partial H}{\partial x_j} = 0 \quad \text{Eq : 22}$$

Cette équation correspond au comportement macroscopique du matériau. Pour revenir aux propriétés macroscopiques, il faut retourner à l'équation 21. Celle-ci étant linéaire, $u^{(1)}$ est lui aussi linéaire en $u^{(0)}$ et H . Nous pouvons donc chercher une solution de la forme :

$$u^{(1)} = \xi^{lm} e_{xlm}(u^{(0)}) + w H^{(0)} \quad \text{Eq : 23}$$

Grâce à la linéarité de la formulation, les solutions élémentaires ξ^{lm} et w ne dépendent pas de la variable macroscopique x . Chacune est calculée par la résolution d'un problème correspondant à un champ macroscopique sans dimension.

$$e_{xij}(u^{(0)}) = \Pi_{ij}^{\ell m} = \frac{1}{2}(\delta_{it}\delta_{jm} + \delta_{im}\delta_{jt}) \text{ et } H^{(0)} = 0 \text{ pour les problèmes } \ell m \text{ associés à } \xi^{\ell m}$$

$$e_{xij}(u^{(0)}) = 0 \text{ et } H^{(0)} = 1 \text{ pour le problème associé à } w$$

Finalement, il faut résoudre les problèmes suivants sur la cellule unitaire représentative :

$$\frac{\partial}{\partial y_j} [a_{ijk\ell} e_{k\ell}(\xi^{pq})] = -\frac{\partial}{\partial y_j} [a_{ijk\ell} \Pi_{pq}^{k\ell}] \quad \text{Eq : 24}$$

$$\frac{\partial}{\partial y_j} [a_{ijk\ell} e_{k\ell}(w)] = -\frac{\partial}{\partial y_j} [a_{ijk\ell} s_{k\ell}] \quad \text{Eq : 25}$$

La connaissance de chacune de ces solutions permet de calculer les propriétés macroscopiques ; la plus commune des formules concernant les propriétés élastiques :

$$\begin{array}{lcl} A_{ijkh} & = & \langle a_{ijkh} \rangle + \langle a_{ij\ell m} e_{y\ell m}(\xi^{kh}) \rangle \\ \text{Coefficient} & = & \text{Moyenne des coefficients} + \text{Terme} \\ \text{homogénéisé} & = & \text{microscopiques} + \text{correcteur} \end{array} \quad \text{Eq : 26}$$

L'équation 26 montre que les propriétés macroscopiques sont les moyennes des propriétés microscopiques sur la cellule de base auxquelles il faut ajouter un terme correcteur défini par les solutions élémentaires $\xi^{\ell m}$. Ce dernier représente l'effet de la morphologie sur les propriétés macroscopiques considérées.

La solution élémentaire relative au gonflement, ne fournit pas directement le gonflement macroscopique ; mais le champ de contraintes macroscopiques Q_{ij} qui l'accompagne en considérant que le champ de déformation, lui, reste nul :

$$Q_{ij} = \langle a_{ijkh} e_{ykh}(w) \rangle - \langle a_{ijkh} s_{kh} \rangle \quad \text{Eq : 27}$$

Le gonflement macroscopique S_{ij} est alors obtenu par inversion en supposant que le tenseur des contraintes macroscopiques reste nul :

$$R_{kh} = (A_{ijkh})^{-1} Q_{ij} \quad \text{Eq : 28}$$

3 Passage de l'image au maillage numérique

Dans le cadre de ce travail, la cellule de base représentative du milieu est un accroissement annuel du bois. Réaliser les calculs d'homogénéisation sur cette structure revient donc à supposer que celle-ci se répète à l'infini par translation, constituant un matériau dont nous nous proposons de calculer les propriétés. Il nous faut décrire la morphologie du cerne dans le plan transverse. A cette fin, les images de la structure obtenues grâce au dispositif d'imagerie X sont une cartographie précise de la densité de l'échantillon. Les plages de fibre, de parenchyme ou les vaisseaux peuvent être isolés sur l'image en fonction de leur propriété individuelle d'absorption du rayonnement X incident (cf. chapitre I). Partant de cette information, la construction du maillage numérique comporte plusieurs étapes qui nécessitent l'utilisation de plusieurs outils :

- la vectorisation et segmentation des contours (analyse d'image)
- la définition de la finesse de description des objets
- la génération du maillage.

3.1 Repérage des différentes phases du matériau, vectorisation et segmentation de leur contour

Le cerne annuel de chêne est essentiellement constitué de parenchyme longitudinal. Celui-ci, avec les fibres trachéides, est présent dans le bois de printemps entre les gros vaisseaux, formant une sorte de matrice. Il se prolonge dans le bois d'été où il est plus ou moins abondamment parsemé de petits vaisseaux. Les plages de fibres sont alors souvent schématisées comme des inclusions. On peut cependant observer certaines d'entre elles disposées en bandes allongées dans la direction radiale, et adjacentes au rayon ligneux qui lui, est un élément de forme régulière traversant le cerne dans le sens radial.

Dans cette étude, il n'a pas été envisagé de différencier le parenchyme inséré entre les gros vaisseaux de celui du bois final. Nous ferons donc une première hypothèse qui consiste à considérer les propriétés de ce tissu constantes dans tout le cerne. Le problème de la séparation des éléments se résume donc à la définition des gros vaisseaux, des plages de fibres et des rayons ligneux. Ces distinctions sont réalisées sur l'image en 3 étapes successives. Si le

seuillage des niveaux de gris correspondant aux vaisseaux s'avère immédiat, la proximité de certaines plages de fibres et du rayon ligneux, requiert parfois une correction manuelle.

La détection des contours est ensuite réalisée par analyse d'image (VISILOG). Ceux-ci sont ensuite segmentés. Cette opération consiste à trouver le segment de plus grande longueur remplaçant une chaîne de points du contour de telle manière que la distance de chacun d'eux à ce segment soit inférieure à une borne (d_{max}) préalablement définie.

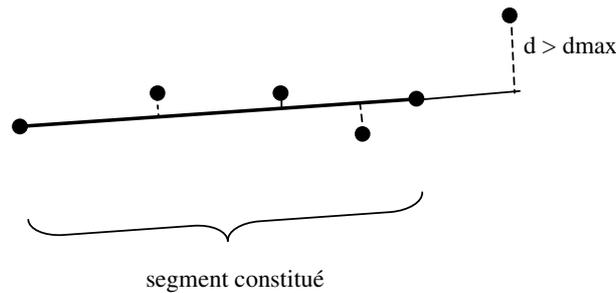


Figure 81 : Principe de la segmentation d'une chaîne de points. Tous les points remplacés par le segment ne lui sont éloignés que d'une distance inférieure à une borne d_{max} fixée.

Les coordonnées des extrémités des segments sont ensuite extraites et enregistrées dans un simple fichier ASCII. La Figure 82 représente deux des étapes de la définition des contours à savoir leur repérage puis leur segmentation.

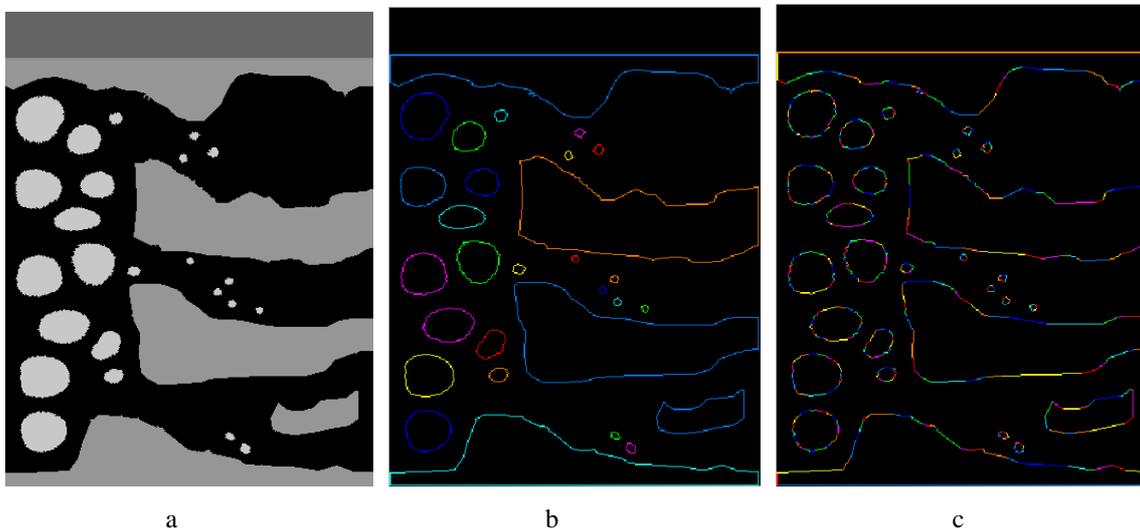


Figure 82 : Vectorisation des contours. Après définition des différentes plages de tissus (a) et de leurs contours (b), ces derniers sont segmentés (c)

3.2 Réalisation du maillage numérique

Le maillage numérique est réalisé à partir de ces descriptions des contours des différents objets. De nombreuses techniques et logiciels sont disponibles pour la réalisation pratique de maillages. Nous avons choisi d'utiliser un programme, EASYMESH, développé par **Niceno (1996)**, qui permet de générer des maillages par éléments finis triangulaires à l'intérieur de domaines décrits par leur contour. La souplesse offerte par ce programme permet en particulier de prendre en considération la présence de trous, de domaines composés de plusieurs matériaux et d'en contrôler le finesse de description (taille des éléments finis).

Ces caractéristiques en font un outil très adapté à la structure complexe et hétérogène du bois. Cependant, il s'avère que dans certains cas, lorsque les domaines prennent des formes particulières dont les contours sont définis par des segments de longueurs très contrastées, l'algorithme de génération du maillage ne converge pas vers une solution correcte. Nous avons donc entrepris de régulariser la description des contours des objets. Le principe repose sur le déplacement d'une boule de rayon constant le long des segments. Les nouveaux points de discrétisation du contour sont déterminés par l'intersection de la boule et du segment. Le rayon imposé fixe donc le pas final de description de l'objet.

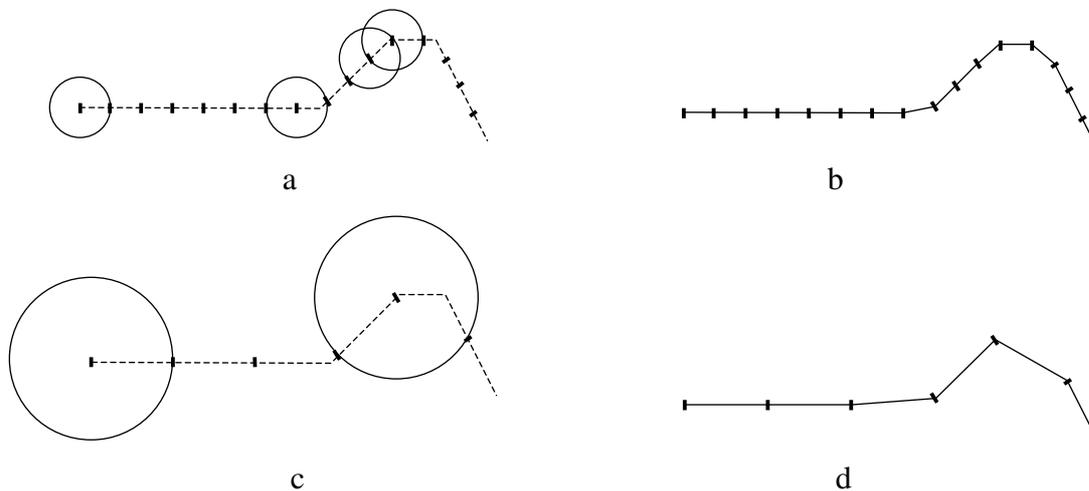


Figure 83 : Régularisation du pas de description des contours des objets. Une boule de rayon fixe parcourt les segments initiaux (a) ou (c) et uniformise la longueur des segments. La taille de la boule détermine le pas de discrétisation. Les cas (b) ou (d) montrent le type de résultats obtenus

Cette opération représente une étape supplémentaire à la procédure de maillage, mais elle permet cependant de choisir la taille des éléments finis et de l'adapter au type d'élément considéré. La Figure 84 est une illustration de cette possibilité.

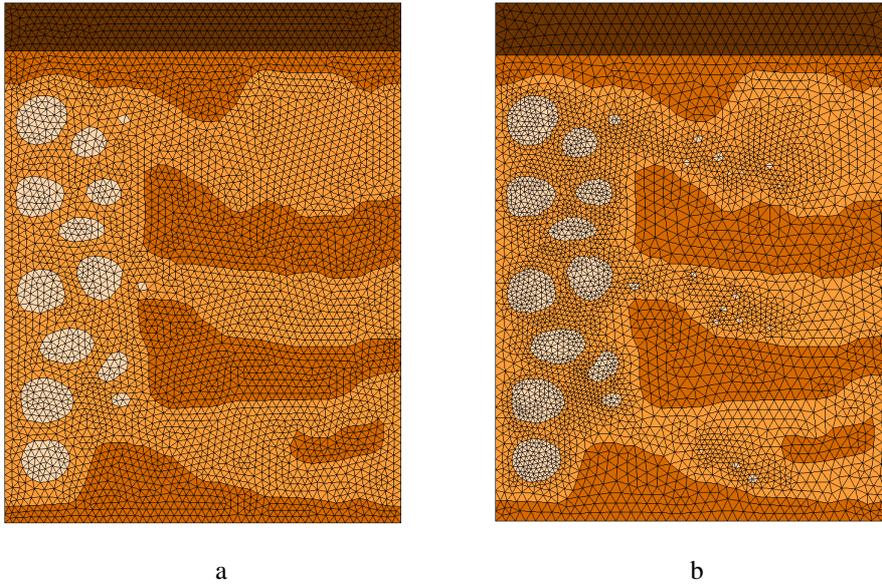


Figure 84 : Discrétisation plus ou moins fine des vaisseaux. L'utilisation d'un pas grossier (a) génère des formes plus anguleuses et fait disparaître les plus petits éléments.

Le programme MorphoPore, développé par **Perré (1998)**, résout les 4 problèmes d'homogénéisation (3 pour les propriétés élastiques et 1 pour le gonflement) sur la base de ces maillages. Les propriétés microscopiques affectées à chacun des constituants sont issues des mesures expérimentales proposées dans les chapitres précédents. La figure ci-dessous illustre les 4 termes correcteurs calculés.

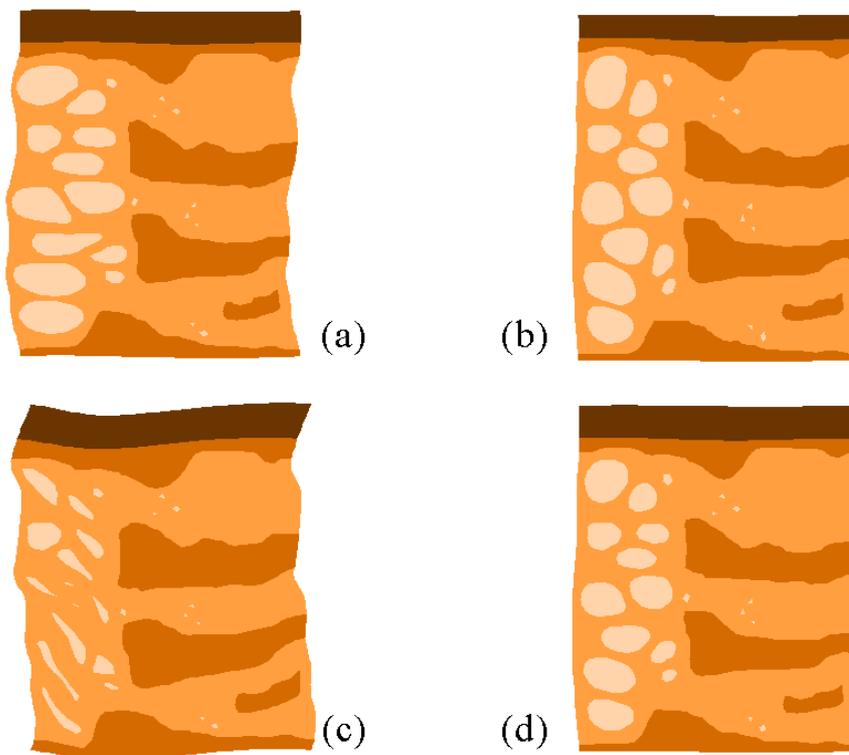


Figure 85 : Représentation des 4 termes correcteurs calculés. Les trois premiers (a, b, c) correspondent aux problèmes mécaniques (respectivement : 11, 22 et 12) et le dernier (d) au problème du gonflement.

Dans un premier temps, nous étudierons l'influence de la finesse de description des éléments anatomiques sur les propriétés macroscopiques calculées. Ce travail est un préalable nécessaire afin de déterminer les pas optimum pour la réalisation des maillages et le calcul numérique.

3.3 Influence de la résolution spatiale

Pour cette étude, nous avons choisi de prendre pour base de travail une structure réelle, c'est-à-dire une image réalisée grâce au banc d'imagerie X. Le cerne annuel a été décomposé de manière à réaliser trois types de maillage, ne faisant apparaître qu'une partie des éléments anatomiques ; à savoir la matrice de parenchyme et:

- les vaisseaux
- les plages de fibres et le rayon ligneux
- les plages de fibres seules

Pour chaque cas, nous faisons varier le pas de discrétisation qui évolue entre 6 et 50 pixels sur l'image (Figure 86). Les résultats sont ensuite comparés avec ceux obtenus grâce au maillage le plus fin (pas = 6pixels) qui sert de référence. Ce sont donc les variations relatives par rapport à ces résultats que l'on peut lire sur les courbes de la Figure 87. Pour le module d'Young, nous écrivons par exemple :

$$\text{variation relative } (E) = \frac{E - E_{\text{référence}}}{E_{\text{référence}}} \quad \text{Eq : 29}$$

Nous constatons alors qu'une mauvaise discrétisation des vaisseaux conduit rapidement à des variations importantes des propriétés mécaniques macroscopiques calculées. En effet, une augmentation du pas de description de ces éléments, dont la taille est faible par rapport aux autres tissus considérés, tend à réduire leur taille et leur nombre (les plus petits disparaissant), remplaçant ainsi une partie des trous par du parenchyme (Figure 86 (a), (b), (c)). Les vaisseaux plus ou moins alignés et formant une bande tangentielle, les variations de propriétés s'expriment donc préférentiellement sur le module d'Young dans la direction radiale (Figure 87a). Les propriétés de gonflement ne sont, elles, pas affectées par la proportion de trous. Elles restent égales, à la précision numérique près, à la propriété microscopique de la matrice de parenchyme. Ce résultat n'est pas surprenant car la matrice solide est ici homogène

Par opposition, la discrétisation du couple rayon ligneux-fibres (souvent indissociables par la présence de plages de fibres juxtaposées le long des rayons ligneux) a des répercussions sur l'ensemble des propriétés macroscopiques (Figure 87b). L'influence d'une mauvaise description est cependant moindre que dans le cas des vaisseaux et il est alors possible d'envisager l'utilisation d'un pas plus grossier. Cependant, on constate sur le graphique de la Figure 87b, des variations en opposition entre les propriétés de gonflement et les propriétés mécaniques. Le rayon ligneux est affecté de faibles coefficients de gonflement et de fortes rigidités. Le pas de discrétisation utilisé modifiant sa largeur, ce paramètre qui pourrait jouer ici un rôle non négligeable (Figure 86 (d), (e), (f)).

Les derniers calculs réalisés en ne considérant que les plages de fibre (Figure 86 (g), (h), (i)) confirment qu'une discrétisation même très grossière de ces éléments permet d'obtenir les propriétés macroscopiques avec une bonne précision (erreur relative inférieure au pour-cent). En conclusion, durant la procédure fixant les pas respectifs de discrétisation des différentes plages de tissus, il faudra prendre soin de décrire précisément les vaisseaux ainsi que la largeur des rayons ligneux. Afin de donner un ordre de grandeur par rapport à la taille réelle des éléments anatomiques, indiquons que le pas des éléments finis les plus petits utilisés ici correspond à environ 40 μm . Un gros vaisseaux de 300 μm de diamètre voit donc son contour discrétisé par plus d'une vingtaine d'éléments.

Par contre, les plages de fibres supportent une discrétisation plus grossière et un pas de plus d'une centaine de micromètres est amplement suffisant

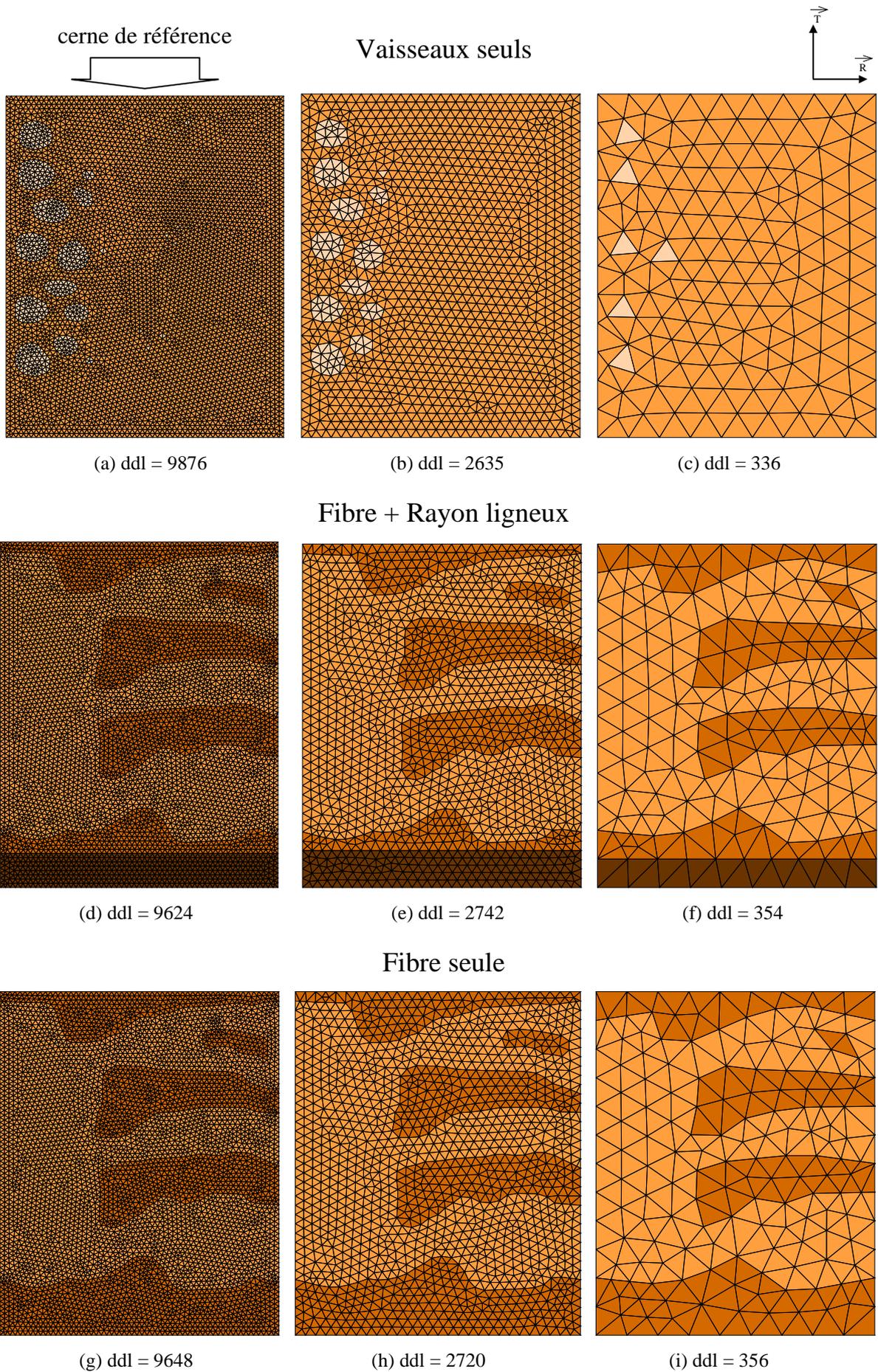


Figure 86 : Utilisation de différentes tailles d'éléments finis pour la description des plages de tissus

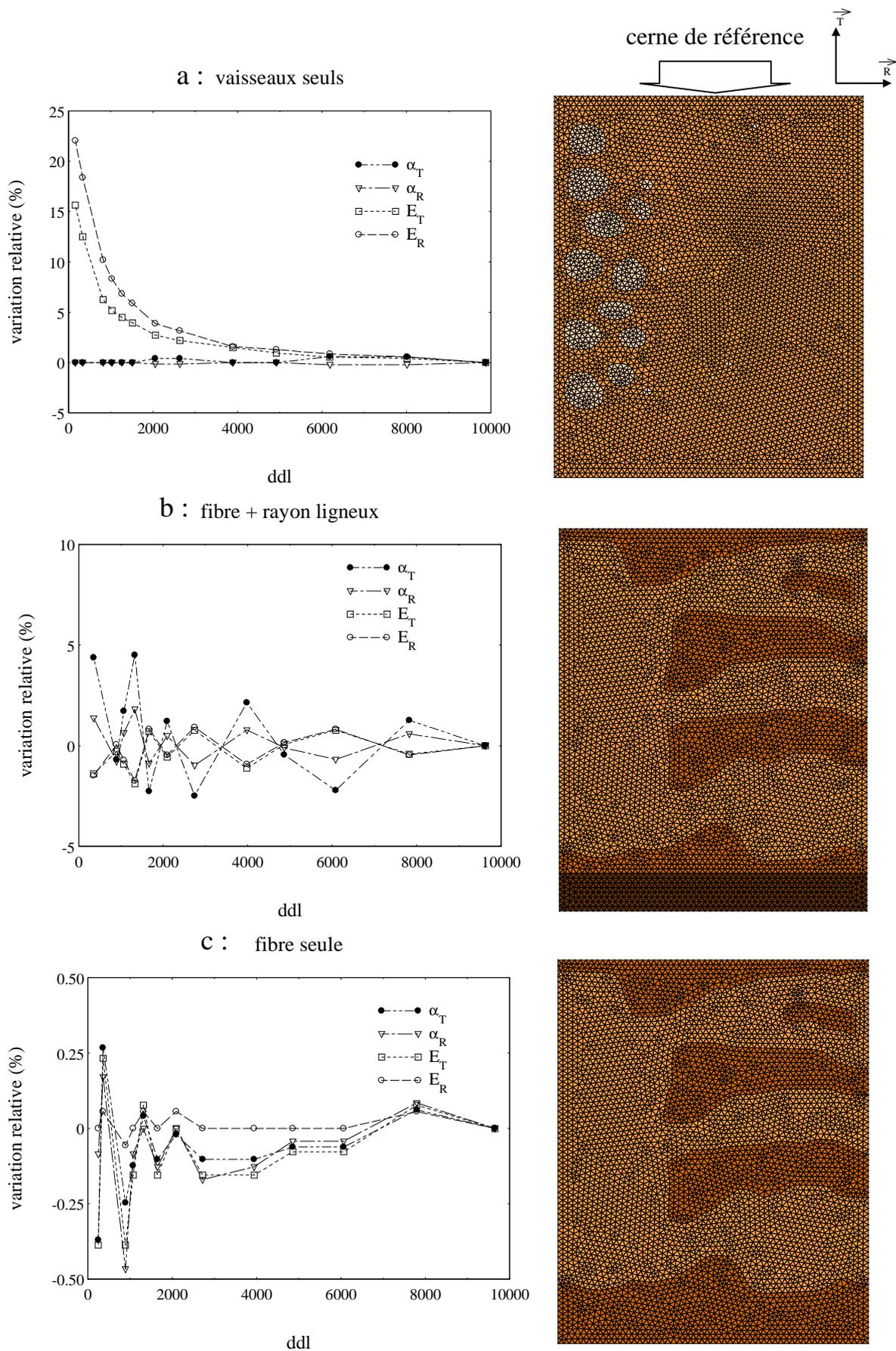


Figure 87 : Effet de la taille des éléments finis sur les propriétés macroscopiques calculées. Les variations relatives représentées sont exprimées par rapport au résultat obtenu avec le maillage le plus fin (Eq : 29).

4 Utilisation du modèle

4.1 Influence des propriétés microscopiques

Dans le cadre de ce travail, les propriétés microscopiques injectées pour le calcul d'homogénéisation sont des moyennes issues de nos mesures expérimentales. Cependant, les mesures mécaniques et celles de retrait ont montré une variabilité plus ou moins importante suivant le tissu, la propriété et la direction considérés. L'objet de ce paragraphe est d'évaluer les conséquences des variations microscopiques sur les propriétés macroscopiques calculées. Pour une structure donnée (ici, celle utilisée dans le paragraphe précédent), une étude complète consisterait à faire varier une à une toutes les propriétés microscopiques de chacun des composants du cerne. Il est plus ou moins prévisible que les résultats d'un tel travail fastidieux restent très difficiles à analyser. Aussi avons nous préféré étudier l'influence d'une variation de 1% de toutes les propriétés d'un constituant par rapport à leur valeur d'origine (moyenne expérimentale). Les propriétés de gonflement étant indissociables de la mécanique, toutes les caractéristiques du tissu considéré (E_R , E_T , α_R et α_T) sont simultanément modifiées. Les variations observées sont reportées dans le tableau ci-dessous.

	E_R	E_T	α_R	α_T
Valeurs de référence	1633 MPa	1055 MPa	0.2043	0.3847
Fibre (+1%)	+ 0.27 %	+ 0.23 %	+ 0.63 %	+ 0.62 %
Rayon ligneux (+1%)	+ 0.22 %	+ 0.07 %	+ 0.09 %	+ 0.02 %
Parenchyme (+1%)	+ 0.48 %	+ 0.67 %	+ 0.24 %	+ 0.34 %

Figure 88 : Evolutions des propriétés macroscopiques en fonction des propriétés microscopiques des tissus (à morphologie fixée). Les valeurs indiquées représentent la variation de la propriété macroscopique pour une modification de 1% des propriétés microscopiques d'un seul constituant.

La complexité morphologique de la structure utilisée ne permet pas de comparer l'influence relative des éléments anatomiques entre eux, celle-ci dépendant en particulier de leurs proportions respectives au sein de l'accroissement. Cependant, nous remarquons qu'une modification des propriétés microscopiques des plages de fibres affecte essentiellement les coefficients de gonflement dans les deux directions alors que le rayon ligneux, par sa forme et son orientation particulière influe essentiellement sur les propriétés macroscopiques dans la direction radiale. Le parenchyme, par son rôle de matrice, est le seul élément rigide continu

dans la direction tangentielle. Son influence particulièrement importante sur le module d'Young et le coefficient de gonflement dans cette direction paraît donc cohérente.

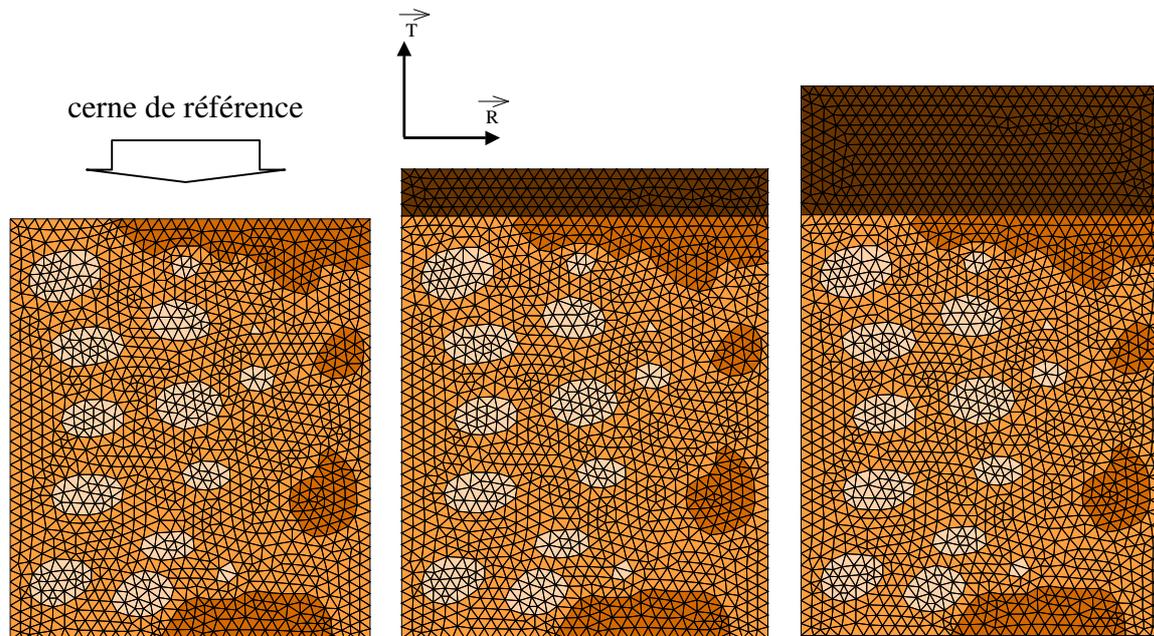
4.2 Influence de paramètres morphologiques

L'étude des paramètres morphologiques requiert le contrôle de la proportion, de la forme et de la distribution spatiale des éléments anatomiques. Si cela semble relativement aisé dans le cas particulier du rayon ligneux dont la forme et l'orientation sont régulières, celles des vaisseaux ainsi que des plages de fibres sont plus difficilement maîtrisables.

Dans un premier temps, nous étudions l'influence de la taille du rayon ligneux, paramètre anatomique très largement cité dans la littérature comme explicatif du retrait. Ce travail sera réalisé sur la base d'une structure réelle. Puis, dans un second temps, nous étudions l'influence de la forme des plages de fibre, autre élément particulier par ses propriétés mécaniques et de gonflement très élevées. Le contrôle de la forme et des proportions de tissus requiert alors la génération d'accroissements annuels artificiels.

4.2.1 Influence de la taille du rayon ligneux

Nous utilisons ici un cerne dont nous avons simplement ôté le rayon ligneux. Cette structure sert de référence sur laquelle nous rajoutons le rayon ligneux dont nous augmentons progressivement la largeur. La Figure 89 représente les deux accroissements extrêmes et un autre intermédiaire (proportion de rayon ligneux : 0%, 10% et 23%) ainsi que les valeurs macroscopiques qui sont comparées à celles obtenus avec le cerne de référence. Les variations relatives qui apparaissent sur les courbes situées à droite sont de nouveau calculées suivant l'équation 29.



Proportion de rayon ligneux
dans le cerne : **0%**

10%

23%

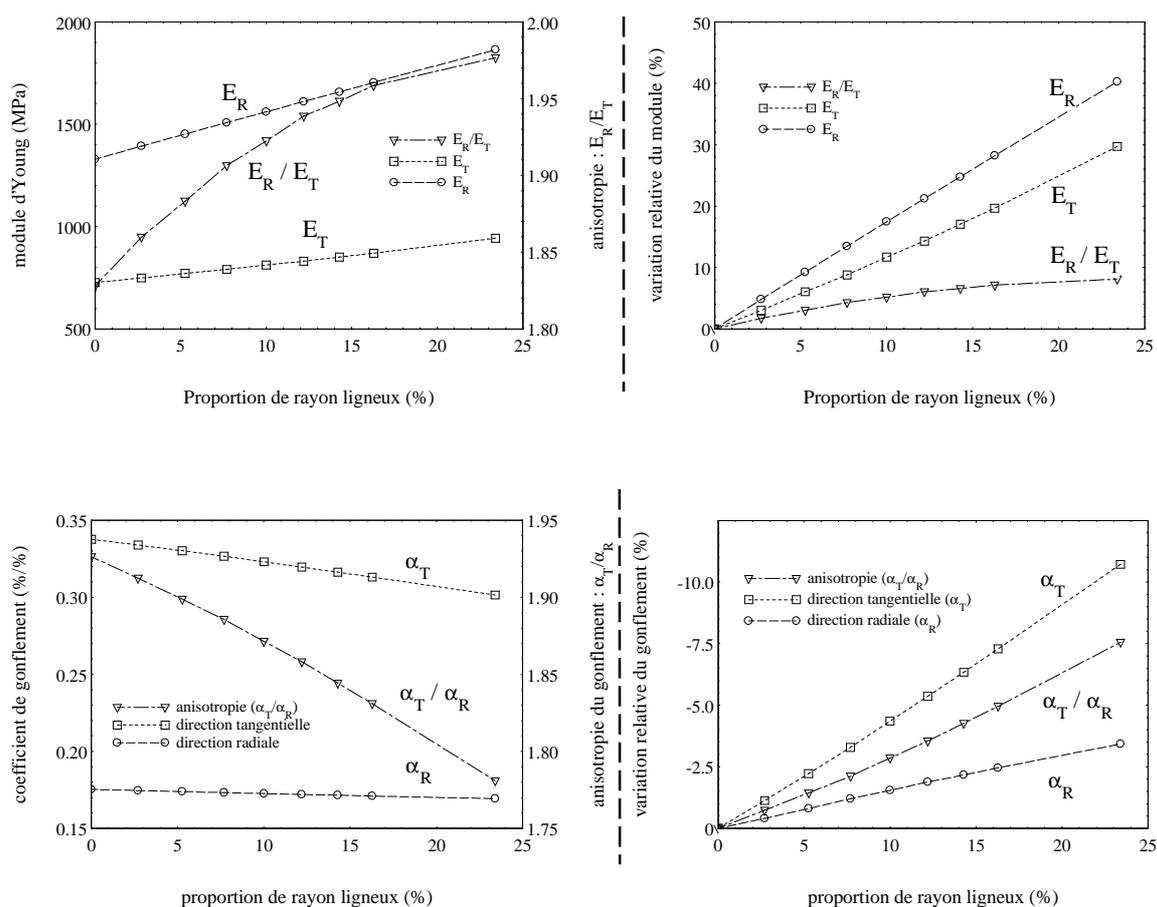


Figure 89 : Evolutions des propriétés macroscopiques en fonction de la dimension du gros rayon ligneux. Les variations relatives représentées sont calculées par rapport au cerne de référence (pas de rayon ligneux).

Élément affecté de fortes rigidités (par rapport aux autres tissus), l'augmentation de la largeur du rayon ligneux engendre un renforcement général des propriétés mécaniques macroscopiques du cerne. Cependant, sa forme particulière génère des variations inégales suivant la direction considérée (Figure 89):

- radiale : nous observons une croissance linéaire avec la proportion de rayon ligneux. Cette variation était attendue en raison de la disposition "en parallèle" dans cette direction.
- tangentielle : le renforcement est moindre en raison de la disposition "en série".

Nous observons donc une croissance du rapport d'anisotropie pour la mécanique.

A contrario, le rayon ligneux est affecté de faibles coefficients de gonflement. Nous constatons donc une diminution générale de cette propriété à l'échelle macroscopique. Cependant, les coefficients de gonflement du parenchyme et du rayon ligneux sont similaires dans la direction radiale. La présence de ce dernier a donc un effet limité dans cette direction. Par contre, son coefficient tangentiel est beaucoup plus faible que celui des autres tissus. Nous observons donc une influence nettement plus marquée et une réduction du comportement anisotropique pour le gonflement.

4.2.2 Influence de la forme des plages de fibres et de la largeur de cerne

Nous avons pu constater dans les chapitres précédents (Chapitre II et Chapitre III) que les plages de fibres montrent des rigidités mécaniques et des coefficients de gonflement importants. Ces propriétés leur confèrent un rôle dominant lors des variations dimensionnelles dues à des modifications du taux d'humidité du bois. L'observation des faciès d'accroissements annuels montre que l'on peut schématiquement distinguer deux grandes familles de forme de plage de fibres ; celles-ci pouvant être allongées dans la direction radiale ou montrer une forme triangulaire dont la base se situe juste après la zone de bois de printemps.

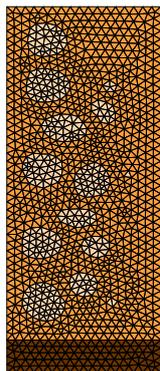
Dans le cas du chêne, bois feuillu à zone initiale poreuse, les variations de largeur totale du cerne s'expriment essentiellement dans la largeur du bois final [Nepveu, 1994]. Nous proposons donc ici d'utiliser une image de bois initial qui fournit une description de base réaliste (nombre, forme et agencement des vaisseaux, dimension du rayon ligneux). Cette

structure sert de référence à partir de laquelle nous générons des cernes artificiels (Figure 90) schématisant des accroissements fins ou larges et comportant des plages de fibres de forme triangulaire (a, b, c) ou rectangulaire (d, e, f) en proportion identique. Une troisième série simule des accroissements sans production de fibre (g, h, i). A l'instar des études précédentes, les évolutions relatives par rapport au cerne de référence sont à chaque fois indiquées.

La tendance générale constatée montre, dans tous les cas de structure (Figure 91), une augmentation assez nette des propriétés mécaniques (Figure 91a) et de gonflement (Figure 91e) avec la largeur de cerne. Cependant, ces variations sont inégales suivant la direction considérée ou la forme des plages de fibre.

En particulier, quelle que soit la propriété, son évolution semble toujours plus marquée dans le cas des plages de fibres de type "triangulaire". A contrario, l'absence de production de fibre conduit à des variations très modérées lors de l'augmentation de la largeur de cerne. Il faut cependant distinguer les évolutions des deux types de propriétés que nous étudions :

- mécanique : l'augmentation du module d'Young avec la largeur de cerne est plus rapide dans la direction tangentielle (Figure 91c), concourant ainsi à une réduction importante de l'anisotropie transverse (Figure 91b et d). La forme des plages de fibres (triangulaire ou rectangulaire) explique une part non négligeable de la variation constatée.
- gonflement : il faut ici distinguer 2 étapes. Dans un premier temps, l'apparition des plages de fibres, élément de comportement très anisotrope, augmente fortement le coefficient de gonflement tangentiel. Ensuite, l'augmentation progressive de la largeur de cerne tend au contraire à réduire le rapport α_T/α_R (Figure 91f). La forme des plages de fibre s'avère encore ici être un paramètre explicatif important.



cerne de référence

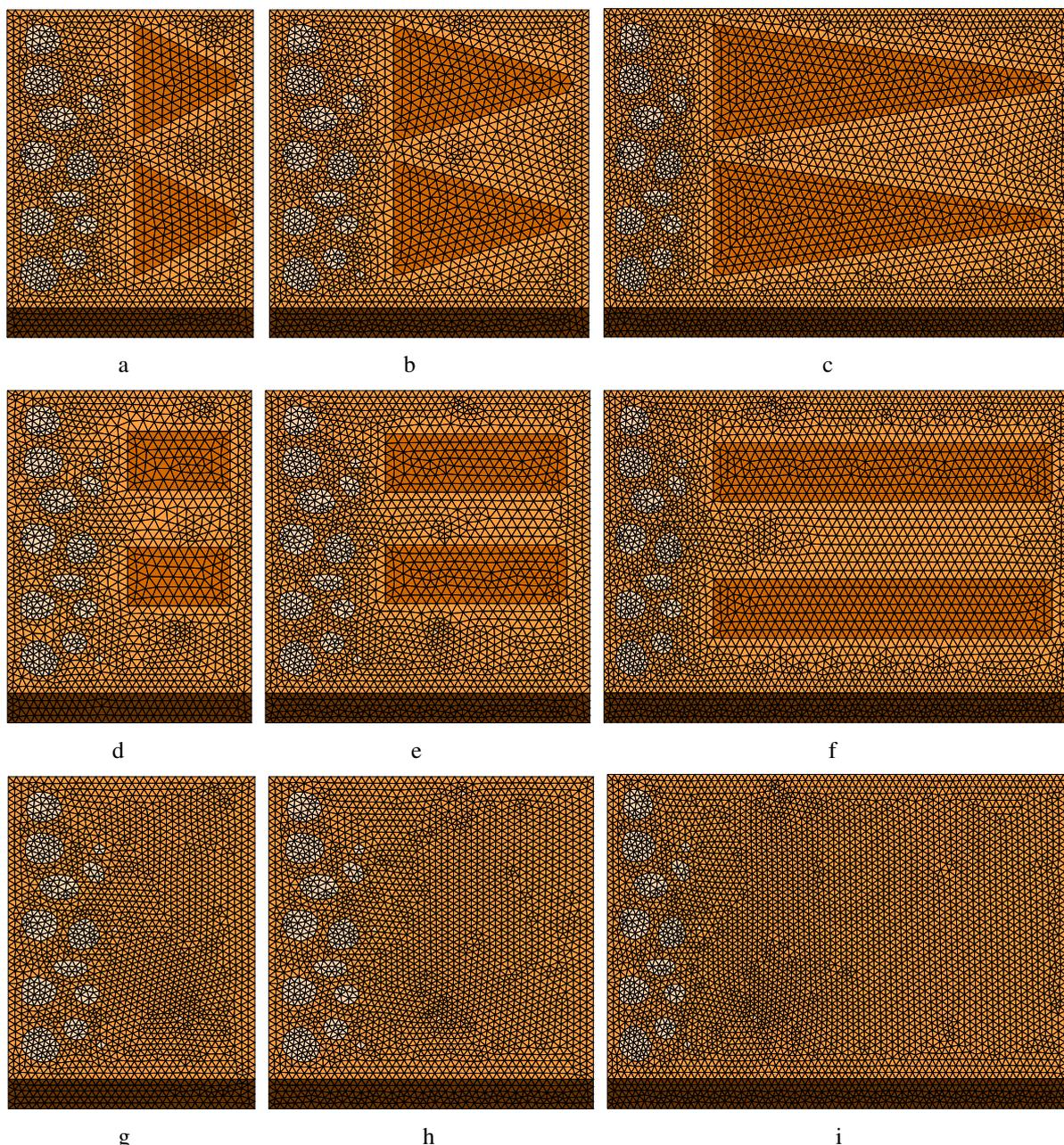


Figure 90 : Influence de la forme des plages de fibre. Les proportions de fibre sont identiques dans le cas “triangulaire” et “rectangulaire”. Structures artificielles réalisées à partir d’un cerne réel de référence.

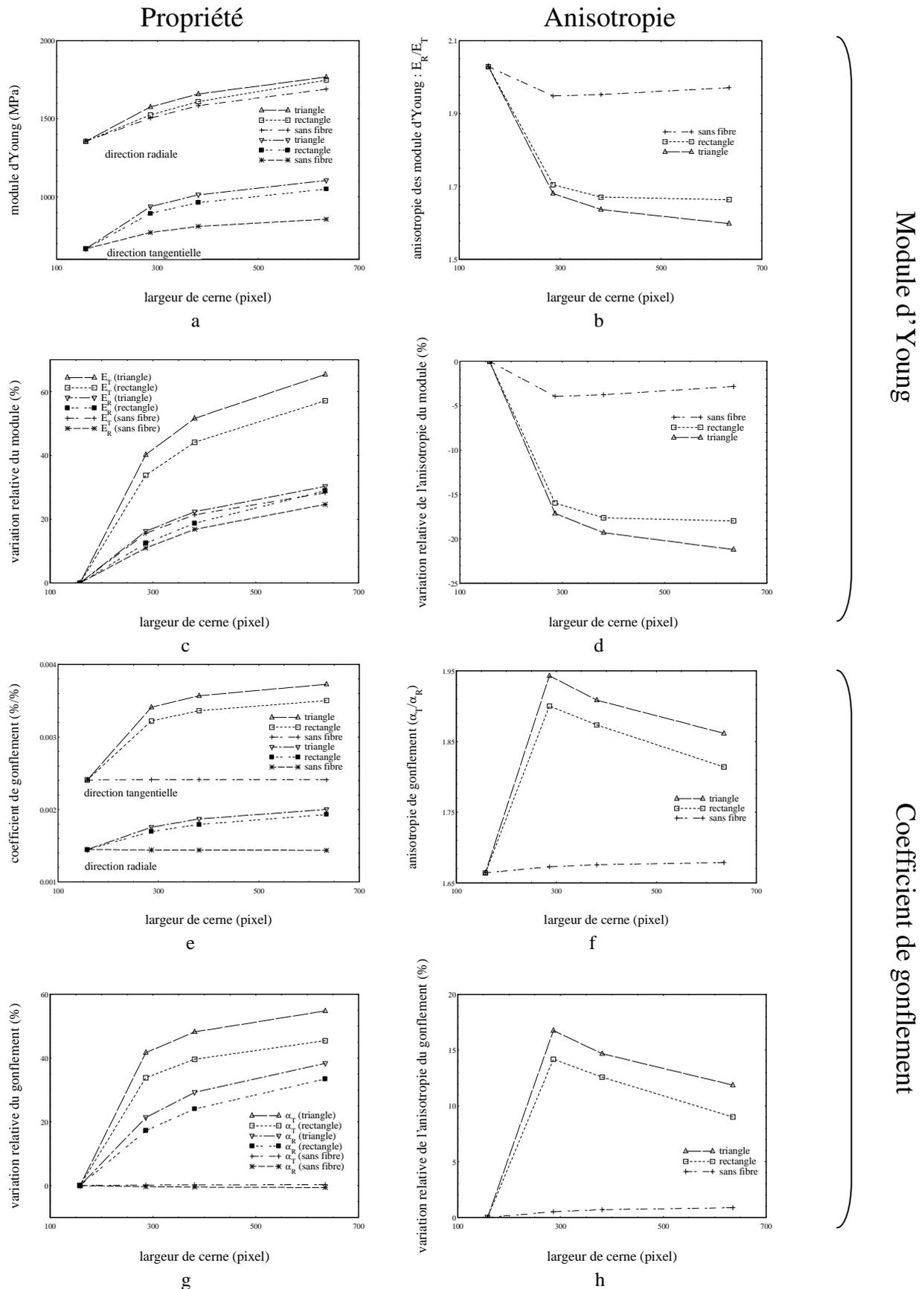


Figure 91 : Evolutions des propriétés macroscopiques (mécanique et retrait) en fonction de la largeur de cerne et de la morphologie des plages de fibre (triangulaire, rectangulaire ou sans fibre). Les variations relatives sont exprimées par rapport aux propriétés du cerne de référence à accroissement très fin.

Il ressort de ces calculs que la forme des plages de fibres semble jouer un rôle important dans la direction tangentielle mais beaucoup moins dans la direction radiale. Afin de tester cette hypothèse, les plages de fibre rectangulaires sont maintenant disposées de manière à présenter leur grande longueur dans la direction tangentielle (Figure 92b).

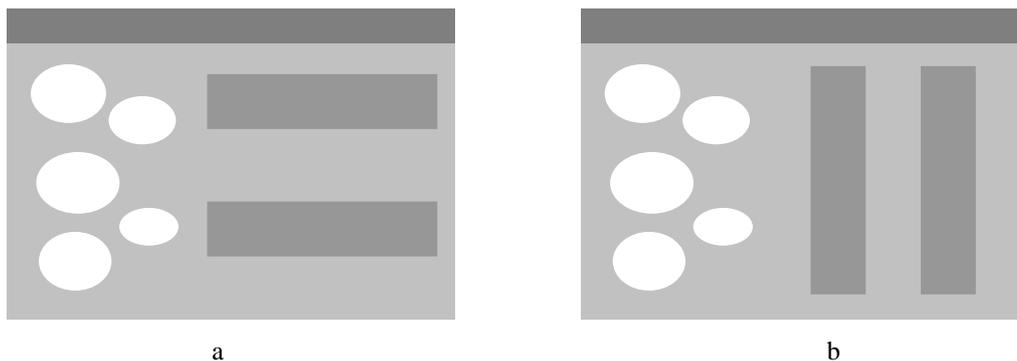


Figure 92 : Disposition, allongées suivant la direction radiale (a) ou tangentielle (b), des plages de fibres rectangulaires

Dans l'observation des résultats reportés sur la Figure 93, nous retrouvons le renforcement général des propriétés avec l'accroissement de la largeur de cerne. La disposition en parallèle ou en série des fibres influe sur la direction tangentielle en renforçant le module d'Young E_T et le coefficient de gonflement α_T sans quasiment affecter les propriétés dans la direction radiale, confirmant ainsi que celle-ci est essentiellement gouvernée pas les gros vaisseaux de la zone initiale et les rayons ligneux.

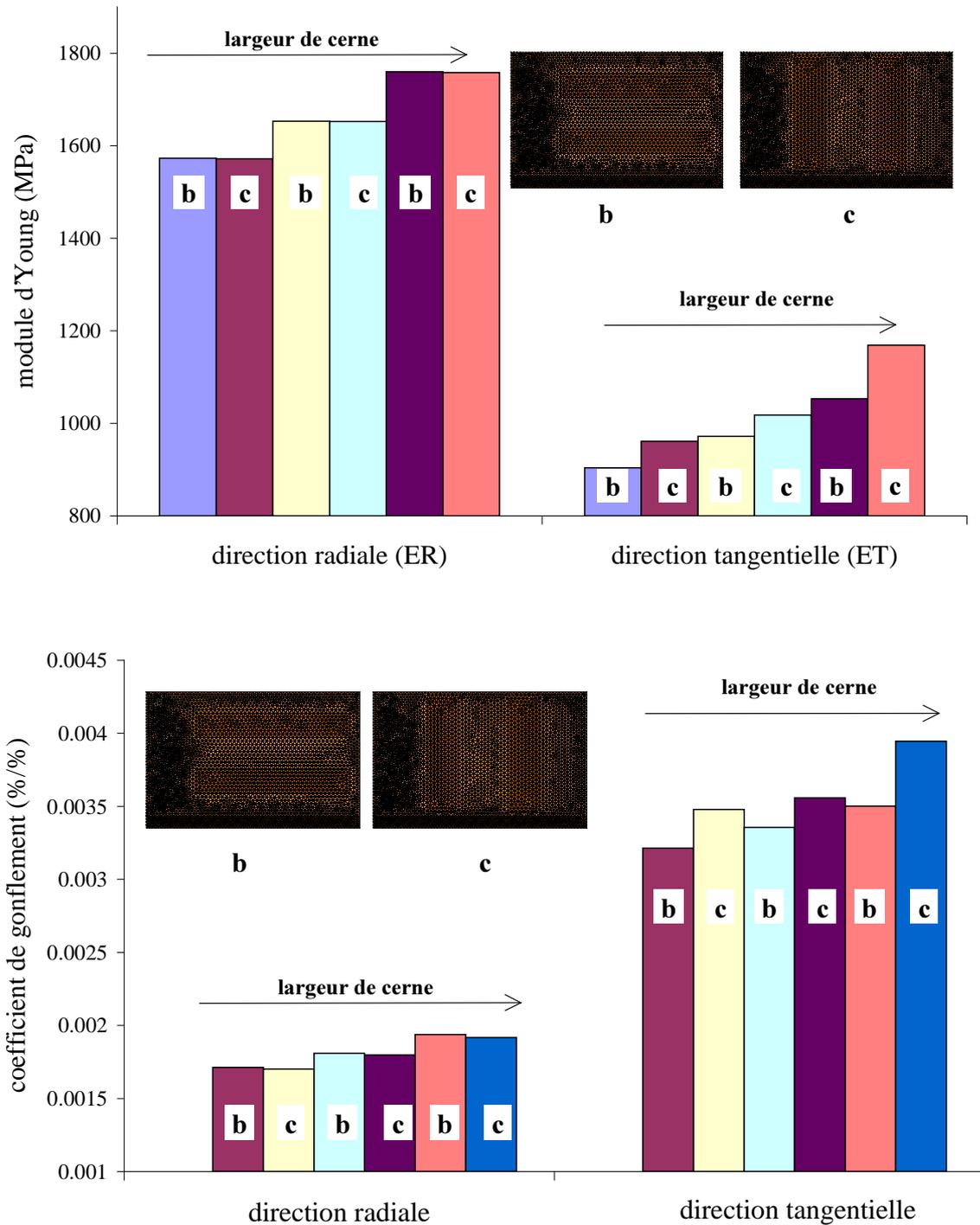


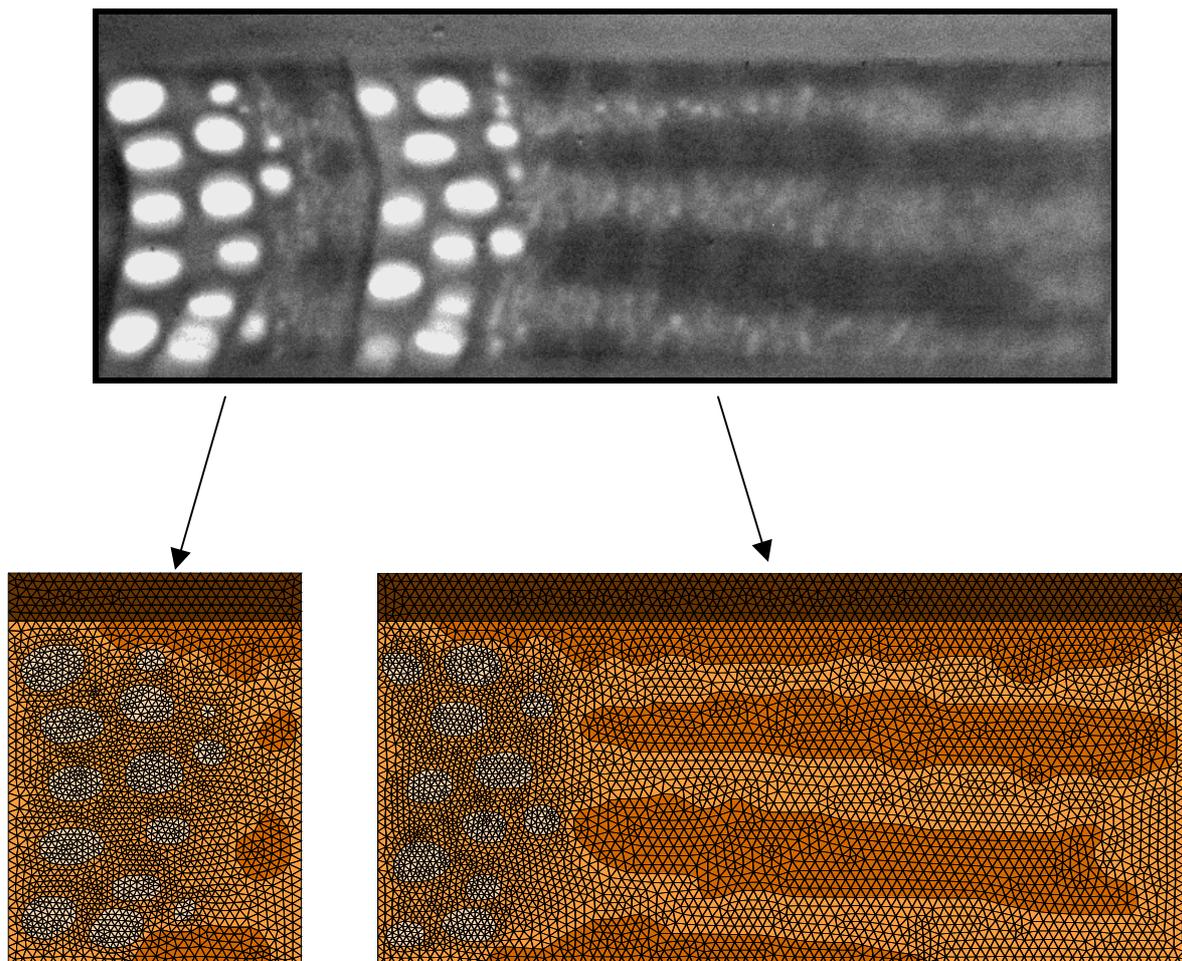
Figure 93 : Influence de l'orientation des plages de fibre sur les modules d'Young et coefficients de gonflement. Si l'augmentation de la largeur de cerne tend à renforcer toutes les propriétés, toutes choses égales par ailleurs, une orientation des plages de fibre dans la direction tangentielle (c) augmente la rigidité et le coefficient de gonflement dans cette direction sans affecter les propriétés dans la direction radiale.

4.3 Influence de la vitesse d'accroissement par comparaison de deux cernes d'un même arbre

Les calculs précédents ont été réalisés sur des structures artificielles dans le souci de garder un contrôle parfait de la forme et de la proportion des composants anatomiques que nous souhaitons étudier. Il faut noter que ces structures ont été construites au prix d'hypothèses sur la façon dont l'arbre élabore son bois (forme caricaturale des plages de fibres, conservation des caractéristiques de la zone initiale et de la forme des plages de fibre dans le bois final lors de l'augmentation de la largeur de cerne). N'oublions pas que ce processus biologique reste complexe et que, par exemple, il est difficile de prédire précisément les conséquences qu'une croissance plus rapide sur les évolutions morphologiques de la structure du cerne.

Les outils mis en place ont pour vocation première de calculer les propriétés sur des morphologies réelles, résultat de la production naturelle du cambium. A titre d'exemple, nous proposons donc la comparaison de deux cernes du même arbre élaborés sur deux années successives (Figure 94). Le premier accroissement annuel a une largeur couramment rencontrée, de l'ordre de 1.4 mm, alors que celui produit l'année suivante montre une largeur de cerne environ 3 fois plus importante, probablement consécutive à une action de sylviculture (éclaircie).

Le fait de réaliser les calculs dans le même arbre, sur des accroissements élaborés suivant le même rayon, sur deux années successives et donc, à l'origine, élaborés par les mêmes cellules du cambium, permet de se placer dans une configuration optimum pour la justification de l'hypothèse forte qu'est la conservation des propriétés microscopiques des éléments d'une structure à l'autre.



		Croissance lente	Croissance rapide (+ 190%)
Propriétés mécaniques	E_R (MPa)	1517	1856 (+22%)
	E_T (MPa)	771	1201 (+55%)
	E_R / E_T	1.97	1.54 (-21%)
Coefficients de gonflement	α_R (% / %)	0.1728	0.2152 (+26%)
	gonflement total radial (%)	5.2	6.5
	α_T (% / %)	0.3230	0.3985 (+24%)
	gonflement total tangentiel (%)	9.7	12.0
	α_T / α_R	1.87	1.85 (-0.9%)

Figure 94 : Calcul des propriétés homogénéisées de deux cernes annuels du même arbre à vitesse de croissance très différente. Les propriétés de chacun des constituants sont supposées identiques dans les deux cas. Les valeurs de gonflement total, présentées à titre indicatif, sont calculées avec l'hypothèse d'une déformation linéaire entre l'état anhydre et le PSF (avec $H_{PSF}=30\%$)

Sur ces deux exemples, nous retrouvons les ordres de grandeur des valeurs habituellement citées dans la littérature ; à savoir une déformation totale (entre le PSF et l'état anhydre) d'environ 5-6 % dans la direction radiale et un rapport d'anisotropie du comportement au gonflement de l'ordre de 2 ($\alpha_T/\alpha_R \approx 2$) [Guitard et al, 1994].

Les valeurs macroscopiques montrent une augmentation générale des propriétés avec la vitesse de croissance. Nous retrouvons alors la tendance remarquée lors des calculs réalisés sur les structures artificielles (§4.2.2). Cette évolution est particulièrement marquée pour le module d'élasticité dans la direction tangentielle, imposant alors une décroissance forte du rapport d'anisotropie mécanique.

5 Conclusion

Ce dernier chapitre a été l'occasion d'assembler les propriétés microscopiques et l'information sur la morphologie que nous nous étions efforcés d'obtenir expérimentalement dans les deux premières parties de ce travail. Grâce aux techniques d'homogénéisation, nous avons pu prendre en considération ces paramètres pour une prédiction des propriétés macroscopiques du bois à l'échelle de l'accroissement annuel.

Si à partir de quelques exemples, nous avons pu étudier l'influence de paramètres tels que les propriétés microscopiques, la proportion, la forme ou la distribution spatiale de certains éléments anatomiques, nous avons surtout démontré ici le potentiel important d'utilisation d'un tel outil.

En particulier, nous avons pu mettre en évidence que, outre la proportion respective des différentes plages de tissus composant le plan ligneux, leur forme et leur agencement au sein du cerne était un paramètre supplémentaire à prendre en considération pour la compréhension des propriétés du bois.

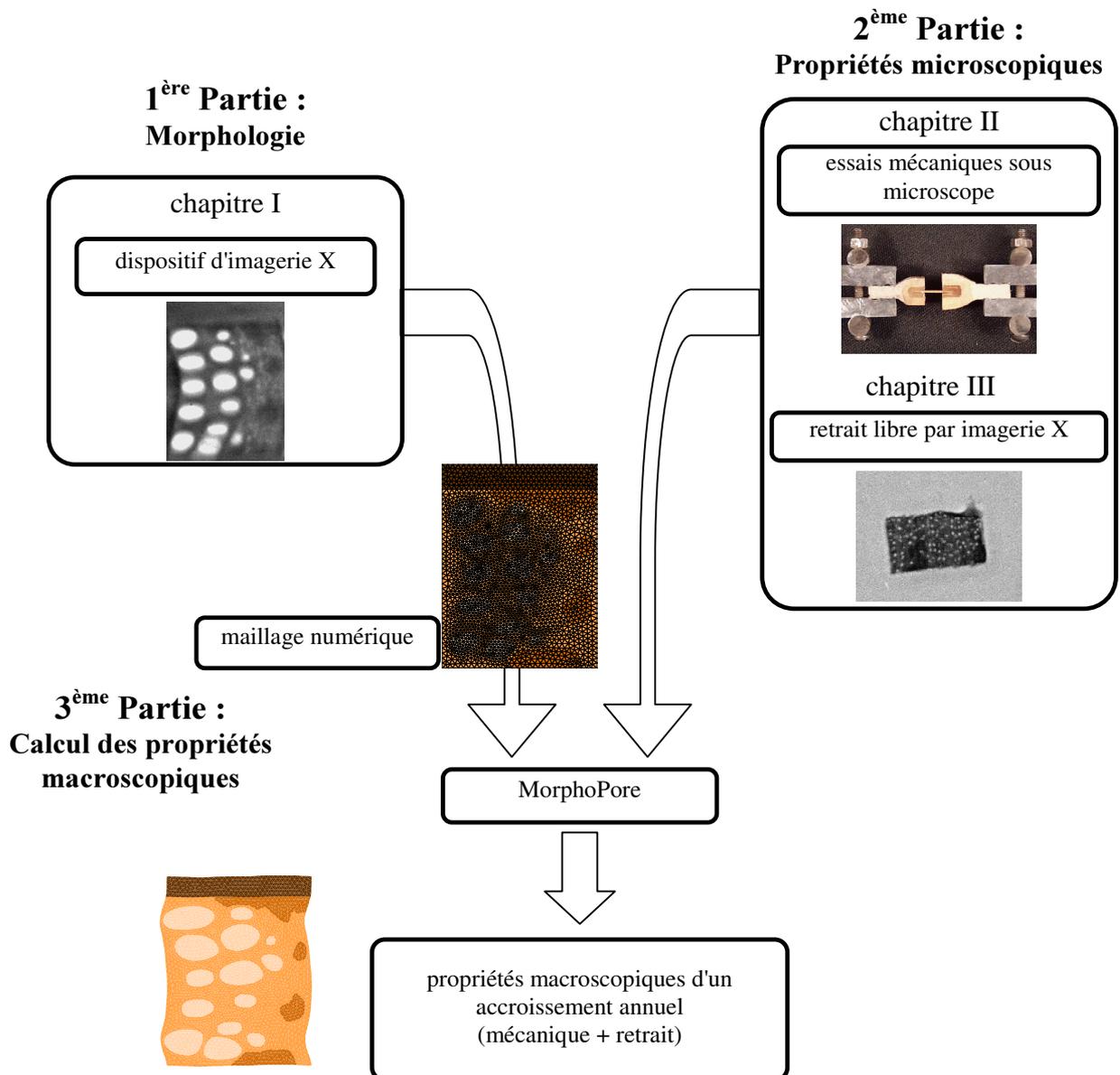
A l'instar du dernier exemple présenté, nous avons montré que cette approche déterministe rend possible la distinction de l'influence de facteurs de type génétiques (formes caractéristiques des plages de tissus, nombre de rangées tangentielles de gros vaisseaux,

nombre et largeur des rayons ligneux...) de ceux liés au type de sylviculture menée (largeur de cerne).

Enfin, l'utilisation du programme MorphoPore nous a permis de prédire l'influence des propriétés microscopiques et de la morphologie sur les propriétés macroscopiques d'un accroissement annuel de bois de chêne. L'étape suivante consiste à calculer la distribution des contraintes au sein de ce cerne. En particulier, la proximité de zones de comportements au gonflement très différents peut générer des concentrations de contraintes qui, localement, peuvent être à l'origine d'endommagements importants tels que des fissures.

CONCLUSION

Ce travail a permis de déterminer les propriétés macroscopiques élastiques et de retrait d'un cerne annuel de chêne à partir de la description de sa morphologie et des propriétés microscopiques de ses constituants. Pour cela, il a été nécessaire de mettre en place la chaîne d'outils représentée sur la figure ci-dessous.



Principe de la détermination des propriétés macroscopiques d'un cerne et outils mis en place

La description de la morphologie à l'échelle du cerne ainsi que les mesures des propriétés microscopiques des différents tissus qui le composent, données nécessaires à cette approche déterministe, ont été obtenues à l'aide de dispositifs expérimentaux spécifiques. Les étapes et leurs principaux résultats qui mènent aux calculs d'homogénéisation peuvent être résumés ainsi :

- **Développement et mise au point d'un dispositif d'imagerie X** numérique. Les possibilités de résolutions spatiale et quantitative offertes répondent au besoin de description de la morphologie du plan ligneux du chêne à l'échelle de l'accroissement annuel. Contrairement aux films radiographiques limités par les problèmes de saturation, l'acquisition par caméra numérique permet de travailler avec des tensions accélératrices importantes (ici 70 kV). Le flux de photons alors généré compense avantageusement la réduction du signal détecté ; améliorant ainsi la qualité de l'image par l'augmentation du rapport Signal/Bruit.

- **Mesure de propriétés élastiques des principaux éléments constitutifs du plan ligneux.** Des essais de traction ont été réalisés sous microscope sur des petites éprouvettes (quelques centaines de micromètres de section) usinées au sein de pages de tissus homogènes. Ils ont permis de dégager des ordres de grandeur des modules d'Young des différents tissus. Le rayon ligneux et les plages de fibres montrent des rigidités très importantes. Cependant, l'allongement radial des cellules de parenchyme qui composent le rayon ligneux pouvait laisser supposer un module d'Young beaucoup plus important dans cette direction que celui que nous avons pu mesurer. Les plages de parenchyme longitudinal présentent une anisotropie transverse marquée ($E_R/E_T \approx 2$)

- **Mesure de retrait libre d'échantillons microscopiques.** La conception d'une chambre climatique compacte, installée au sein du dispositif d'imagerie X, a permis de contrôler le taux d'humidité de très petits échantillons. Par la comparaison d'images réalisées à différents taux d'humidité, cette méthode originale sans contact permet d'accéder, simultanément dans deux directions, aux coefficients de gonflement de l'éprouvette. Les plages de fibres ont alors montré une sensibilité au retrait très importante et un comportement anisotrope très marqué ($\alpha_T/\alpha_R \approx 2$). La propriété de retrait radial du rayon ligneux, bien que faible, est du même ordre de grandeur que celle des autres tissus.

- **Passage de l'image descriptive de la morphologie à des maillages numériques.** Les images réalisées par atténuation de rayons X, cartographies des propriétés d'absorption du matériau, ont permis de séparer les différentes plages de tissus par analyse d'image et d'en extraire les contours. Ces derniers ont été la base de la description vectorielle de la morphologie utilisée pour la génération des maillages numériques.

- **Calculs d'homogénéisation.** L'utilisation de l'outil de calcul des propriétés homogénéisées développé par Perré, **MorphoPore**, a permis d'assembler les données sur la morphologie et sur les propriétés microscopiques afin de prédire les propriétés macroscopiques d'un cerne annuel de croissance. Les maillages numériques représentant la structure de l'accroissement permettent de prendre en considération la morphologie du plan ligneux. Les propriétés microscopiques (propriétés élastiques et retrait) injectées dans les calculs pour chacun des constituants sont issues des campagnes de mesures effectuées précédemment. Les premières valeurs macroscopiques alors calculées sont cohérentes avec la littérature. En particulier, nous retrouvons les rapports d'anisotropie des modules d'élasticité ($E_R > E_T$) et des coefficients de retrait ($\alpha_T > \alpha_R$). Quelques exemples, réalisés sur des morphologies artificielles et réelles, ont montré les potentialités de l'outil :

- Une étude sur l'influence de la largeur du rayon ligneux a montré l'importance de son rôle de renfort mécanique dans la direction radiale.
- Des calculs, réalisés sur des structures artificielles, ont mis en évidence le rôle particulièrement important des plages de fibres tant sur les propriétés élastiques que sur celles du retrait.
- Sur ces mêmes images, nous avons pu montrer, qu'outre les proportions respectives des différents composants du plan ligneux, leur forme et leur agencement au sein du cerne annuel était un paramètre supplémentaire à prendre en considération pour une meilleure compréhension du comportement du matériau.
- Enfin, l'influence de la largeur de cerne a été étudiée. Dans un premier temps, dans un souci de contrôle de certains paramètres, nous avons travaillé sur des accroissements dont nous avons fait varier la taille artificiellement. Dans un second temps, nous avons comparé les calculs réalisés sur deux cernes successifs du même arbre et de largeur très différente, la morphologie, résultat de la variation de la vitesse de croissance, étant alors dictée par la Nature. Dans tous les cas, nous avons constaté une augmentation généralisée des propriétés élastiques et de retrait avec la largeur de cerne. Les évolutions, plus ou moins marquées suivant la direction considérée, dépendent alors fortement de la structure. Suivant les cas, le rapport d'anisotropie peut alors varier dans un sens ou dans l'autre.

Les travaux complémentaires et les études envisagés à court terme

- La validation expérimentale de cette approche est la prochaine étape à mener. Pour cela, il est prévu d'effectuer des mesures de propriétés macroscopiques sur des échantillons présentant des morphologies très différentes. Les résultats devront être comparés aux calculs qui seront réalisés sur ces mêmes éprouvettes. La cellule de base représentative du milieu ne devra plus être limitée à la description d'un seul cerne mais devra prendre en considération la morphologie de l'ensemble de l'échantillon.
- L'outil numérique a permis de déterminer les propriétés homogénéisées du cerne. Si les valeurs macroscopiques sont des paramètres importants, une autre possibilité qu'offrent les techniques d'homogénéisation est le calcul du champ de micro-contraintes au sein de la cellule de base. Cette nouvelle information doit permettre d'évaluer la sensibilité du bois à la fissuration, phénomène particulièrement problématique dans le cas du chêne. La position relative des plages de tissus les uns par rapport aux autres deviendra alors un paramètre primordial. Par exemple, ceci permettra d'étudier le rôle de la juxtaposition des rayons ligneux et des plages de fibres, deux éléments de fortes rigidités mais de propriétés de retrait contrastées.
- Jusqu'à présent, l'information quantitative qu'est le niveau de gris sur l'image n'a servi qu'à différencier les tissus les uns des autres. Dans le domaine des sciences du bois, la densité est un paramètre explicatif important de certaines propriétés. Il apparaît donc légitime de réaliser le passage à une cartographie de la densité. L'étude préliminaire, réalisée ici lors de la quantification de la résolution quantitative, nous permet d'espérer effectuer cette mesure de densité avec une bonne précision.

Les possibilités d'utilisation de l'outil mis en place

- Les possibilités d'applications des outils mis en place n'ont été évoquées qu'au travers de quelques exemples. Si l'influence de la largeur du rayon ligneux a été étudiée, le même type de travail est envisageable pour les autres tissus. Par exemple, à forme fixée, il est possible, par des outils d'analyse d'image, de faire varier les dimensions des vaisseaux, des plages de fibre... ; les calculs ensuite effectués reflétant la seule modification de la proportion du tissu considéré.

Par un jeu d'expériences similaires, il devient envisageable de mettre en évidence des caractères anatomiques prépondérants qui régissent le phénomène du retrait et les propriétés mécaniques ; et ainsi, de proposer des plans ligneux qui permettent de concilier vitesse de croissance et qualité du bois.

- La méthode appliquée au plan ligneux complexe du bois de chêne est adaptable à d'autres essences.

Projets envisageables à long terme

- Les essais mécaniques, comme les mesures de retrait, nous ont poussés à nous interroger sur les propriétés du rayon ligneux. L'angle des microfibrilles, évoqué comme paramètre explicatif, apparaît comme un sujet d'étude important. Sa caractérisation expérimentale nécessiterait cependant la mise en place de nouveaux moyens d'investigation spécifiques (diffraction X). L'acquis du laboratoire en rayons X permet d'envisager le développement d'un tel outil.
- Afin de répondre à un besoin de description plus précise ou pour permettre de prendre en considération la structure tridimensionnelle du bois, le principe de la tomographie par rayons X, qui nécessite un équipement très similaire à celui utilisé ici, est un moyen d'investigation qui pourrait également être envisagé.

Conclusion générale sur l'apport de l'approche déterministe et l'intérêt d'une collaboration interdisciplinaire

- Au terme de ce travail, il apparaît clairement que les approches déterministe et statistique peuvent trouver leur complémentarité. Les mesures réalisées sur un très grand nombre d'échantillons sont une source d'information importante. En effet, si elles permettent d'estimer le comportement moyen du bois en fonction de paramètres explicatifs choisis (approche statistique), elles mettent en évidence des comportements individuels particuliers. Il serait alors judicieux, par exemple, d'appliquer les outils que nous avons présentés dans ce travail sur ces échantillons singuliers afin d'étudier si la prise en considération de la morphologie permet d'expliquer les différences de propriétés mesurées.
- L'anatomie, à la charnière entre le processus biologique de production du bois et les propriétés du matériau, est une voie vers la compréhension du comportement du bois. Par l'approche développée ici, il est maintenant possible de distinguer l'influence de paramètres génétiques, comme le plan ligneux ou les propriétés microscopiques des tissus, de ceux dont dépend la croissance de l'arbre (station, sylviculture....) comme la largeur de cerne. Mais ce travail soulève de nombreuses interrogations sur l'élaboration du matériau telles que :

La vitesse de croissance n'influe-t-elle pas sur les propriétés microscopiques des différents tissus ? Quelle est ici l'influence de la station ? Quelles sont les conséquences d'une augmentation de la vitesse de croissance sur la morphologie du cerne ? Quels sont les paramètres contrôlés par la génétique ? Ceux dépendant de la sylviculture ?...

Les réponses à ces questions ne peuvent s'envisager sans une connaissance des processus biologiques d'élaboration du bois. Elles mèneront, n'en doutons pas, à des collaborations interdisciplinaires avec des spécialistes :

- du plan ligneux : anatomie
- de l'élaboration de la cellule : cytologie
- du déterminisme de l'élaboration du bois : génétique

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

B

Barkas W.W., 1941, Wood water relationships, VI. The influence of ray cells on the shrinkage of wood. *Trans. Faraday Soc.* 37, p535-547.

Bary-Lenger A., Nebout J. P., 1993, *Le chêne*. Ed. Perron.

Botosso P.C., 1997, Une méthode de mesure du retrait microscopique du bois. Application à la prédiction du retrait tangentiel d'éprouvettes de bois massif de sapin pectiné (*Abies alba* mill.). Thèse de Doctorat-Université de Nancy I.

Boutelje J., 1962a, On shrinkage and change in microscopic void volume during drying, as calculated from measurements on microtome cross sections of swedish pine. *Svensk papperstidning* 65, p209-215

Boutelje J., 1962b, The relationship of structure to transverse anisotropy in wood with reference to shrinkage and elasticity. *Holzforshung* 16, p33-46.

Boyd J.D., 1974, Anisotropic shrinkage of wood : identification of the dominant determinants. *Journal of the Japan wood research society* 20(10), p473-482.

Boyd J.D., 1977, Relationship between fiber morphology and shrinkage of wood. *Wood sciences and technology* (10), p3-22.

C

Cazaux J., Elhila H., Erre D., Mouze D., Patat J.M., Rondot S., Trebbia P., Zolfaghari A., 1994, Progress in X-ray projection microscopy. *Microscopy and analysis*. Vol. 29, p19-21.

Chang S.J., Olson J.R., Wang P.C., 1989, NMR imaging of internal features in wood. *Forest Product Journal*. 39(6), p43-49

Cocquerez J. P., Philipp S., 1998, *Analyse d'images : filtrage et segmentation*. Ed. Masson.

Coltman J. W., 1954, The specification of imaging properties by response to a sine wave input. *Journal of the Optical Society of America*. Vol. 44(6), p0468-471

Crimatec, 1992, *Scintillation detectors*. Ed. Saint Gobain

D

Davis J.R., Ilic J., Wells P., 1993, Moisture content in drying wood using direct scanning gamma ray densitometry. *Wood and Fiber Science*. 25(2), p153-162.

E

Eastman Kodak Company, 1969, *Radiography in modern industry*. Rochester, New York.

El Amri F., 1987 Contribution à la modélisation élastique anisotrope du matériau bois - feuillus et résineux, thèse INPL

Erickson, H, D, 1955, Tangential shrinkage of serial sections within annual rings of Douglas-fir and western red cedar. *Forest Product Journal* 5, p241-250.

Evans R., 1994, Rapid measurement of the transvers dimensions of tracheids in radialwood sections from *Pinus radiata*. *Holzforshung*. Vol. 48(2), p168-172.

Eyono Owoundi R., 1992, Modélisation de la rétractabilité du bois en relation avec des paramètres de la structure de l'accroissement annuel et de la position dans l'arbre chez *Quercus Robur L.* et *Q. Petraea Liebl.* Thèse de Doctorat-ENGREF.

F

Farruggia F., 1998, Détermination du comportement élastique d'un ensemble de fibres de bois à partir de son organisation cellulaire et d'essais mécaniques sous microscope, thèse ENGREF.

Farruggia F., Perré P., 1999, Microscopic tensile tests in the transverse plane of earlywood and latewood parts of spruce, à paraître dans *Wood Sciences and Technology*.

François H., Giraud S., Lefèvre L., Merlin A., 1997, La résonance magnétique nucléaire impulsionnelle basse résolution RMN IBR : quelques applications d'un analyseur automatique par RMN impulsionnelle. *Les Cahiers Scientifiques du Bois*. Ed. ARBOLOR. Vol 1, p3-16.

Futo L. P., 1978, Untersuchungen von Schwindungs und Quellunspänomenen im Trocknungsmikroskop. 1. Mitteilung : Konzeption und Funktionsweise des Trocknungsmikroskopes. *Holztechnologie* 19, p17-21.

Futo L. P., 1981, Untersuchungen von Schwindungs und Quellunspänomenen im Trocknungsmikroskop. 2. Mitteilung : Konstruktive Ergänzungen an dem Gerät. Der gegenseitige Einfluss des Früh und Spätholzes bei der Trocknung. *Holztechnologie* 22, p206-211.

G

Gibson L.J., Ashby M.F., 1988, *Cellular solids*, Pergamon Press.

Grenier D., 1999, Micro-imagerie RMN de milieux quasi-solides : exemple d'application à l'imagerie ostéoarticulaire. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I.

Guilley E., 1999, communication personnelle (données acquises dans le cadre de la convention ONF-INRA 1992-1996).

Guinier A. 1964, *Théorie et technique de la radiocristallographie*. Ed. Dunod.

Guitard D., 1987, *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadues Ed.

Guitard D., Fournier M., 1994, *Comportement mécanique du bois. Le bois matériau d'ingénierie*. Ed. ARBOLOR, p95-125.

H

Hahn E.L. 1950, Spin echoes, *Physical Review*. Vol.80(4), p580-594.

Hall L.D., Rajanayagam V., Stewart W.A., Steiner P.R., 1986, Magnetic resonance imaging of wood. *Can. J. Res.* 16(2), p423-426

Hamamatsu, 1996, FOS (Fiber Optic plate with Scintillator) for digital X-ray imaging. Technical information. Ed. Hamamatsu Photonics. Fev. 1996.

Handbook of Chemistry and Physics, 1996, 76th edition. C.R.C. Press.

Harrington J.J., Astley R.J., Booker, R.E., 1998, Modelling the elastic properties of softwood, Part I, The cell wall lamellae. *Holz als Roh -und Werkstoff*, 56(1), p43-50.

Harrington J.J., 1999, communication personnelle. Copyright University of Canterbury

Harris J.M., Meylan B.A., 1965, The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. *Holzforschung* 19(5), p144-153.

Hoag M., McKimmy M.D., 1988, Direct scanning x-ray densitometry of thin wood sections. *Forest Product Journal* 38(1), p23-26.

K

Kaftandjian V., Zhu Y. M., Peix G., Babot D., 1996a, Contrast transfert function measurement of X-ray solid state linear detector using bar/space pattern methods. *NDT&E International*. Vol. 29(1), p3-11.

Kaftandjian V., Zhu Y.M., Roziere G., Peix G., Babot D., 1996b, A comparison of the Ball, Wire, Edge, and Bar/Space Pattern Techniques for Modulation Transfert Function Measurements of Linear X-Ray Detector. *Journal of X-ray Science and Technology*. Vol.6, p205-221.

Kato H., Nakato K., 1968, The transverse anisotropic shrinkage of wood and its relation to the cell wall structure. The lignin distribution in the radial and tangential walls of coniferous wood tracheids. *Bulletin of the Kyoto University Forests* 40, p284-292.

Keller R. Thiercelin F., 1975, Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de hêtre. *Annales des Sciences Forestières* 32(2), p113-129.

Keller R., 1994, La constitution du bois. Le bois matériau d'ingénierie, *ARBOLOR*, p14-52.

Kelsey K.E., 1963, A critical review of the relationship between the shrinkage and the structure of wood. CSIRO, Division of the forest products, Technological paper n°28, p35.

Kollman F., Côté, W., 1968, Principles of wood sciences and technology Tome I. Solid wood. Springer-Verlag, p592.

Koponen S, Toratti T., Kanerva P., 1989, Modelling elastic an shrinkage properties of wood. *Wood Sciences and Technology* (23), p55-63.

Koponen S., Toratti T., Kanerva P, 1991, Modelling elastic and shrinkage properties of wood based on cell structure. *Wood sciences and Technology*. 25, p25-32.

L

Lahbabi R., 1995, Mesure par analyse d'image de paramètres microscopiques requis pour une prédiction déterministe des propriétés du bois, thèse de Doctorat ENGREF.

Lindgren O., 1992, Medical CT-Scanner for non destructive wood density and moisture content measurements. Doctorial Thesis. Lulea University.

M

Mariaux A., Masserann C., 1985, Anisotropie de retrait et structure du bois. Recherche de l'influence des caractères morphologiques transverses des fibres. Bois et Forêts des tropiques, n°209, p35-47.

McNay E.H., 1996, Design of a microtomography instrument for observing the evolution of material microstructure. Doctorial Thesis, Univesity of Michigan.

N

Nepveu G., 1994, Variabilité. Le bois matériau d'ingénierie. ARBOLOR, p127-182.

Niceno B., 1996, A Two-Dimensional Quality Mesh Generator.

<http://www.dinma.univ.trieste.it/~nirftc/research/easymesh/>

O

Olson J.R., Chang S.J., Wang P.C., 1990, Nuclear magnetic resonance imaging : a non-invasive analysis of moisture distributions in white oak lumber. Canadian Journal Forest Research. 20(5), p586-591

P

Perré P., Thiercelin F. 1997, Détermination du bois par détection directe de rayons-X : validation de la méthode. Cahiers Scientifiques du bois. Vol. 1, p149-158.

Perré P., 1998, The use of homogeneisation to simulate heat and mass transfert in wood : towards a double porosity approach. Keynote Lecture, Drying'98. Proceedings of the 11th International Drying Symposium. Vol. A, p57-72.

Peyrin F., Salome-Pateyron M., Laval-jeantet A.M., Gimenez G., Baruchel J., 1997, Microtomographie 3d par rayonnement synchrotron : application à l'étude de l'architecture osseuse. Bul. Soc. Fr. Phys., 109:4-6.

Polge H., 1966, Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur les arbres vivants. Applications dans les domaines technologique et physiologique. Extrait des Annales des Sciences Forestières. Tome XXIII - Fascicule 1.

Princeton Instruments, inc, 1997, High performance digital CCD cameras.

Q

Quirk, J.T., 1984, Shrinkage and related properties of Douglas-fir cell walls. Wood and Fiber Science 16(1), p115-133.

S

Saint André L., 1998, Modélisation tridimensionnelle des profils de largeur de cerne dans un billon d'Epicéa commun compte tenu de la mesure de son enveloppe externe et des caractéristiques dendrométriques usuelles de l'arbre d'origine. Thèse de Doctorat ENGREF.

Sanchez-Hubert J., Sanchez-Palencia E., 1992, Introduction aux méthodes asymptotiques et à l'homogénéisation. Masson, Paris.

Sano Y., Fukazawa K., 1990, Observation of moisture distribution in *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* Maxim. and *Kalopanax pictus* Nakai with soft X-ray photography. Res. Bull. of the College Experiment Forests. Vol. 47(2), p367-388.

Schniewind A. P., 1959, Transverse anisotropy of wood. A function of gross anatomic structure. Forest product journal. Vol. 9(10), p350-359.

Schweingruber, F. H., 1990, Anatomy of european woods. Haupt.

T

Thiercelin F., 1985, communication personnelle. Microphotographie d'une coupe microscopique de chêne paradoxal.

Tokuda M., 1994, Quantitative measurement by soft X-ray of crack formation in wood as a result of nailing I. Faculty of Bioresources. Mie University, Tsu 514. Vol 40(2), p119-126.

W

Wijesinghe L.C.A., 1959, The shrinkage of ray and fibers in wood. Forestry 32 (1), p31-38.

Z

Zhu Y. M., Babot D., Peix G., Goutte R., 1992, Nouvelle méthode de mesure de la FMT d'un système d'imagerie à barette. Revue Pratique de Contrôle Industriel. n°173.

Zhu Y. M. , Kaftandjian V., Peix G., Babot D., 1995, Modulation transfert function evaluation of linear solid-state x-ray sensitive detectors using edge techniques. Applied Optics. Vol. 34(22), p4937-4943.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LE RETRAIT DU BOIS

Définition des coefficients de retrait et de gonflement

LE RETRAIT DU BOIS

Définition des coefficients de retrait et de gonflement

L'eau dans le bois

Le bois, matériau fortement hygroscopique, peut contenir une grande quantité d'eau qui se décline en deux classes. Dans le bois, dit frais, la masse d'eau prédominante est appelée "eau libre". Il s'agit de l'eau contenue dans les lumens cellulaires, nécessaire au fonctionnement physiologique de l'arbre. Un autre type d'eau, contenue dans les parois cellulaires, est appelé eau "liée" ou "hygroscopique". Le taux d'humidité est défini comme la quantité d'eau totale (eau libre + eau liée) ramenée à la masse de matière sèche de la pièce de bois. C'est donc une grandeur adimensionnelle exprimée en pour-cent (de matière sèche). et qui peut être supérieur à 100.

$$H\% = \frac{m_{\text{eau}}}{m_0} = \frac{m_H - m_0}{m_0}$$

m_0 : masse anhydre

m_H : masse totale à l'humidité considérée

m_{eau} : masse totale d'eau contenue dans le bois (eau libre + liée)

Le taux d'humidité d'une pièce de bois s'équilibre en fonction des conditions (température et humidité relative) de l'air dans lequel elle est plongée. La détermination du point d'équilibre d'un échantillon se fait généralement à l'aide d'abaques obtenus expérimentalement et appelés "isothermes de sorption".

le retrait (ou gonflement)

Le retrait (ou gonflement) est le phénomène qui décrit les variations dimensionnelles qui s'opèrent lors d'un changement de teneur en eau. Il ne fait intervenir que l'eau située dans les parois cellulaires. Lors d'un séchage, le retrait ne s'exprime donc qu'à partir du moment où, l'eau libre ayant déjà été évacuée des lumens, l'eau liée commence à s'extraire des parois. Cette limite est appelée **Point de Saturation des Fibres (PSF)** ou plus justement Point de Saturation des Parois Cellulaires.

Le retrait est caractérisé en terme de déformation au sens mécanique du terme. Pour une direction x donnée, on écrit que le retrait, mesuré entre l'état saturé ($H > H_{PSF}$) et un point du domaine hygroscopique ($H < H_{PSF}$) vaut :

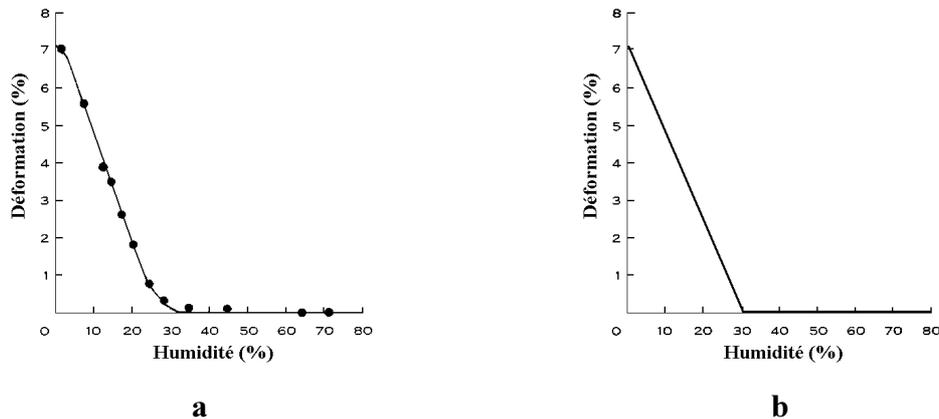
$$\varepsilon_{Rx}(H) = - \frac{l_H - l_S}{l_S}$$

$\varepsilon_{Rx}(H)$: déformation de retrait suivant la direction x entre l'état saturé et le taux d'humidité H

l_S : longueur " " à l'état saturé ($H > H_{PSF}$)

l_H : " " au taux d'humidité H ($H < H_{PSF}$)

Dans le domaine hygroscopique, les variations dimensionnelles (déformations) suivent sensiblement une loi linéaire fonction de la perte d'humidité de la pièce de bois. La figure ci-dessous montre les deux seules phases souvent considérées.



Courbe de retrait. La déformation s'exprime à partir de l'entrée de l'échantillon dans le domaine dit "hygroscopique". La courbe (a) représente un exemple de mesures expérimentales dans le plan transverse (d'après **Kelsey 1963**). La courbe (b) représente le modèle généralement utilisé : pas de déformation lorsque $H > H_{PSF}$ puis déformation linéaire avec la variation du taux d'humidité dans le domaine hygroscopique ($0 < H < H_{PSF}$)

On définit le coefficient de retrait linéaire suivant la direction x (α_{Rx}) comme la pente, supposée constante sur tout le domaine hygroscopique. Calculé entre les bornes extrêmes (états anhydre et saturé), il s'écrit :

$$\alpha_{Rx} = \frac{\varepsilon_{Rtot}}{H_{PSF}} = \left(\frac{l_S - l_0}{l_S} \right) \times \frac{1}{H_{PSF}}$$

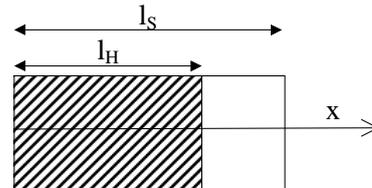
α_{Rx} : coefficient de retrait dans la direction x

ε_{tot} : déformation (retrait) totale entre l'état saturé et l'état anhydre

H_{PSF} : teneur en eau au point de saturation de fibre

L'hypothèse de linéarité permet aussi de calculer α_R entre l'état saturé et n'importe quel taux d'humidité H du domaine hygroscopique ($H < H_{PSF}$). On écrit donc :

$$\alpha_{Rx} = -\frac{\Delta \varepsilon_{Rx}}{\Delta H} = -\frac{\varepsilon_{Rx}(H) - \varepsilon_{Rx}(H_{PSF})}{H - H_{PSF}} = \left(\frac{l_S - l_x}{l_S} \right) \times \frac{1}{H_{PSF} - H}$$



$$\Leftrightarrow l_H = l_S (1 - \alpha_{Rx} (H_{PSF} - H))$$

Ce coefficient représente la déformation de retrait dans la direction x , d'un échantillon pour une variation d'humidité de 1%. Il est exprimé en pourcent de déformation par pourcent d'humidité (%/‰). L'anisotropie des propriétés de retrait est marquée par la relation d'ordre $\alpha_L \ll \alpha_R < \alpha_T$.

De la même manière, on définit le gonflement et ses coefficients à la différence près l'état anhydre remplace l'état saturé dans le rôle de la référence. Les déformations s'écrivent donc :

$$\varepsilon_G = \frac{l_x - l_0}{l_0}$$

Les coefficients de gonflements sont donc supérieurs à ceux de retrait et s'écrivent :

- entre les bornes extrêmes :

$$\alpha_{Gx} = \frac{\varepsilon_{Rtot}}{H_{PSF}} = \left(\frac{l_S - l_0}{l_0} \right) \times \frac{1}{H_{PSF}}$$

- entre $H=0$ et $H < H_{PSF}$

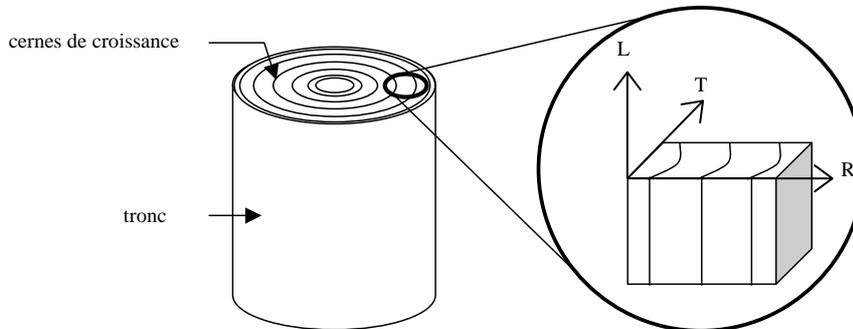
$$\alpha_{Gx} = \frac{\varepsilon_R}{H} = \left(\frac{l_H - l_0}{l_0} \right) \times \frac{1}{H} \quad (\text{définition utilisée dans le chapitre III})$$

Remarque : l'hypothèse de linéarité entre retrait et humidité se vérifie généralement aux alentours de la zone anhydre. Par contre, le passage progressif du domaine hygroscopique à celui de la saturation complète permet plus difficilement de considérer le coefficient α comme une constante.

ANNEXE 2 : COMPORTEMENT MECANIQUE DU BOIS

Comportement mécanique du bois (d'après [Guitard, 1987] et [Guitard et al, 1994])

Le tronc idéal est assimilé à un volume de matière supposée continue au sens du mécanicien admettant des symétries matérielles cylindriques.



On utilise les plans de symétrie matérielle définis par les trois directions :

- L : direction longitudinale des fibres
- R : direction radiale de croissance (perpendiculaire aux limites des accroissements annuels
- T : direction tangentielle aux accroissements annuels telle que RTL soit un trièdre orthonormé direct.

La loi de comportement s'écrit alors (loi de Hooke) :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{LL} \\ 2\varepsilon_{TL} \\ 2\varepsilon_{LR} \\ 2\varepsilon_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{LL} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{RT} \end{pmatrix}$$

avec les 3 conditions :

$$\frac{E_R}{\nu_{RT}} = \frac{E_T}{\nu_{TR}} \quad \frac{E_T}{\nu_{TL}} = \frac{E_L}{\nu_{LT}} \quad \frac{E_R}{\nu_{RL}} = \frac{E_L}{\nu_{LR}}$$

ε : tenseur des déformations
 σ : tenseur des contraintes
 E : module d'Young
 ν : coefficient de Poisson
 G : module de cisaillement

Afin d'illustrer le caractère fortement anisotropique du matériau bois, le lecteur retiendra les ordres de grandeurs respectifs des modules d'Young suivant les 3 directions :

$$E_R \approx 1800 \text{ MPa}$$

$$E_T \approx 1000 \text{ MPa}$$

$$E_L \approx 14\,000 \text{ MPa}$$

Comportement lors de la variation de la teneur en eau.

Dans le domaine hygroscopique ($H < H_{PSF}$), les variations ΔH de taux d'humidité contenue dans le bois s'accompagnent de variations dimensionnelles. Sous la condition de pouvoir s'exprimer librement, ces déformations, linéarisées, sont proportionnelles à ΔH :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{LL} \end{pmatrix} = \Delta H \begin{pmatrix} \alpha_R & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L \end{pmatrix}$$

α : coefficient de retrait (ou de gonflement suivant la définition utilisée)

Ces coefficients suivent une relation d'ordre $\alpha_T > \alpha_R \gg \alpha_L$ assez similaire à celle des modules d'Young. Pour le chêne, le lecteur pourra retenir les ordres de grandeurs moyens (en %/%) :

$$\alpha_R \approx 0,0018$$

$$\alpha_T \approx 0,0038$$

$$\alpha_L \approx 0,0001$$

Détermination des propriétés élastiques et du retrait d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse : description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calculs d'homogénéisation

Issu de l'activité biologique de l'arbre, le bois est un matériau composite aux propriétés fortement variables ; caractéristique importante qui limite son utilisation. Le travail de cette thèse se situe dans le cadre d'une approche déterministe visant à comprendre la variabilité observée sur les propriétés mécaniques et de retrait du bois de chêne en fonction de l'organisation de sa structure et des propriétés microscopiques de ses composantes (rayons ligneux, fibre...). Réalisée à l'échelle de l'accroissement annuel, cette approche requiert deux grands types de données qui ont nécessité la mise en place d'une chaîne d'outils spécifiques :

✓ **la morphologie** qui définit les éléments structuraux (rayons ligneux, fibres...) et leur distribution spatiale au sein du volume représentatif du matériau. Cette description est obtenue grâce au développement d'un dispositif d'imagerie numérique basé sur le principe de l'atténuation d'un rayonnement X.

✓ **les propriétés microscopiques** des principaux éléments constitutifs du plan ligneux du chêne. Dans le cadre de cette étude, où les propriétés mécaniques et de retrait sont au centre de nos préoccupations, deux types d'échantillons microscopiques (quelques centaines de micromètres) sont préparés au sein de chacun des constituants :

- les premiers sont sollicités en traction grâce à une machine d'essai placée sous un microscope. La comparaison d'images de la structure à différents niveaux de stress permet d'accéder à des **propriétés élastiques** (modules d'Young, coefficients de Poisson) pour chacun des tissus considérés.

- les seconds sont disposés dans une chambre climatique placée au sein du dispositif d'imagerie X précédemment développé. La comparaison d'images réalisées à différents états hydriques permet, sans contact, d'accéder **aux coefficients de gonflement** des éprouvettes, simultanément dans deux directions.

Enfin l'utilisation d'un **outil numérique d'homogénéisation**, MorphoPore, permet d'assembler ces connaissances afin de calculer les **propriétés macroscopiques d'accroissements annuels**. Les images de la morphologie issues du banc d'imagerie X sont alors la base d'un maillage numérique ; les propriétés microscopiques des différents tissus qui y sont injectées étant issues essentiellement des mesures expérimentales.

Les potentialités de l'outil sont présentées au travers de quelques cas. En particulier, cette approche permet de distinguer les influences de paramètres génétiques tel que le plan ligneux, de ceux liés à la croissance de l'arbre tels que la sylviculture ou la station. A titre d'exemple, nous citerons la quantification de l'influence de la vitesse de croissance d'un arbre sur les propriétés mécaniques et de retrait du bois.

Determination of elastic and shrinkage properties of an annual ring of oak in transverse plan : description of the morphology, measurements of microscopic properties and homogenisation calculations

Because of its biologic origin, wood is a very variable composite. The aim of this work is the understanding of the variability of mechanical and shrinkage properties of oak by a deterministic approach that takes into account the spatial distribution of the components and their intrinsic properties. Realized **at the annual ring scale**, this approach requires two kinds of data and needs the development of specific tools :

✓ **The morphology** specifies the components (ray cells, fiber...) and describes their spatial distribution inside the representative volume (the annual ring) of the material. A numerical imaging device, using X-ray attenuation principle, has been developed in order to perform images of the structure.

✓ **The microscopic properties** of the main components. Within the context of this work, we are interested by mechanical and shrinkage properties. So, two types of microscopic samples are prepared within each component :

- On the one hand, micro tensile tests under microscope are performed. The comparison of images at different stress levels permits to obtain **elastic properties** (Young modulus and Poisson's ratio) for each kind of tissue.

- On the other hand, other samples are placed in a specific climatic chamber which is installed inside the previous X-ray imaging device. Images are performed at different humidity rates. A specific process permits to compare them and calculates the **swelling coefficients** of the sample simultaneously in two directions.

Finally, the use of a **numerical tool**, MorphoPore, permits to connect all these data in order to calculate the **macroscopic properties of annual rings**. A numerical mesh is built from the image provided by the X-ray device and the measured microscopic properties are injected in the calculation.

The possibilities of this tool are presented with few examples Especially, this approach permits to separate the influences of genetic parameters, as the specific structural characteristics, and of growth parameters as sylviculture or station. For example, we propose to quantify the influence of growth speed of a tree on mechanical and shrinkage properties of its wood.