



HAL
open science

Mesures de champs pour la caractérisation d'hétérogénéités dans le matériau bois

Djily Dang

► **To cite this version:**

Djily Dang. Mesures de champs pour la caractérisation d'hétérogénéités dans le matériau bois. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français. NNT : 2016CLF22747 . tel-01469689

HAL Id: tel-01469689

<https://theses.hal.science/tel-01469689>

Submitted on 16 Feb 2017

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.

N° d'ordre : D. U 2747

E D S P I C : 774

UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Thèse

Présentée par

Djily Dang

(Ingénieur en Génie Civil de Polytech'Clermont-Ferrand)

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE

SPECIALITE : GÉNIE CIVIL

Titre de la thèse :

**Mesures de champs pour la caractérisation
d'hétérogénéités dans le matériau bois**

Soutenue publiquement le 04/11/2016 devant le jury composé de :

M. Rémy Marchal, Directeur de recherche au CIRAD, Président	Examineur
M. Georges Jeronimidis, Professeur Emérite, Université de Reading (UK)	Rapporteur
M. Ion Octavian Pop, MCF-HDR, Université de Limoges	Rapporteur
M. Rostand Moutou Pitti, MCF-HDR, UBP	Co-Encadrant
Mme. Evelyne Toussaint, Professeure, UBP	Directrice
M. Michel Grédiac, Professeur, UBP	Co-Directeur
M. Joël GARMY, Délégué Général, Auvergne Promobois	Membre invité

Résumé

Le bois est en général étudié comme un matériau orthotrope et homogène, mais en réalité il existe des gradients de propriétés mécaniques et physiques dans chaque direction. En effet, le bois est constitué d'une alternance de cernes annuels de croissance constitués de bois d'été, de printemps et de transition. Ces cernes sont plus réguliers dans la plupart des résineux que dans les feuillus. Dans le présent document, on s'intéresse à l'étude et à l'identification des propriétés de diffusion hydrique d'un résineux à l'échelle du cerne, le sapin blanc du Massif Central. Une telle étude nécessite l'utilisation d'une technique de mesure de champ sans contact, ici la méthode de la grille. Cette dernière offre la possibilité d'observer l'hétérogénéité du bois à l'échelle du cerne avec des champs de déformations. Elle permet donc d'obtenir la réponse sous sollicitations hydriques des bois d'été et de printemps. Cette technique de mesure est couplée à une méthode d'identification inverse des paramètres de comportement hydrique que nous avons mise en place. Elle permet d'obtenir les coefficients de diffusion des bois d'été et de printemps dans la direction tangentielle de diffusion, ainsi que leurs coefficients d'expansion hydrique dans la direction radiale à partir des cartes de déformations obtenues par la méthode de la grille. La méthode de la grille est également utilisée pour l'étude du comportement du bois sous environnement constant ou variable, et sous contrainte mécanique de compression radiale. Des méthodes d'identification sont également proposées afin de déterminer les propriétés mécaniques selon la direction radiale du bois à l'échelle du cerne, ceci à partir des cartes de déformation.

Mots clés : *bois d'été, bois de printemps, diffusion hydrique, identification inverse, méthode de la grille, propriétés hydriques, propriétés mécaniques.*

Abstract

Wood is generally studied as an orthotropic and homogeneous material, but in reality there are gradients of mechanical and physical properties in each direction. Indeed, wood consists of summer and spring woods which manifest annual growth rings. These latter are more regular in most of softwoods than in hardwoods. In this paper, we are interested in studying and identifying the properties of a resinous under water diffusion, namely the white fir of the Massif Central. This study requires the use of a contactless full-field measurement technique. The grid method is used here. This latter offers the opportunity to observe the heterogeneity of wood at the ring scale through the strain fields. It thus provides the response of latewood and earlywood under water stress. This measurement technique is coupled with an inverse method to identify the water behavior parameters. This inverse method provides latewood and earlywood diffusion coefficients along the tangential diffusion direction, as well as their coefficients of expansion in the radial direction from the strain maps. The grid method is also used to study the behavior of wood under constant or variable environment when it is subjected to radial compression. Some identification methods are also proposed to determine from the deformation maps the mechanical properties along the radial direction of wood at the ring scale.

Keywords : *earlywood, grid method, hydric properties, inverse identification, latewood, mechanical properties, water diffusion.*

Remerciements

Mes remerciements s'adressent d'abord à mes deux directeurs de thèse à savoir Madame Evelyne Toussaint et Monsieur Michel Grédiac. Mon immense gratitude pour les 3 ans pendant lesquelles ils m'ont apporté leur soutien et assistance tout en me laissant une large plage d'autonomie.

Une particulière averse de remerciements à Monsieur Rostand Moutou Pitti pour tous les échanges très riches qu'on a eus pendant les 3 ans de thèse. Je le suis également reconnaissant pour les conseils relatifs à la vie de manière générale.

Je remercie Monsieur Georges Jeronimidis et Monsieur Ion Octavian Pop d'avoir accepté de porter un regard critique sur mes travaux de recherche en étant rapporteurs de ceux-ci. Je leur adresse également mon immense gratitude pour leur présence à ma soutenance de thèse.

Je tiens à remercier également Monsieur Rémy Marchal qui a accepté d'être examinateur de mes travaux de recherche. Je le suis très reconnaissant d'avoir été présent lors de la soutenance et d'avoir présidé le jury.

Mes remerciements sont maintenant destinés à l'ensemble du personnel de l'Université Blaise Pascal en général et ceux de l'Institut Pascal en particulier.

Je dédie une mention spécial à tous mes collègues et amis qui ont été un maillon incontournable pour le bon déroulement de cette thèse. Je leur remercie pour tous moments conviviaux partagés dans nos bureaux et en dehors de ceux-ci.

Je ne saurais clore ces remerciements sans mentionner ma famille. Ce travail est dédié à toute ma famille. Elle a toujours été là pour moi durant toutes mes études afin de me procurer un moral robuste et une assistance sans réserve.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Remerciements	iii
Table des matières	iv
Table des figures	viii
List of Figures	xii
Liste des tableaux	xiii
List of Tables	xiii
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Structure et comportement thermo-hydro-mécanique du bois	4
Introduction	5
1 Hétérogénéités dans le bois à différentes échelles	5
1.1 Architecture du bois	5
1.2 Échelle macroscopique	7
1.3 Échelle mésoscopique	8
1.4 Échelle microscopique	9
1.5 Organisation et composition chimique de la paroi cellulaire . .	10
1.6 Autres formes d'hétérogénéités	13
2 Problématique de l'eau dans le bois	15

2.1	Partition de l'eau dans le bois	15
2.2	Comportement hygroscopique du bois	16
2.3	Étude de la diffusion hydrique en dessous du PSF	21
3	Étude du bois sous contrainte en environnement constant ou variable	28
3.1	Comportement viscoélastique du bois	28
3.2	Mise en évidence de la déformation mécanosorptive	30
	Conclusion	34
Chapitre 2 : Mesures de champs et identification inverse		37
	Intoduction	38
1	Méthodes de mesures de champs (2D) appliquées au bois	38
1.1	Corrélation d'images	38
1.2	Imagerie neutronique	41
1.3	Imagerie par rayons X	44
1.4	Méthode de la grille	49
2	Identification inverse	55
2.1	Problème direct/problème inverse	55
2.2	Quelques méthodes d'identification inverse	55
2.3	Applications des méthodes d'identification inverse pour la caractérisation du bois	57
	Conclusion	58
Chapitre 3 : Étude du bois sous sollicitations hydriques par la méthode de la grille		61
	Intoduction	62
1	Dispositif expérimental	62
1.1	Contraintes	62
1.2	Dispositif mis en place	63
2	Essais préliminaires sur le Pin des Landes (Pinus Pinaster)	64
3	Choix des conditions limites	67
4	Principes de découpe des éprouvettes de Sapin Blanc du Massif Central	70
5	Essais d'adsorption et de désorption sur le Sapin Blanc	71
5.1	Cartes de déformation radiale	72
5.2	Cartes de déformation longitudinale	75
5.3	Profils de déformation radiale selon la direction RR	76

6	Extraction des déformations à l'échelle du cerne	78
6.1	Construction des masques	79
6.2	Déformations radiales moyennes à l'échelle du cerne	80
7	Observation au microscope électronique à balayage	83
7.1	Éprouvettes	83
7.2	Préparation des éprouvettes au microtome	83
7.3	Principe de l'observation au MEB	84
7.4	Résultats obtenus et discussion	84
	Conclusion	85

Chapitre 4 : Identification à l'échelle du cerne des propriétés hydriques

	du bois	86
	Intoduction	87
1	Formulation du problème	87
1.1	Problème posé et hypothèses	87
1.2	Résolution numérique de la loi de Fick	88
1.3	Inconnues du problème	90
2	Identification inverse	90
2.1	Bases de la méthode	90
2.2	Fonctions coût	92
2.3	Algorithme de résolution	93
3	Validation numérique	96
3.1	Données simulées	96
3.2	Identification sur données simulées	104
4	Applications aux données expérimentales	106
	Conclusion	110

Chapitre 5 : Étude du bois en séchage sous contrainte à l'échelle du cerne par la méthode de la grille

	112	
	Intoduction	113
1	Conditions expérimentales	113
1.1	Contraintes expérimentales	113
1.2	Approches expérimentales et conditionnement des éprouvettes	114
1.3	Éprouvettes testées	116
1.4	Dispositif expérimental	119

2	Résultats expérimentaux	122
2.1	Conditions hygrothermiques	122
2.2	Cartes de déformation radiale en fluage/recouvrance sous sé- chage	124
2.3	Investigation de la déformation à l'échelle du cerne	142
2.4	Mise en évidence des effets de l'histoire hydromécanique à l'échelle du cerne	143
3	Identification inverse et partition de la déformation totale	146
3.1	Identification des paramètres mécaniques initiaux	146
3.2	Identification des paramètres en environnement variable	153
	Conclusion	157
	Conclusions générales et perspectives	158
	Bibliographie	164
	Annexes	175

Table des figures

1.1	organisation multi-échelles du bois (adapté de Harrington (1998)) . . .	6
1.2	axes matériels du bois (Ormarsson et al. (1998))	7
1.3	coupe transversale d'un tronc (schéma issu de Simon (2009))	8
1.4	cernes du Sapin Blanc du Massif Central	9
1.5	observation microscopique à l'échelle du tissu (cité dans Montero (2010))	10
1.6	ultrastructure de la paroi cellulaire d'après Harrington 1999 (dans Badel (1999))	11
1.7	distribution des composants chimiques à l'échelle de la paroi cellulaire, d'après Panshin et al., 1970 (dans Bytebier (2009))	12
1.8	organisation de la structure des microfibrilles (Ruelle (2006))	13
1.9	relation entre branche et tronc, origine des nœuds (annoté de Thibaut et al. (2001))	14
1.10	teneur en eau théorique des constituants du bois pour une humidité du bois de 15 % à 25 ° C	16
1.11	différentes phases du séchage libre du bois (Merakeb (2006))	17
1.12	retrait libre à partir de l'état saturé du bois	18
1.13	manifestation de contraintes transversales lors du séchage du bois (Moutee (2006))	18
1.14	différents types de déformation dus au séchage (Ormarsson et al. (1998))	19
1.15	déformations du bois varient selon l'endroit de la grume dont elles proviennent (Natterer (2004))	19
1.16	isotherme de sorption (CSTB (2009))	20
1.17	adsorption : a)- de 54 % à 75 %, a)-de 75 % à 84 % (Wadsö (1993)) .	22
1.18	volume élémentaire	23

1.19	représentation schématique de la balance à suspension magnétique, 1)-éprouvette, 2)-mesure de la charge de découplage, 3)-capteur, 4)-capteur, 5)-aimant permanent, 6)-chambre de couplage, 7)-electro-aimant (Perré et al. (2007))	26
1.20	exemple de profil microdensitométrie obtenu sur un bois adulte de douglas (dans Merakeb (2006))	27
1.21	fluage-recouvrance à sec, a)-OA phase élastique, b)-AB phase de fluage, c)-BC retour élastique, d)-recouvrance (Gril (1988))	28
1.22	effet du niveau du chargement sur le fluage-recouvrance en traction à humidité constante (adapté de Pittet (1996))	29
1.23	effet du niveau du niveau d'humidité relative sur le fluage-recouvrance en traction (adapté de Pittet (1996))	30
1.24	Effet de l'humidité sur le module d'Young tangentiel E_T (Goulet et Ouellet (1968) dans Moutee (2006))	31
1.25	mise en évidence de la mécanosorption (d'après Gril (1988))	32
1.26	exemple de trajectoire mécanosorptive (Hunt (1984))	33
1.27	étude du blocage de déformation en séchage, a)-contrainte cyclique, b)-cycles d'humidité relative, c)-déformation hygroverrou (Saifouni (2014))	34
1.28	comparaison de ε_{HL} issue d'un modèle analytique et de résultats expérimentaux (Saifouni (2014))	35
2.1	zones d'investigation sur une image de référence et sur une image déformée (Hild (2004))	39
2.2	différentes étapes d'un algorithme classique de corrélation (Hild (2004))	40
2.3	résultats expérimentaux (coupe dorsale), a)-cartes de déformations, b)-coupes horizontales au milieu de l'éprouvette (HR : 75-90 %, à 20°C), (adapté de Gauvin et al. (2014))	42
2.4	résultats expérimentaux (coupe sur quartier), a)-cartes de déformations, b)-coupes verticales au milieu de l'éprouvette (HR : 75-90 %, à 20 °C), (adapté de Gauvin et al. (2014))	43
2.5	résultats expérimentaux avec la <i>CIN</i> , a)-scan de la face investiguée, b)-cartes de déformations, (HR=95 %), (adapté de Sanabria et al. (2015))	44
2.6	cartes de déformation en adsorption obtenues avec l' <i>ANRC</i> (HR=95 %), (Sanabria et al. (2015))	45

2.7	cèdre du Japon, éprouvette (L,R) sous séchage, a)-images par rayons X, b)-coupes suivant les deux directions, (Tanaka et al. (2009))	46
2.8	cèdre du Japon, éprouvette (L,T) sous séchage, a)-images par rayons X, b)-coupes suivant les deux directions, (Tanaka et al. (2009))	47
2.9	cèdre du Japon, éprouvette (R,T) sous séchage, a)-images par rayons X, b)-coupes suivant les deux directions, (Tanaka et al. (2009))	48
2.10	exemple de grille croisée,(Badulescu (2010))	49
2.11	exemple de cartes de déformation obtenues en flexion 3 points d'un bicouche (pin+ayous), (Viguié (2012))	53
2.12	exemple de carte de déformation sur un enrobé bitumineux (axes en pixels, 1 pixel=40 μm), (Grédiac & Toussaint (2013))	54
2.13	principe de la méthode inverse de type recalage de modèle éléments finis ($FEMU - U - F$), (Pottier (2010))	57
2.14	algorithme d'identification proposé par Nguyen (2014)	59
2.15	évolution de la teneur en eau en fonction du type de condition aux limites, comparaison aux points expérimentaux (Nguyen (2014))	59
3.1	dispositif expérimental	64
3.2	transfert d'une grille sur un éprouvette de pin des Landes : (a)-tcan de la face avant transfert (b)- vue après transfert	65
3.3	pin des Landes : (a) - scan de la face investiguée (b) - ε_{RR} après 12 heures d'exposition (c) - ε_{RR} après 177 heures d'exposition.	65
3.4	pin des Landes, ε_{RR} aux instants : $t_1=177$ heures (carte $N^\circ 21$); $t_2=200$ heures (carte $N^\circ 22$); $t_3=600$ heures (carte $N^\circ 24$)	66
3.5	scan de la face en contact avec la grille	67
3.6	déformations : 1 ^{ère} humidification, bords libres	68
3.7	déformations : 2 ^{ème} humidification, bords étanches	68
3.8	déformations : 3 ^{ème} humidification, bords libres	68
3.9	zones de découpe des éprouvettes	70
3.10	processus de découpe des éprouvettes	71
3.11	scans : (a)-éprouvette A (b)-éprouvette B	71
3.12	éprouvette A : cartes de déformation radiale	73
3.13	éprouvette B : cartes de déformation radiale	74
3.14	éprouvette A : cartes de déformation longitudinale	75
3.15	éprouvette B : cartes de déformation longitudinale	76
3.16	éprouvette A : positions des trois plans de coupe	77

3.17	épreuvette A : coupe radiale à 610 pixels selon la direction LL	77
3.18	épreuvette A : coupe radiale à 407 pixels selon la direction LL	78
3.19	épreuvette A : coupe radiale à 305 pixels selon la direction LL	78
3.20	épreuvette A : évolution de la déformation radiale moyenne à l'échelle du cerne	81
3.21	épreuvette A : évolution du taux de déformation hydrique radiale	82
3.22	épreuvettes observées au MEB.	83
3.23	résultats obtenus au MEB	85
4.1	schématisation du problème d'adsorption étudié	88
4.2	algorithme d'identification des propriétés hydriques du bois	95
4.3	résultats numériques avec les données du tableau 4.1	97
4.4	profils de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $0 \leq t \leq t_f$	98
4.5	profils de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $t = t_f$	99
4.6	évolution de la teneur en eau au bord $x = l$	99
4.7	profils de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $0 \leq t \leq t_f$ pour chaque PSF	100
4.8	comparaison des profils au sein de l'épaisseur pour $0 \leq t \leq t_f$	101
4.9	effet du PSF sur le profil de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $t = t_f$	102
4.10	effet du PSF sur l'évolution de la teneur en eau au bord $x = l$	103
4.11	accroissement de $w(l, t_f)$ pour chaque valeur du PSF	103
4.12	résultats de validation : a)-paramètres identifiés, b)-valeur de la fonc- tion coût à chaque itération, c)-nombre total d'évaluations de la fonction coût à chaque itération, d)-évolution du "first order of optimality"	105
4.13	effets du masque sur l'amplitude, épreuvette A	107
4.14	effets du masque sur l'amplitude, épreuvette B	107
4.15	influence du PSF sur les paramètres identifiés, épreuvette A , cas 1.	110
5.1	scan d'une face sur le plan (L, R) de l'épreuvette de validation du dispositif de conservation	116
5.2	épreuvette testée lors de la première expérimentation (Ep1)	118
5.3	épreuvette testée lors de la deuxième expérimentation (Ep2)	118
5.4	épreuvette testée lors de la troisième expérimentation (Ep3)	119
5.5	dispositif expérimental	120
5.6	cycles de chargement/déchargement	121

5.7	cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 (Ep1)	125
5.8	cartes de déformation radiale, fluage dernier cycle (Ep1)	125
5.9	cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 (Ep2)	127
5.10	cartes de déformation radiale, fluage dernier cycle (Ep2)	128
5.11	déroulement (Ep3)	129
5.12	cartes de déformation radiale, séchage libre (Ep3)	130
5.13	déformation radiale moyenne, séchage libre (Ep3)	131
5.14	pertes de masse durant l'expérimentation 3 (Ep3), a)-teneur en eau totale, b)-taux de pertes de masse	133
5.15	cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 (Ep3)	134
5.16	cartes de déformation radiale, recouvrance cycle 1 (Ep3)	135
5.17	cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 sans histoire (Ep3) . . .	138
5.18	cartes de déformation radiale, fluage cycle 2 (Ep3)	139
5.19	cartes de déformation radiale, fluage cycle 2 sans histoire (Ep3) . . .	140
5.20	cartes de déformation radiale, recouvrance cycle 2 (Ep3)	141
5.21	zone d'intérêt, cycle 1 (Ep3)	143
5.22	déformation radiale moyenne, fluage/recouvrance avec histoire (Ep3)	144
5.23	déformation radiale moyenne de EW, effet de l'histoire hydroméca- nique en fluage sous séchage (Ep3)	144
5.24	déformation radiale moyenne de LW, effet de l'histoire hydroméca- nique en fluage sous séchage (Ep3)	145
5.25	modèle de Burgers	147
5.26	algorithme d'identification des paramètres initiaux (teneur en eau constante, compression radiale)	150
5.27	comparaison courbes expérimentales et issues du modèle de Burgers (à teneur en eau initiale $w=12\%$), (a) : EW, (b) : LW, (c) : Sample .	151
5.28	partition de la déformation totale (à teneur en eau initiale $w=12\%$), , (a) : EW, (b) : LW, (c) : Sample	152
5.29	algorithme d'identification des paramètres en environnement variable (compression radiale)	155

Liste des tableaux

2.1	données et inconnues des problèmes direct et inverse, (Grédiac (2004))	55
4.1	paramètres de base	96
4.2	paramètres utilisés pour les masques de l'éprouvette <i>A</i> .	106
4.3	paramètres utilisés pour les masques de l'éprouvette <i>B</i> .	106
4.4	résultats obtenus pour l'éprouvette <i>A</i> ($PSF=30\%$).	108
4.5	résultats obtenus pour l'éprouvette <i>B</i> ($PSF=30\%$).	108
4.6	étude de l'influence du PSF sur les paramètres identifiés, éprouvette <i>A</i> .	110
5.1	résultats de validation du dispositif de conservation	117
5.2	masses initiales avec et sans grille	119
5.3	teneur en eau après immersion et avant chargement mécanique	123
5.4	conditions hygrothermiques ambiantes	123
5.5	pertes de masse durant l'expérimentation 3 (Ep3), a)-fluage, b)-recouvrance	132
5.6	paramètres identifiés (à teneur en eau initiale $w=12\%$)	148
5.7	paramètres identifiés en environnement variable (phase de fluage cycle 1, expérimentation 3)	156

Introduction Générale

Comme l'a montré la récente conférence COP 21, la régulation des problèmes environnementaux est un enjeu majeur. Cet enjeu implique fortement la communauté scientifique qui cherche à trouver des solutions pérennes à ces problèmes. L'utilisation de matériaux écologiques est entre autres l'une des idées directrices. Le bois étant 100 % naturel puisque c'est un matériau biologique produit par les arbres au niveau des racines, du tronc et des branches (Almeida et al. (2008), Moutou Pitti (2012)), il est 100 % recyclable. De plus, en dehors de son caractère naturel et recyclable, le bilan carbone du bois montre que c'est un matériau qui a un impact négatif négligeable sur l'environnement. Il faut ajouter que l'arbre sur pied d'où provient le bois est capable de fixer certains gaz à effet de serre comme le CO_2 alors qu'à l'heure actuelle l'Homme, à travers ses activités, en émet quotidiennement en quantité importante. Toutes ces raisons devraient pousser à utiliser ce matériau phare pouvant apporter des changements radicaux dans le développement durable et la protection de l'environnement. De plus, le matériau bois est parfaitement en phase avec les aspirations architecturales actuelles.

Cependant, la variabilité des propriétés au sein de ce matériau hétérogène ainsi que son comportement fortement complexe constituent un véritable verrou scientifique sur lequel se penchent de nombreux chercheurs. De plus, l'utilisation du bois en tant que matériau de construction peut être remise en question par la durée de vie des structures bois, et donc leur maintenance à long et à court termes. Le degré d'hétérogénéité du bois peut être apprécié à différentes échelles (Almeida et al. (2008)). La composition chimique du bois révèle qu'il est constitué principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les proportions de ces différents composants à l'échelle de la paroi cellulaire varient d'une couche à l'autre. La nature chimique et l'organisation architecturale des éléments entrant dans la composition chimique du bois lui confèrent un comportement viscoélastique (Moutou Pitti (2012)). Il est important de préciser que chacun des composants chimiques du bois a un certain

degré d'hygroscopie, ce qui fait de lui un matériau très sensible aux variations de la teneur en eau en dessous du point de saturation des fibres (*PSF*, 25 à 30 %). Il se trouve que l'action de l'humidité sur le bois peut amoindrir sa résistance mécanique et induire des déformations supplémentaires renforcées par les effets viscoélastiques et mécanosorptifs (Rémond et al. (2007), Saifouni (2014)). Quand on s'intéresse au bois du point de vue macroscopique, on s'aperçoit sur une coupe transversale du tronc d'arbres de zones tempérées qu'il est constitué d'une alternance de zones à texture (généralement très distinctes dans la plupart des essences) correspondant aux cernes de croissance annuels. Chaque cerne de croissance est constitué de bois d'été (latewood en anglais (*LW*)) et de bois de printemps (earlywood en anglais (*EW*)). Ces derniers ont entre autres des réponses sous sollicitations hydriques et mécaniques très différentes alors que le bois est en général étudié comme un matériau orthotrope et homogène dans chaque direction.

Dans le domaine de la mécanique expérimentale, les techniques de mesures de champs sans contact (Grédiac & Hild (2011)) sont largement utilisées pour étudier les matériaux à gradients de propriétés comme le bois. L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement du bois sous sollicitations hydrique (eau) et/ou mécanique en utilisant une technique de mesure de champs sans contact. Ce travail s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre est axé sur une synthèse d'éléments bibliographiques relatifs au matériau bois. Dans ce chapitre, on procédera dans un premier temps, à une présentation du bois comme un matériau à degré d'hétérogénéité multi-échelle. Ensuite la problématique de l'eau dans le bois est abordée. Enfin les comportements viscoélastique et mécanosorptif du bois sont discutés.

Le deuxième chapitre concerne les techniques de mesures de champs sans contact en mécanique expérimentale et leur application aux matériaux à gradients de propriétés comme le bois. On abordera également dans ce chapitre, les méthodes d'identification inverse.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude du bois sous sollicitations hydriques avec une technique de mesures de champs sans contact. Les moyens matériels et les matériaux utilisés sont présentés. Les résultats expérimentaux obtenus en termes de cartes de déformation hydrique sont ensuite présentés et discutés. L'investigation du comportement du bois à l'échelle du cerne annuel de croissance est effectuée.

Le quatrième chapitre présente une démarche utilisée afin de proposer une méthode d'identification inverse des propriétés hydriques du bois à l'échelle du cerne.

La méthode développée est appliquée aux déformations expérimentales obtenues au chapitre trois.

Le cinquième et dernier chapitre de ce mémoire expose l'étude du comportement du bois en séchage naturel sous sollicitation mécanique. On cherche à caractériser les comportements viscoélastique et mécanosorptif du bois à l'échelle du cerne. Les moyens matériels et matériaux utilisés sont présentés. Les résultats expérimentaux issus des expérimentations réalisées dans de telles conditions sont ensuite présentés et discutés. Des méthodes d'identification inverse des paramètres mécaniques à l'échelle du cerne sont également proposées.

Chapitre 1 : Structure et comportement thermo-hydro-mécanique du bois

Introduction

Dans ce chapitre, les hétérogénéités du bois de l'échelle macroscopique à l'échelle de la cellule sont abordées. Ce premier point permet de mettre en exergue l'architecture, l'organisation, l'ultrastructure ainsi que la composition chimique du bois afin de mieux appréhender la réponse macroscopique de ce matériau sous sollicitations hydriques et/ou mécaniques. La problématique de l'eau dans le bois est également présentée. On cherche à comprendre son interaction avec ce matériau ainsi que ses modes de transport. L'accent est également porté sur le caractère néfaste des variations hydriques sur le bois en dessous du *PSF*. Le bois sous sollicitations mécaniques en interaction avec son environnement est aussi discuté. En effet, les structures bois en service sous humidité constante ou variable exhibent des comportements très complexes qui sont liés à la durée d'application de la charge d'une part mais aussi au couplage entre le chargement et les variations hydriques.

1 Hétérogénéités dans le bois à différentes échelles

On ne pourrait guère parler du bois sans mentionner son degré fortement hétérogène à différents niveaux d'observation. L'auscultation des hétérogénéités dans le matériau bois est abordée dans ce qui suit.

1.1 Architecture du bois

Le bois est un matériau particulièrement hétérogène du fait principalement de son origine biologique. En effet, plusieurs auteurs ont déjà proposé différentes formes de schématisations pour représenter ce caractère hétérogène afin de faciliter son appréhension globale. Harrington (1998) (cité dans Clair (2011)), en se basant sur une approche multi-échelles, a proposé la représentation donnée sur la figure 1.1. Cette représentation révèle l'organisation architecturale du bois en partant de l'arbre jusqu'aux molécules des composants chimiques du bois. Dans les cinq sous-sections qui suivent, une investigation du bois de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique est menée.

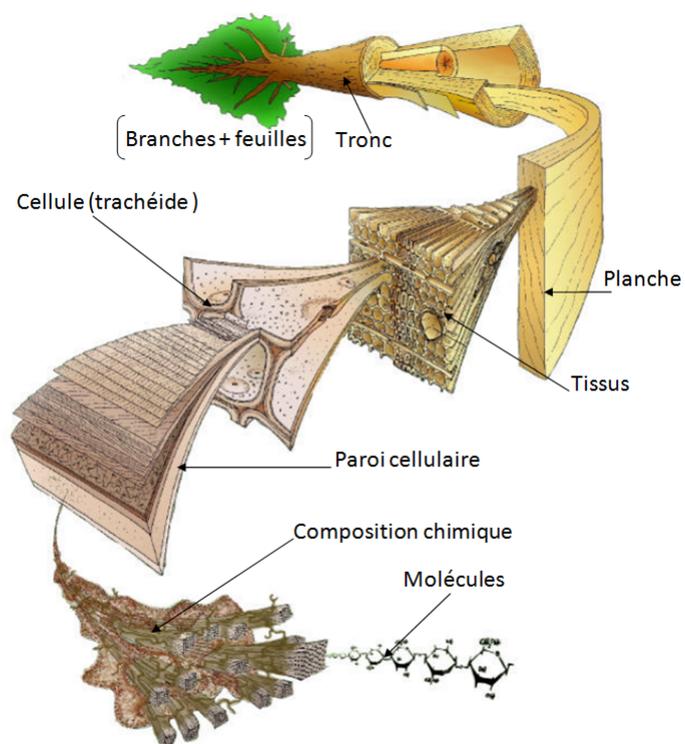


FIGURE 1.1: organisation multi-échelles du bois (adapté de Harrington (1998))

1.2 Échelle macroscopique

Différentes coupes transversale, radiale et tangentielle, mettent en évidence la présence d'une orthotropie matérielle. Trois directions sont essentiellement mises en relief : la direction longitudinale, la direction radiale et la direction tangentielle. La figure 1.2 montre les axes d'orthotropie matérielle du bois (Ormarsson et al. (1998)). Par ailleurs, une coupe transversale d'un tronc d'arbre révèle que le bois est constitué

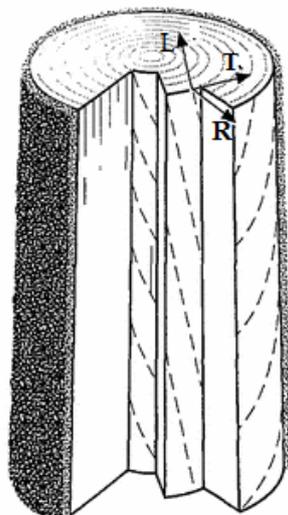


FIGURE 1.2: axes matériels du bois (Ormarsson et al. (1998))

de différentes "strates" (voir figure 1.3) :

- L'écorce externe (appelée aussi suber ou liège) : c'est la partie inerte du bois en contact direct avec son environnement. Malgré son degré d'imperméabilité, des échanges gazeux s'y opèrent pour la survie des cellules du cambium et de l'aubier.
- L'écorce interne (appelée aussi liber) : c'est la partie partiellement vivante de l'écorce. Elle possède des canaux permettant d'acheminer la sève élaborée des feuilles aux cellules du cambium.
- Le cambium : c'est une mince couche non visible à l'œil nu. Il vient juste après le liber. En son sein se déroule un ensemble de phénomènes de synthèse biologique garantissant la croissance diamétrale de l'arbre sur pied.
- L'aubier : c'est la partie de l'arbre qui suit le cambium en partant de l'écorce. Il est constitué de cellules plus ou moins vivantes en voie de duraminisation.

Il assure la fonction de transport de la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles où se déroule la photosynthèse qui est le processus par lequel l'arbre fabrique sa matière organique.

- Le duramen (aussi appelé bois parfait) : il est constitué de cellules mortes issues du processus de duraminasation de l'aubier. Il assure une fonction de soutien pour permettre à l'arbre d'avoir une certaine portance face aux actions climatiques comme le vent.
- La moelle : c'est la partie molle du bois couronnée par le duramen.

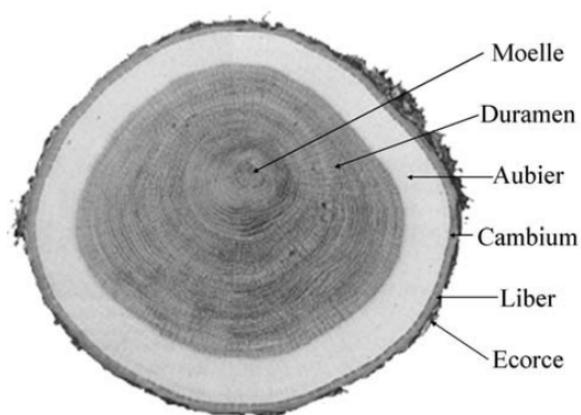


FIGURE 1.3: coupe transversale d'un tronc (schéma issu de Simon (2009))

1.3 Échelle mésoscopique

Durant l'été et le printemps, l'arbre sur pied n'a pas les mêmes besoins physiologiques. Il développe alors deux types de bois qui sont caractéristiques de ces deux périodes de l'année. Entre EW et LW se trouve le bois de transition (TW). L'ensemble constitué de ces trois types de bois constitue un cerne de croissance annuel. EW et LW sont généralement distincts à l'œil nu chez les feuillus et les résineux sur une coupe transversale. Par contre, ils ont une répartition spatiale plus régulière chez ces derniers. La figure 1.4 montre une alternance de cernes dans le plan (R,T) du Sapin Blanc du Massif Central. Beaucoup d'études ont montré les différences fondamentales qui existent en termes de propriétés entre LW et EW (Cramer et al. (2005), Jeong (2008), Eder et al. (2009), Pereira et al. (2013)). Pour mieux cerner

ces différences de caractéristiques mécaniques et physiques entre LW et EW , il faut voir leur structure microscopique. L'observation à l'échelle des tissus du bois est abordée dans le paragraphe 1.4.

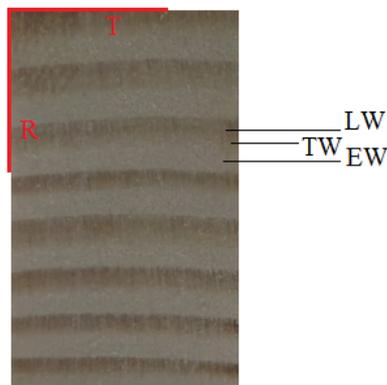


FIGURE 1.4: cernes du Sapin Blanc du Massif Central

1.4 Échelle microscopique

Une observation microscopique des tissus de feuillu et de résineux met en évidence une différence notable entre les structures de leurs tissus. La différence fondamentale entre les tissus de ces bois est liée à la présence des trachéides chez les résineux (figure 1.5-a) et des vaisseaux et fibres chez les feuillus (figure 1.5-b). Les trachéides assurent à la fois les fonctions de soutien mécanique et de conduction, tandis que chez les feuillus les fibres et les vaisseaux remplissent respectivement ces fonctions. Hormis ces types de cellules mentionnées, l'observation microscopique révèle également la présence de canaux résinifères, de rayons ligneux et de ponctuations (voir figure 1.5). La disposition des canaux résinifères peut être orientée soit dans le sens longitudinal soit dans le sens radial. Ce sont des canaux sécréteurs qui forment un réseau continu (tous les rayons ligneux communiquent entre eux). Ils sont constitués de cellules de parenchyme et sont toujours orientés dans le sens radial. Quant aux ponctuations, elles sont le siège de communication et d'échanges entre les cellules (Passas (2008)). Revenons maintenant sur les trachéides présentes chez les résineux. Comme le montre la figure 1.5-a, elles sont constituées d'une paroi tubulaire ayant une épaisseur qui peut varier d'une cellule à l'autre. Le vide donnant aux trachéides leur caractère

tubulaire est appelé lumen. L'épaisseur des paroi des trachéides de *LW* est plus grande que celle dans *EW*. De plus la taille des lumens des trachéides de *EW* est supérieure. Ces différences mises en évidence à l'échelle microscopique seraient à l'origine des propriétés différentes de ces deux types de bois (Saiki et al. (1970), Sirvio (2001), Murata & Masuda (2006), Bigorgne et al. (2011)).

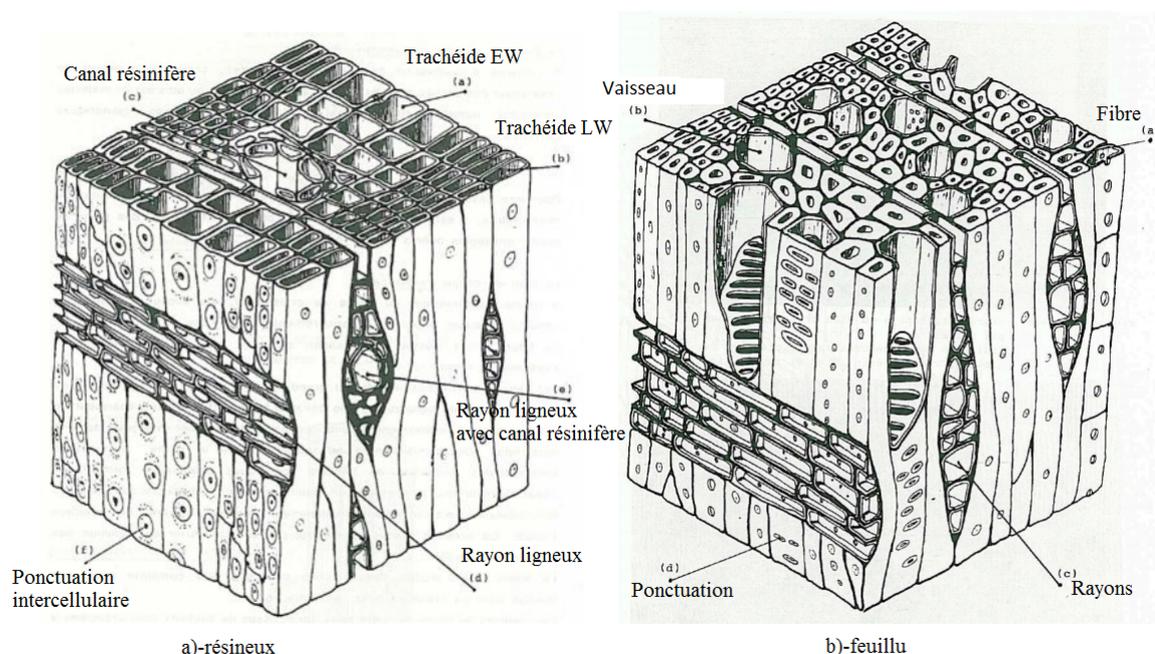


FIGURE 1.5: observation microscopique à l'échelle du tissu (cité dans Montero (2010))

1.5 Organisation et composition chimique de la paroi cellulaire

Une observation à l'échelle de la paroi cellulaire du bois révèle que celle-ci est constituée d'une succession de couches (figure 1.6), (Jebrane (2009), Montero (2010), Clair (2011)). La composition chimique de cette paroi cellulaire montre qu'elle est composée principalement de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. On aborde d'abord les différentes couches de la paroi cellulaire avant de revenir sur les détails relatifs à sa composition chimique :

- la couche M : c'est la couche intercellulaire. Elle apparaît après la division de la cellule mère. Son épaisseur varie entre 0,5 et 1,5 μm . Elle assure la liaison entre les différentes cellules. Cette couche est majoritairement constituée de lignine.
- la paroi P : c'est la paroi primaire de la cellule. Elle mesure environ 0,1 μm d'épaisseur. Elle est composée majoritairement de lignine. Elle est plus riche en hémicelluloses que la couche M.

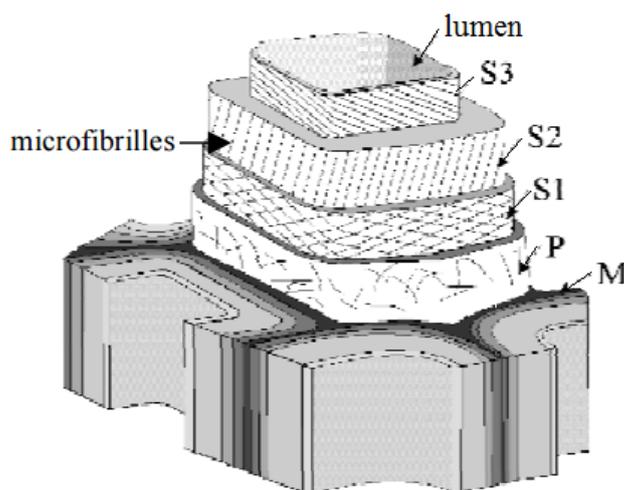


FIGURE 1.6: ultrastructure de la paroi cellulaire d'après Harrington 1999 (dans Badel (1999))

- la paroi secondaire (couches $S_1+S_2+S_3$) : c'est la partie de la paroi cellulaire la plus riche en microfibrilles de cellulose. L'orientation de ces dernières permet de discerner les couches S_1 , S_2 et S_3 qui la constituent.

La couche S_1 est constituée de microfibrilles croisées, avec un angle variant entre 60° et 80° par rapport à l'axe principal de la cellule. Elle a une structure lamellaire (3 à 6 lamelles). Son épaisseur totale varie entre 0,1 et 0,35 μm .

La couche S_2 est composée de microfibrilles en hélice dont l'angle peut varier de 5° à 50° par rapport à l'axe principal de la cellule. C'est la couche la plus riche en cellulose. Dans les cellules de *EW*, cet angle varie entre 30° et 50° et dans celles de *LW*, il est compris entre 5° et 30° . La couche S_2 la plus volumineuse de la paroi secondaire avec une épaisseur allant de 1 à 10 μm . Elle peut représenter 15 à 85 % de l'épaisseur totale de cette paroi.

Quant à la couche S_3 , elle est constituée de microfibrilles dont l'orientation

varie entre 60° et 90° par rapport à l'axe principal de la cellule. Son épaisseur varie entre $0,5$ et $1,1 \mu\text{m}$. Il faut noter que la couche S_3 n'est pas toujours présente

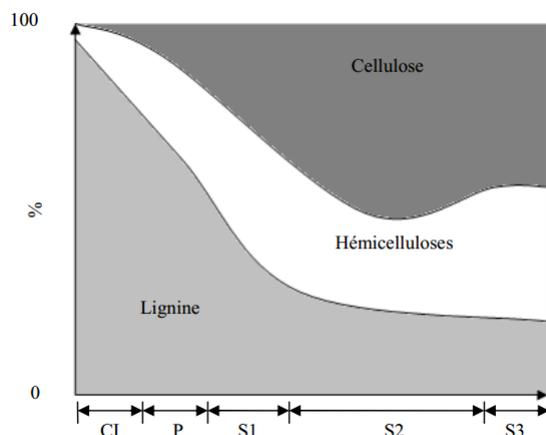


FIGURE 1.7: distribution des composants chimiques à l'échelle de la paroi cellulaire, d'après Panshin et al., 1970 (dans Bytebier (2009))

Les propriétés du matériau bois à l'échelle macroscopique ou mésoscopique sont largement influencées par la structure et la composition chimique de chacune de ces couches. La figure 1.7 montre la distribution des différents composants chimiques au sein de la paroi cellulaire :

- la cellulose : elle est formée de longues chaînes de molécules linéaires. Elle est contenue essentiellement dans les microfibrilles. Les régions cristallines (60 à 70 % pour la cellulose du bois) et les régions amorphes qui composent la cellulose sont présentées sur la figure 1.8 (Ruelle (2006)). Ces régions jouent un rôle considérable dans la rhéologie du matériau bois.
- les hémicelluloses : ce sont des polymères amorphes présentant une chaîne principale avec des ramifications latérales. Les principaux types sont les mannanes, les xylanes et les galactanes. La composition des hémicelluloses varie selon les essences. Les résineux sont riches en mannanes, pauvres en xylanes, tandis que les feuillus sont pauvres en mannanes et galactanes et très riches en xylanes.
- la lignine : c'est un polymère hétérogène complexe, amorphe et réticulé. Le polymère est ramifié et ses chaînes latérales se joignent pour former un réseau tridimensionnel.

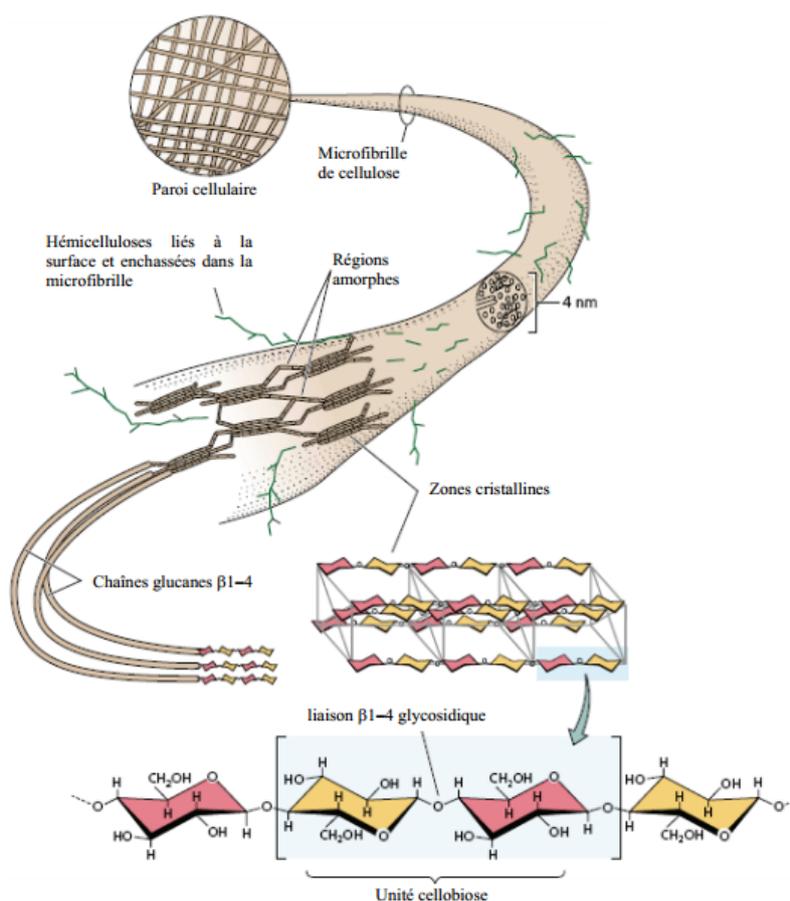


FIGURE 1.8: organisation de la structure des microfibrilles (Ruelle (2006))

On peut retrouver d'autres composants dans le bois comme les extractibles qui sont en général à l'origine de la pigmentation du duramen.

Il existe d'autres formes d'hétérogénéités dans le bois. Quelques unes de celles-ci sont discutées dans la sous-section 1.6.

1.6 Autres formes d'hétérogénéités

Parmi les autres formes d'hétérogénéités qu'on peut trouver dans le bois, on a les nœuds et le bois de réaction. Les nœuds sont des parties de branches qui ont été incluses dans le tronc d'un arbre au cours de sa croissance diamétrale (figure 1.9). Ils produisent une déviation des microfibrilles du bois et leurs proportions en terme de constituants chimiques sont différentes de celles dans le bois sans nœud.

Les nœuds constituent des zones de singularité dans le bois et perturbent la réponse d'un élément de structure en bois sous sollicitation mécanique ou hydrique (Thibaut et al. (2001)). En ce qui concerne le bois de réaction, il est généralement issu d'une

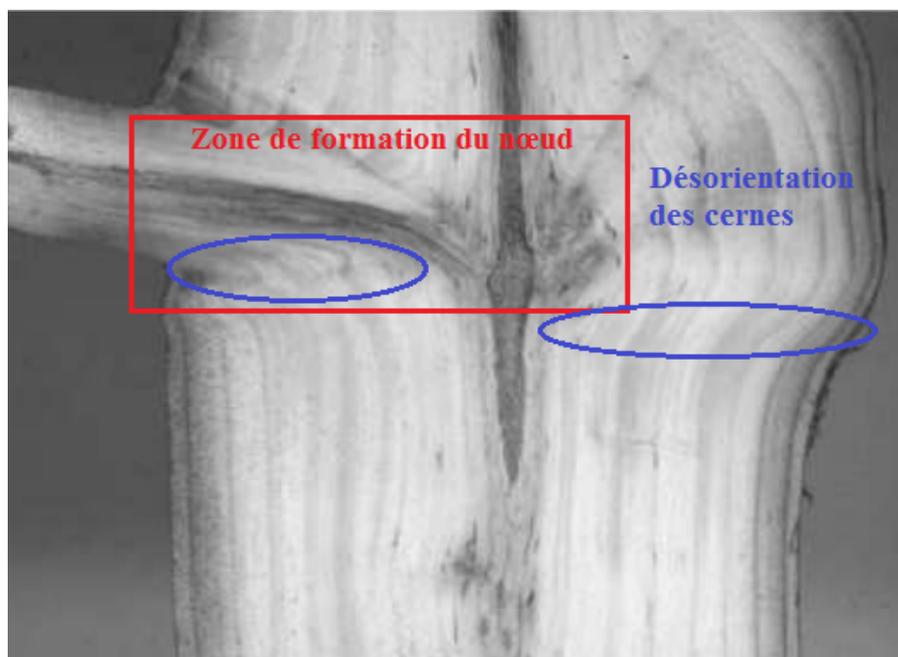


FIGURE 1.9: relation entre branche et tronc, origine des nœuds (annoté de Thibaut et al. (2001))

orientation de la tige non optimale ou de la branche causée par les actions climatiques comme le vent dominant et la neige. C'est un bois développé par l'arbre sur pied pour maintenir son équilibre et s'adapter à la modification de son environnement. Les propriétés anatomiques et chimiques du bois de réaction sont différentes du bois dit normal. Chez les résineux, le bois de réaction est appelé bois de compression et chez les feuillus on le nomme bois de tension. Ces deux types de bois exhibent des comportements très particuliers (voir Dinh (2011) pour plus de détails).

On ne pourrait pas parler du matériau bois sans aborder la problématique de l'eau dans celui-ci. La section 2 est axée sur le comportement de l'eau au sein du matériau bois.

2 Problématique de l'eau dans le bois

Cette section est dédiée à l'étude et à la compréhension du comportement de l'eau dans le matériau bois.

2.1 Partition de l'eau dans le bois

L'eau dans le bois peut être partitionnée sous les différentes formes suivantes : l'eau libre ou capillaire, l'eau liée ou hygroscopique, l'eau de constitution et la vapeur d'eau (Merakeb (2006), Husson (2009)).

- L'eau libre ou capillaire : elle occupe les vides cellulaires. Elle est sollicitée par les forces de capillarité et de gravité.
- L'eau liée : c'est une eau liée principalement sur les chaînes celluloses qui composent les parois cellulaires. Ses variations sont à l'origine des modifications physiques et mécaniques du bois.
- La vapeur d'eau : lorsque les cavités et les micropores dans le bois ne sont pas complètement saturées par l'eau libre, la vapeur d'eau s'installe pour combler les vides. Dans le cas où l'eau libre est présente, la pression de vapeur est égale à celle de saturation. Si l'eau libre n'existe pas dans les cavités, la vapeur entre en équilibre thermodynamique avec l'eau liée présente sur les parois cellulaires. Cette vapeur n'est pas quantifiable par une simple connaissance de l'état hydrique d'une éprouvette. Pour quantifier la vapeur d'eau, d'autres paramètres comme la porosité sont nécessaires.
- L'eau de constitution : c'est l'eau qui participe à l'élaboration des molécules du squelette du matériau.

Au-dessus du *PSF*, la loi caractérisant le comportement de l'eau dans le bois est celle de Darcy. L'étude du comportement de l'eau dans le bois en-dessous de celui-ci est abordée dans la sous-section 2.3. La teneur en eau dans le bois est définie comme étant le rapport entre la masse d'eau totale contenue dans le bois et la masse de bois anhydre (voir équation 1.1). Pour obtenir la masse anhydre d'une éprouvette en bois, on la met à l'étuve pour une durée de 24 heures à une température de 103 °C.

$$w = \frac{m_{tot} - m_{sec}}{m_{sec}} \quad (1.1)$$

où m_{tot} désigne la masse totale du bois humide, m_{sec} sa masse anhydre et w la teneur en eau intrinsèque de celui-ci.

2.2 Comportement hygroscopique du bois

En-dessous du *PSF* tout changement d'humidité relative induit une variation de l'humidité interne du bois qui peut affecter la géométrie du matériau ainsi que ses propriétés physiques et mécaniques. Lorsque le matériau libère de l'eau, on parle de désorption (séchage) et quand il en prend on qualifie ce phénomène à l'adsorption (humidification). La figure 1.10 montre que les différents constituants chimiques du bois n'ont pas la même sensibilité hygroscopique.

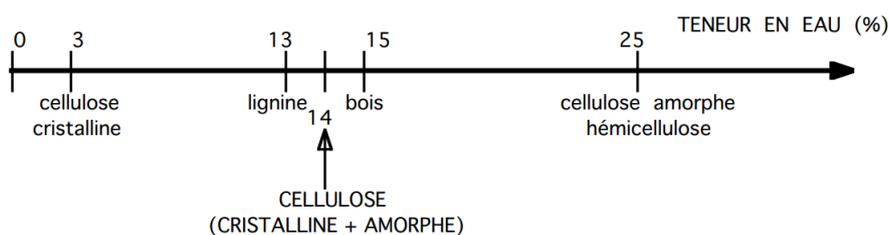


FIGURE 1.10: teneur en eau théorique des constituants du bois pour une humidité du bois de 15 % à 25 °C

2.2.1 Séchage et humidification libres du bois

Le bois peut contenir plus d'eau que de matière solide (bois au sens propre du terme). A son abattage, la teneur en eau intrinsèque peut dépasser 100 %. Une fois débité, le bois entre dans une première phase du séchage qui correspond à la libération de l'eau libre contenue dans les lumens et les cavités cellulaires (Mera-keb (2006)). La figure 1.11 montre les différentes phases du séchage libre. Dans un premier temps, la température du bois monte jusqu'à ce que le bois humide ait une température caractéristique de l'environnement séchant. Cette phase est très courte comparée à la durée du séchage global. Il s'agit principalement d'une mise en régime thermique où les flux s'accroissent jusqu'à stabilisation. La deuxième phase est caractérisée par une élimination de l'eau à flux constant. Pendant cette période, l'enthalpie de l'eau reste immuable. Durant cette période, les échanges s'opèrent par vaporisation de l'eau à la surface du bois en contact avec l'environnement séchant. Suite à cette période, on observe un premier ralentissement du séchage. Celui-ci est essentiellement produit par une modification de l'enthalpie de l'eau située à la surface du bois. Ce changement traduit l'entrée dans le domaine hygroscopique du

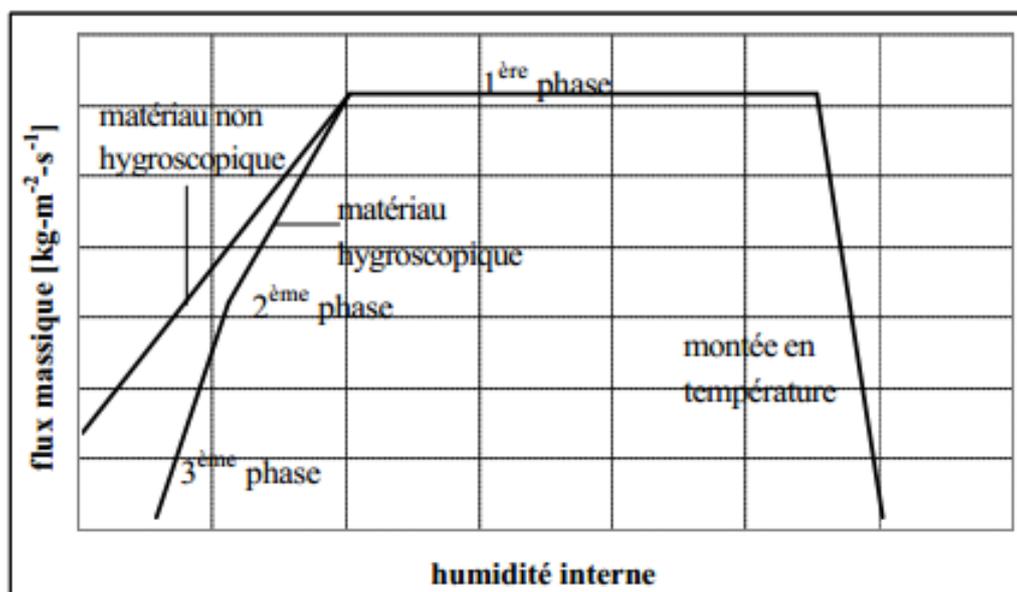


FIGURE 1.11: différentes phases du séchage libre du bois (Merakeb (2006))

bois. Le début de phase est marqué par une alimentation insuffisante en eau de la surface par le cœur de l'élément en bois. Ce sont les diverses propriétés physiques du bois qui pilotent la cinétique du séchage pendant cette période. Un second ralentissement, durant lequel le flux-masse décroît rapidement, se manifeste. Ceci indique que tout le matériau est entièrement dans le domaine hygroscopique. La teneur en eau intrinsèque du bois est donc en-dessous du *PSF*. L'équilibre hydrique va par la suite s'installer progressivement d'après Martin (1995) (cité dans Merakeb (2006)). En-dessous du *PSF* la relation entre déformation et teneur en eau intrinsèque du bois est linéaire comme indiqué sur la figure 1.12 (Merakeb (2006)).

Lors du séchage du bois, différents états de contraintes peuvent se manifester. Ceux-ci sont gouvernés principalement par une distribution non-uniforme de la teneur en eau au sein de la grume comme illustrée sur la figure 1.13 (Simpson (1991), Moutee (2006)) :

- (a) l'eau libre est encore présente partout dans la pièce séchée, donc il n'y a que les contraintes thermiques qui peuvent se développer.
- (b) la teneur en eau des parties les plus surfaciques du bois est en-dessous du *PSF*. Celles-ci tentent alors de se rétrécir mais vu que le cœur possède encore une teneur supérieure au *PSF*, il empêche ce rétrécissement.

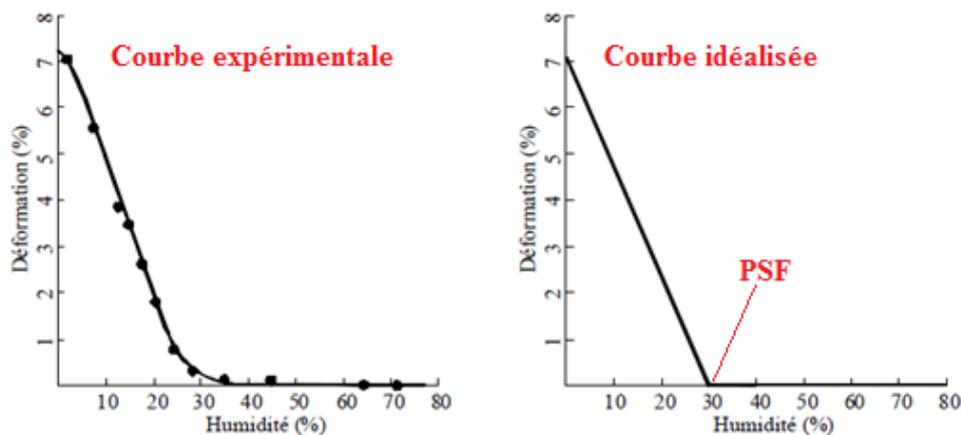


FIGURE 1.12: retrait libre à partir de l'état saturé du bois

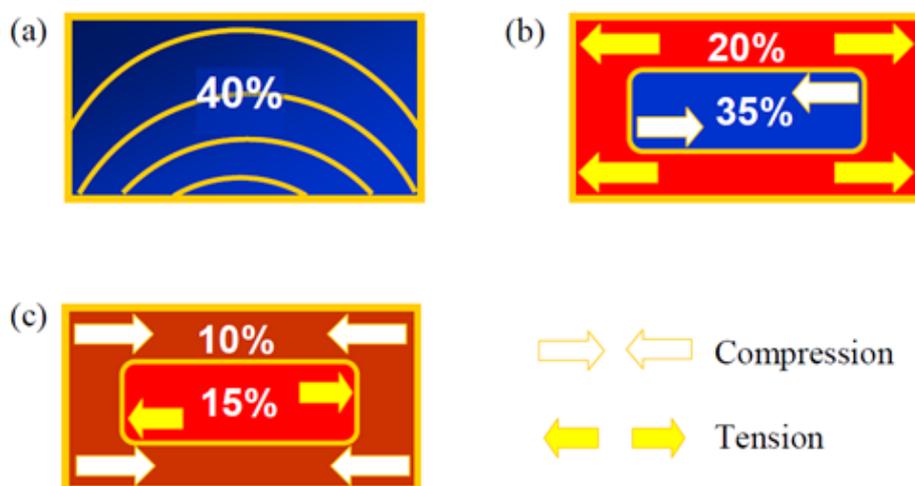


FIGURE 1.13: manifestation de contraintes transversales lors du séchage du bois (Moutee (2006))

- (c) la teneur en eau dans le cœur comme dans les parties superficielles est en-dessous du *PSF*. On assiste alors à un phénomène d'inversion des contraintes comparé à l'état de contrainte observé en (b).

Le développement des contraintes lors d'un séchage libre non-uniforme peut avoir comme conséquences entre autres les défauts géométriques indiqués sur la figure 1.14 (Ormarsson et al. (1998)). Les déformations du bois peuvent aussi avoir comme source l'endroit de prélèvement de la grume (voir figure 1.15). Par ailleurs, la présence de bois juvénile ou de bois de réaction dans les pièces de bois soumis au

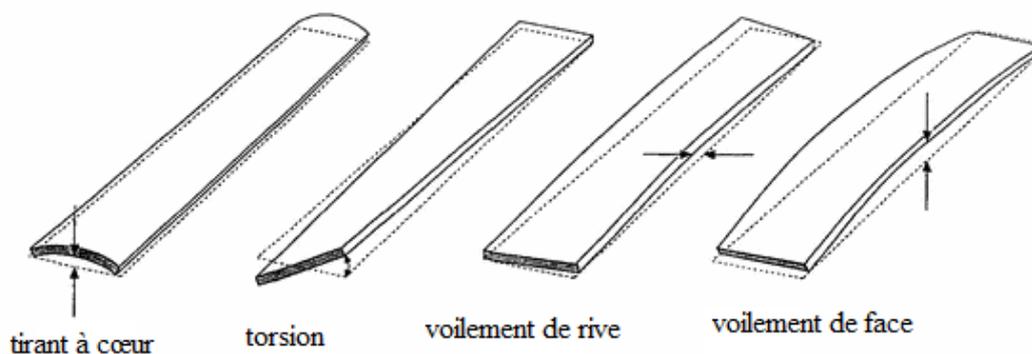


FIGURE 1.14: différents types de déformation dus au séchage (Ormarsson et al. (1998))

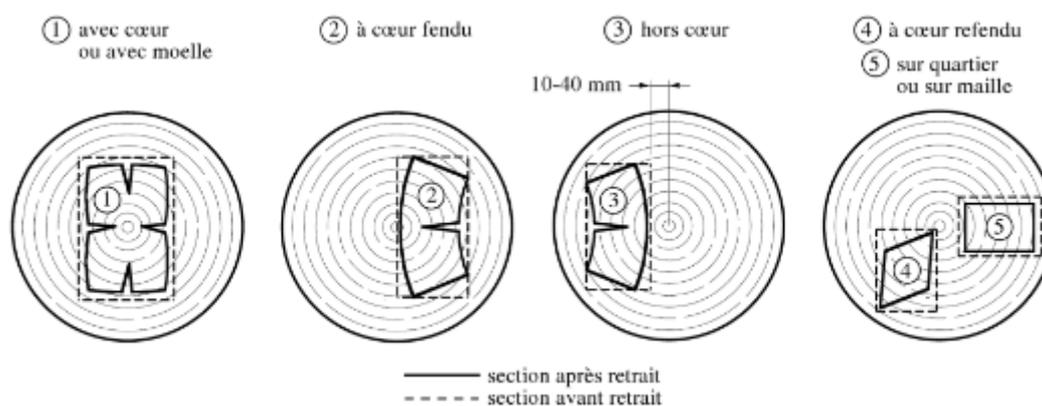


FIGURE 1.15: déformations du bois varient selon l'endroit de la grume dont elles proviennent (Natterer (2004))

séchage engendre une différence interne de retrait longitudinal qui est responsable de l'apparition de déformation de type gauchissement suivant l'axe longitudinal des débits (Moutee (2006), Clair (2011)).

Comme on l'a déjà évoqué dans ce chapitre, le bois est un matériau capable aussi de prendre de l'humidité. Lors de l'humidification du bois, différentes régions de stockage de l'humidité se distinguent lorsque l'humidité augmente (CSTB (2009)), (voir figure 1.16) :

- région A : c'est la région dite de « sorption », ou « hygroscopique ». Son domaine s'étend du matériau sec jusqu'à une humidité relative d'environ 95%.

Celui-ci prend en compte toutes les teneurs en eau résultant de la sorption d'humidité et de la condensation capillaire jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre.

- région B : c'est la région dite capillaire. Elle débute lorsque la sorption prend fin. Elle s'étend jusqu'à la saturation libre (w_f est la teneur en eau de saturation libre).
- région C : cette région est dite de surpersaturation. Elle ne peut être atteinte que par le phénomène de succion. Dans la pratique, cet état est atteint au travers des mécanismes de diffusion par gradient thermique, et en laboratoire avec l'application d'une pression ou la mise sous vide préalable de l'éprouvette. On se situe au-delà de la saturation libre et on tend vers un état où tous les pores seront remplis d'eau.

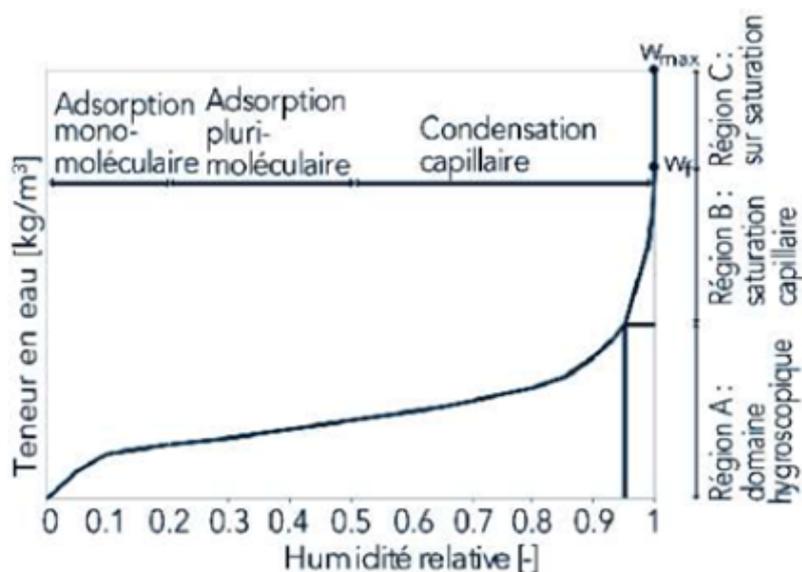


FIGURE 1.16: isotherme de sorption (CSTB (2009))

Au sein d'un pore, les couches plurimoléculaires qui s'accumulent peuvent se rejoindre si le diamètre des pores est suffisamment petit, et généralement si l'humidité relative est supérieure à 50 %. Un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque est alors formé. Ainsi, on trouve au sein du matériau une phase vapeur et une phase liquide pour une humidité relative inférieure à 100 % (CSTB (2009)). L'isotherme de sorption présentée sur la figure 1.16, caractérise la capacité du matériau à stocker de l'eau. Un matériau capillaire actif en contact avec l'eau prendra

cette eau jusqu'à ce qu'il atteigne sa teneur en eau de saturation. Cette évolution de la teneur en eau correspond à la fonction stockage de l'humidité. En raison des trous d'air emprisonnés dans la structure, la saturation libre est inférieure à la teneur en eau maximale (w_{\max}) qui est fonction de la porosité (CSTB (2009)). La diffusion de l'eau le bois va maintenant être abordée.

2.3 Étude de la diffusion hydrique en dessous du PSF

En-dessous du *PSF* le phénomène qui caractérise le comportement de l'eau dans le bois est la diffusion. La caractérisation de ce phénomène est abordée ici.

2.3.1 Lois caractérisant le comportement de l'eau dans le bois

La loi de Fick a été largement utilisée pour décrire la diffusion hydrique dans le bois en-dessous du *PSF*. Néanmoins, la validité de cette loi sur la description correcte de la diffusion hydrique au sein d'un tel matériau est discutée. En effet, Wadsö (1993) a réalisé des essais d'adsorption sur des éprouvettes tangentielles d'épicéa de 2 mm et 4 mm d'épaisseur à 23°C sur deux intervalles d'humidité relative : de 54 % à 75 % et 75 % à 84 %. Il a reporté avoir observé un comportement fickien (évolution linéaire du gain de masse en fonction de la racine carrée du temps au delà de la moitié du gain de masse final) pour la première tranche d'humidité relative (voir figure 1.17-a), et un comportement non-fickien (caractérisé par une sorption initiale rapide suivie d'une sorption plus lente) pour le deuxième intervalle (voir figure 1.17-b). Nakano (1994a,b) a aussi tenté de montrer que la loi de Fick ne décrit pas fidèlement la diffusion au cours de l'adsorption hydrique dans le bois. Cependant, certains auteurs comme Babiak (1995) pensent que la description par la loi de Fick du processus de la diffusion hydrique dans le bois ne dépend pas que de cette loi mais également des hypothèses faites sur les conditions aux limites du problème étudié. Par conséquent, en cas de manquement pour la description d'un problème de diffusion par la loi Fick, les conditions aux limites utilisées pour résoudre le problème devraient aussi être remises en cause et pas spécifiquement la loi de Fick. Söderström (1996) a aussi mentionné que la loi de Fick décrivait correctement la diffusion hydrique dans le bois. Malgré le questionnement sur la validité de certains travaux mentionnés ci-dessus, la loi de Fick a été utilisée dans des études plus récentes pour décrire la diffusion hydrique dans le bois (voir Baronas & Ivanauskas (2004), Perré et al. (2007), Nguyen (2014)). Elle sera donc adoptée dans ce travail.

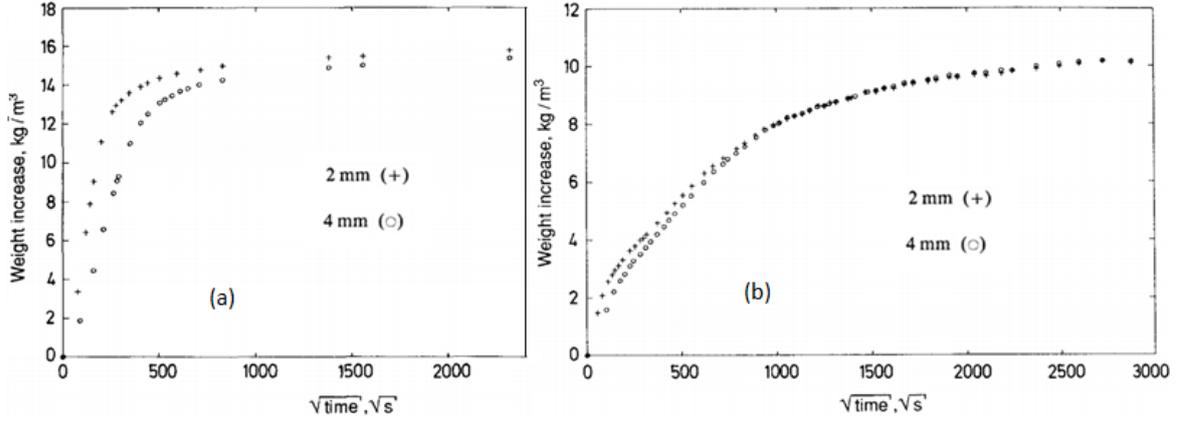


FIGURE 1.17: adsorption : a)- de 54 % à 75 %, a)-de 75 % à 84 % (Wadsö (1993))

2.3.2 Rappels sur la loi de Fick

L'équation différentielle de la loi de Fick est obtenue de la façon suivante (Crank (1975)). Soit un élément de volume de forme parallélépipédique rectangle (voir figure 1.18). Ses côtés sont parallèles aux axes de coordonnées. Ses dimensions sont $2dx \times 2dy \times 2dz$. Soit $P(x, y, z)$, le centre de cet élément de volume. La concentration de la substance diffuse est notée w . Soient ABCD et A'B'C'D' les faces perpendiculaires à l'axe x comme indiqué en figure 1.18. Le taux auquel la substance diffuse à travers la face ABCD au plan $x-dx$ est donné par :

$$4dydz \left(F_x - \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right) \quad (1.2)$$

où F_x est le taux de transfert par unité de surface au plan correspondant. De manière similaire le taux de substance qui diffuse à travers la face A'B'C'D' est donné par :

$$4dydz \left(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx \right) \quad (1.3)$$

La contribution à l'accroissement du taux de substance diffuse dans l'élément via ces deux faces est égale à :

$$- 8dx dy dz \frac{\partial F_x}{\partial x} \quad (1.4)$$

Par analogie, on obtient à partir des autres faces :

$$- 8dxdydz \frac{\partial F_y}{\partial y} \quad (1.5)$$

$$- 8dxdydz \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (1.6)$$

Le taux auquel la substance diffuse au sein de l'élément de volume s'accroît est aussi donné par :

$$8dxdydz \frac{\partial w}{\partial t} \quad (1.7)$$

Donc à partir des équations 1.4, 1.5, 1.6 et 1.7 on peut écrire que :

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0 \quad (1.8)$$

Or d'après la première loi de Fick on a (Crank (1975)) :

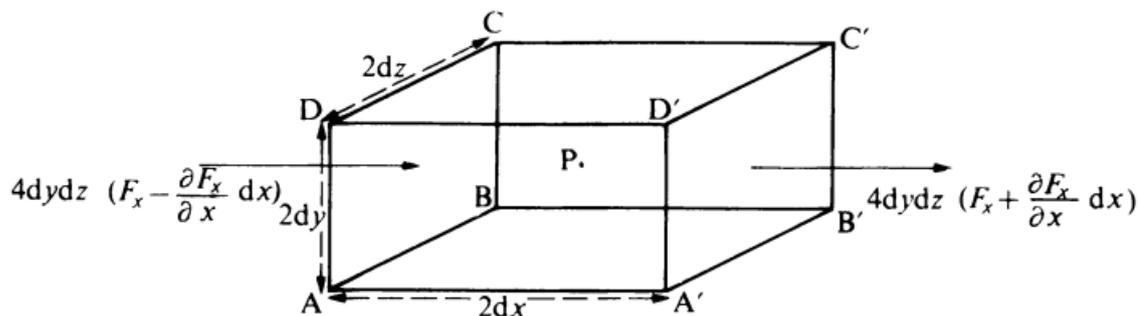


FIGURE 1.18: volume élémentaire

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} = -D_x \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial F_y}{\partial y} = -D_y \frac{\partial w}{\partial y} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial F_z}{\partial z} = -D_z \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.11)$$

D'où

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (1.12)$$

L'équation 1.12 est la loi seconde loi de Fick généralisée. Elle est par "abus" de langage appelée loi de Fick. Dans cette équation le coefficient de diffusion peut dépendre de la direction, x , y ou z , de la position selon x , y ou z , ou de la teneur en eau w . Lorsqu'on fait l'hypothèse d'une diffusion unidirectionnelle suivant l'axe des x et avec l'hypothèse d'un coefficient de diffusion constant, on obtient l'équation 1.13 :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (1.13)$$

La solution de l'équation 1.13 peut être obtenue par différentes méthodes, entre autres on peut citer la méthode de séparation des variables et la transformée de Laplace. Crank (1975) propose différentes solutions analytiques en fonction de l'hypothèse de la géométrie du domaine étudié ainsi que des conditions aux limites. Cette équation peut être résolue également en utilisant des méthodes numériques comme la méthode des différences finies.

Il existe différents paramètres permettant de caractériser l'eau dans le bois en-dessous du *PSF*. Ils sont discutés ci-dessous.

2.3.3 Paramètres de diffusion hydrique

Dans le domaine hygroscopique du bois, trois paramètres sont nécessaires pour caractériser le comportement du bois. Il s'agit de la teneur en eau, de la diffusivité hydrique et du coefficient de retrait/gonflement pour apprécier les variations dimensionnelles. Il existe différentes méthodes de détermination du coefficient de diffusion hydrique du bois dans la littérature. Les mesures pouvant être faites en régime permanent ou transitoire. La méthode la plus accessible est celle basée sur l'utilisation de solutions salines. Cette méthode permet de stabiliser et de maintenir une humidité relative constante. Ce type d'expérimentation offre la possibilité de déterminer le coefficient de diffusion hydrique selon une direction donnée en mesurant le flux hydrique. Ce dernier est induit par un gradient d'humidité relative établi entre les deux faces d'une éprouvette cylindrique (Merakeb (2006), Saifouni (2014)). Il existe d'autres méthodes plus rapides. Le pilotage des paramètres d'expérimentation correspondants est relativement plus aisé. C'est le cas de la méthode de la double chambre climatique (Agoua et al. (2001)) et de la méthode de la balance à suspension magnétique (Perré et al. (2007)). Cette dernière a été mise en place par Perré et al. (2007). Une représentation schématique de la balance à suspension magnétique est donnée sur la figure 1.19. La balance et l'électro-aimant sont com-

plètement séparés de la cellule de mesure dans le but d'éviter toute perturbation qui pourrait générer des valeurs de température et de pression très élevées. La balance et la partie supérieure de l'électro-aimant sont dans les conditions ambiantes du milieu. La balance est couplée à un aimant permanent placé à l'intérieur de la chambre de mesure ; ce dernier est donc à la température d'expérimentation. Tout changement de force est transféré de la cellule de mesure à la balance via la suspension magnétique. Le système est piloté par un ordinateur qui permet de faire une acquisition de la masse de l'éprouvette à intervalles de temps réguliers pour chaque palier d'humidité relative. L'équilibre hygroscopique pour chaque palier permet de remonter aux teneurs en eau intrinsèque de l'éprouvette. Pour obtenir les coefficients de diffusion, la méthode de la pente est utilisée (voir Perré et al. (2007) pour plus de détails). Liu et al. (2001) et Nguyen (2014) ont proposé des méthodes d'identification inverse du coefficient de diffusion basées sur la minimisation de la différence entre les teneurs en eau expérimentale et simulée du bois. Toutes ces méthodes mentionnées nécessitent généralement un suivi très précis de la variation de la masse de chaque éprouvette testée. De plus, elles donnent des résultats globaux pour une direction donnée de l'éprouvette et ne permettent pas d'obtenir les coefficients de retrait/gonflement. Elles ne prennent donc pas en compte le caractère hétérogène du bois comme la présence de *LW* et *EW*. Elles ne caractérisent donc pas de manière complète l'éprouvette testée. Certains auteurs comme Nakato & Kajita (1955), Nakato (1958), Bonneau (1991), Watanabe et al. (1999), Ishimaru & Iida (2001), Pereira et al. (2013), Xavier, Monteiro, Morais, Dourado & de Moura (2014) ont souligné l'importance de prendre en compte le caractère hétérogène du bois à l'échelle du cerne annuel de croissance. Dans la prochaine sous-section, les éléments pouvant impacter la diffusion dans le bois sont abordés.

2.3.4 Éléments influant sur la diffusion

Le premier paramètre qui influence la diffusion hygroscopique au sein du matériau bois est la direction. En effet, la diffusion dans les trois directions principales du bois est différente. Le coefficient de diffusion hydrique le plus élevé est celui de la direction longitudinale à cause principalement de la présence des trachéides (résineux) et des vaisseaux (feuillus). Concernant les deux autres directions, la diffusivité hydrique est en général plus élevée selon la direction radiale que selon la direction tangentielle. Il semble que le rôle que jouent les rayons ligneux dans la direction

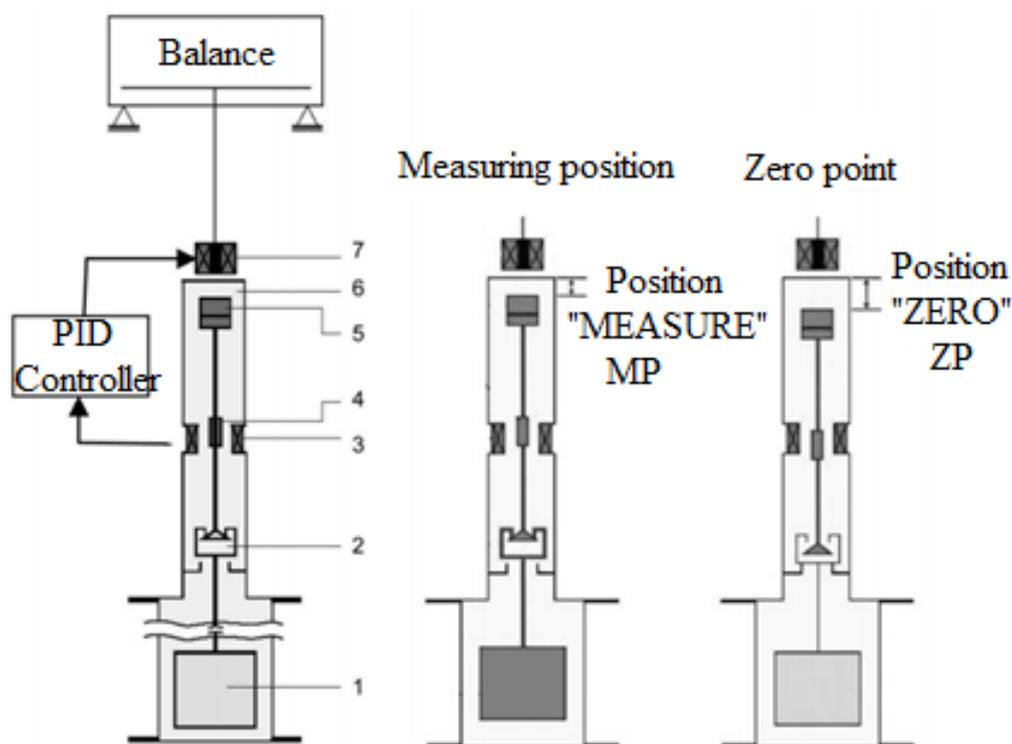


FIGURE 1.19: représentation schématique de la balance à suspension magnétique, 1)-échantillon, 2)-mesure de la charge de découplage, 3)-capteur, 4)-capteur, 5)-aimant permanent, 6)-chambre de couplage, 7)-electro-aimant (Perré et al. (2007))

radiale durant la vie de l'arbre en est la cause, les cellules d'une rangée étant plus alignées dans le sens radial que dans le sens tangentiel (selon Martin (1995) dans Merakeb (2006)). D'autre part, le phénomène de diffusion n'est guère indifférent à la densité du bois. En effet, la masse volumique) des bois est très variable selon les essences (de 350 à 1 200 kg/m³). Cette variabilité est aussi présente au sein d'une même essence (avec des variations maximales de plus ou moins 15 %), (Merakeb (2006)). La masse volumique du bois agit sur la diffusivité massique quels que soient la direction et le sens de la diffusion. La diffusivité décroît lorsque la masse volumique augmente. Ceci s'explique aisément par le fait que dans le bois dense, les parois cellulaires sont épaisses et les lumens de faible diamètre. C'est ce qu'on observe dans *EW* de densité faible et dans *LW* de densité plus élevée (Pereira et al. (2013)). La figure 1.20 montre un exemple de profil de densité du douglas obtenu par microdensitométrie. Cette figure met en évidence la variabilité de la densité à

l'échelle du cerne annuel de croissance.

Les structures bois sous contrainte mécanique exhibent des comportements complexes en environnement constant ou variable. Ceux-ci sont discutés dans la section 3.

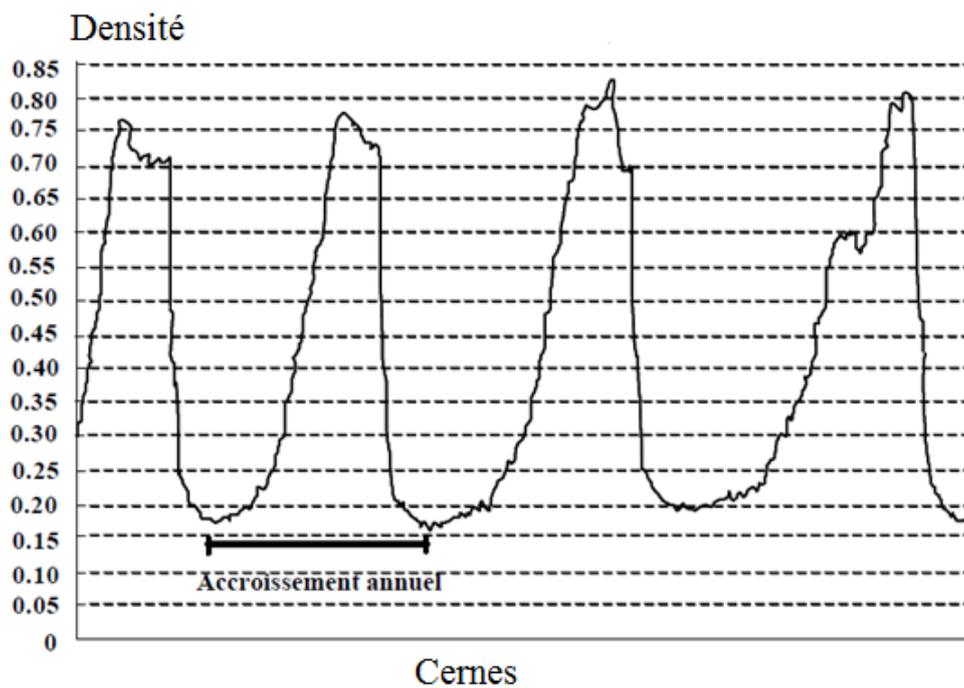


FIGURE 1.20: exemple de profil microdensitométrie obtenu sur un bois adulte de douglas (dans Merakeb (2006))

3 Étude du bois sous contrainte en environnement constant ou variable

Les comportements mécaniques du matériau bois tenant compte des conditions hygrométriques de son milieu sont abordés ici.

3.1 Comportement viscoélastique du bois

Le bois peut être considéré comme un matériau composite dont la matrice est constituée de ses autres composants chimiques exception faite aux microfibrilles. Ces derniers jouent le rôle de renforts. Cette matrice lui confère des propriétés visqueuses alors que les renforts lui donnent son comportement élastique. Le bois peut donc être classé comme un matériau à comportement viscoélastique. En effet, sous contrainte mécanique constante, la déformation du bois continue à augmenter dans le temps. Ceci correspond au fluage viscoélastique (voir figure 1.21). Après déchargement, le

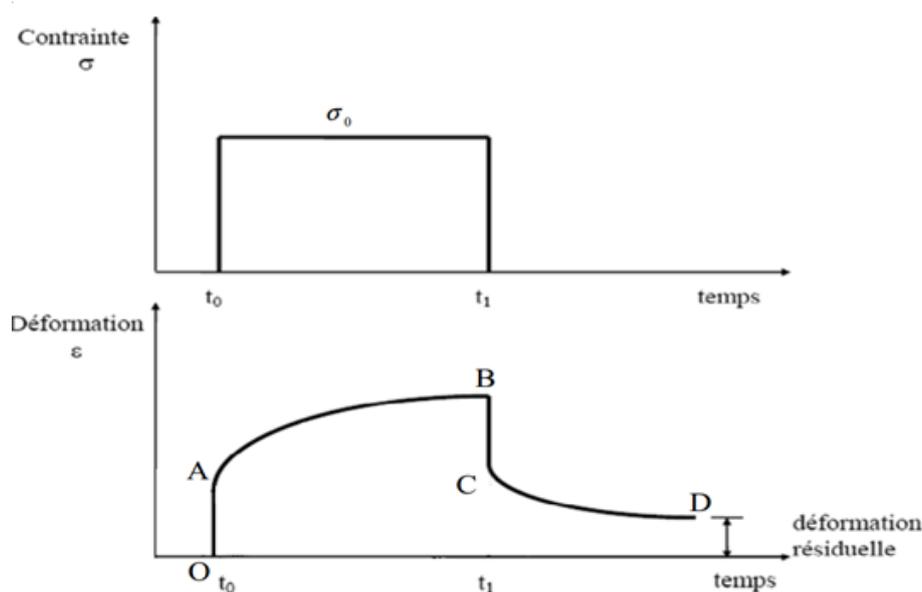


FIGURE 1.21: fluage-recouvrance à sec, a)-OA phase élastique, b)-AB phase de fluage, c)-BC retour élastique, d)-recouvrance (Gril (1988))

retour vers une déformation nulle (la recouvrance) s'effectue de manière différée dans le temps (Pittet (1996), Dubois (1997), Randriambololona (2003), Moutee (2006), Merakeb (2006), Moutou Pitti (2008), Saifouni (2014)). La figure 1.22 montre qu'à

humidité constante, le niveau de déformation en fluage et l'amplitude de la déformation en recouvrance augmentent lorsque la contrainte appliquée est plus élevée (Pittet (1996)). D'autre part, la figure 1.23 qu'à contrainte constante, lorsqu'on

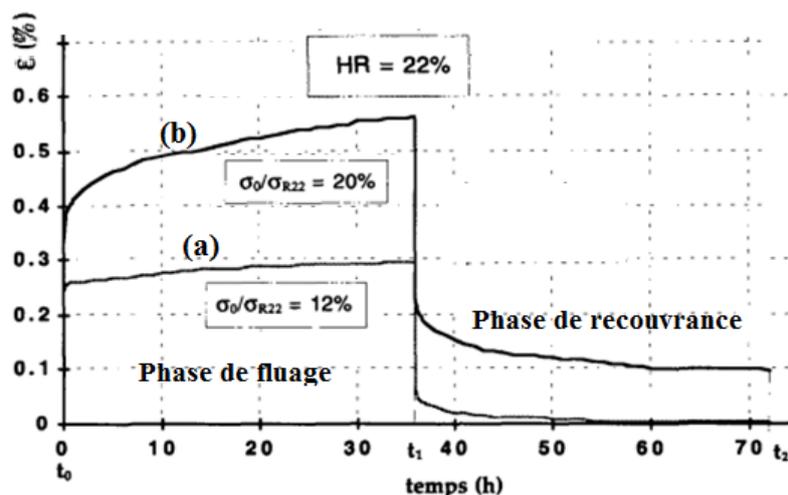


FIGURE 1.22: effet du niveau du chargement sur le fluage-recouvrance en traction à humidité constante (adapté de Pittet (1996))

considère deux états d'humidité différents, le niveau de fluage est plus accentué avec l'humidité la plus élevée. L'amplitude de la déformation en phase de recouvrance est également plus grande (Pittet (1996)). Ceci montre le pouvoir adoucissant de l'humidité sur le bois. Goulet et Ouellet (1968) (dans Moutee (2006)) ont évalué pour différentes essences l'évolution du module d'Young tangentiel en fonction de la teneur en eau intrinsèque. La figure 1.24 donne les résultats obtenus. Cette figure met en évidence la chute spectaculaire du module évalué pour toutes les essences étudiées au dessus de 5 % d'humidité interne. Dans la littérature il existe plusieurs modèles rhéologiques pour représenter le comportement viscoélastique du bois. On utilise entre autres le modèle de Kelvin-Voigt (fluage) ou de Maxwell généralisé (relaxation). Le modèle de Burger permet aussi de représenter le comportement viscoélastique du bois en fluage (Bazant (1979)). On verra dans la sous-section 3.2 comment évolue le niveau de déformation du bois sous contrainte en environnement variable.

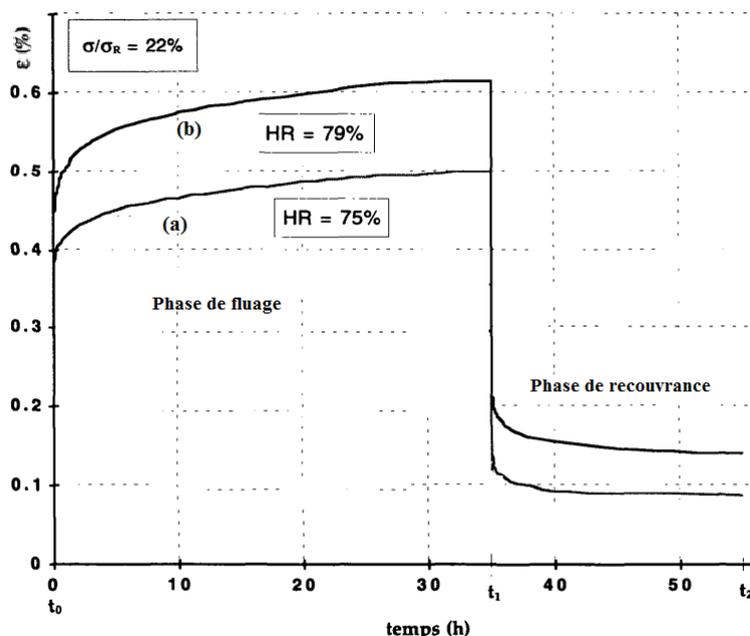


FIGURE 1.23: effet du niveau d'humidité relative sur le fluage-recouvrance en traction (adapté de Pittet (1996))

3.2 Mise en évidence de la déformation mécanosorptive

Beaucoup de travaux comme ceux de Armstrong et al. (1960), Armstrong & Christensen (1961), Armstrong & Kingston (1962), ont porté sur l'étude de l'influence de l'humidité sur le comportement du bois sous contrainte. En outre, Gril (1988) a mis en relief l'effet du séchage ou de l'humidification sur la déformation du bois sous contrainte mécanique. En effet, comme l'illustre la figure 1.25, il a aussi constaté que sous contrainte mécanique constante, une augmentation de la teneur en eau engendre un accroissement du niveau de déformation totale. Le constat est le même lorsqu'on sèche le bois. Cette observation est la conséquence d'un couplage entre l'humidité et la contrainte mécanique. On le qualifie de la mécanosorption. Ce phénomène a fait l'objet de plusieurs travaux (dont Hunt (1989), parmi les plus anciens, Pittet (1996), Randriambololona (2003), Moutee (2006) parmi les plus récents). Les essais réalisés par Armstrong & Kingston (1962) et Hunt (1984) étaient faits sur des éprouvettes de dimension relativement importante ce qui peut rendre difficile l'interprétation des résultats obtenus car il faut prendre en compte d'autres effets comme les variations dimensionnelles. En réalité la déformation mécanosorptive peut être noyée dans la déformation totale. En effet, comme le montre l'équa-

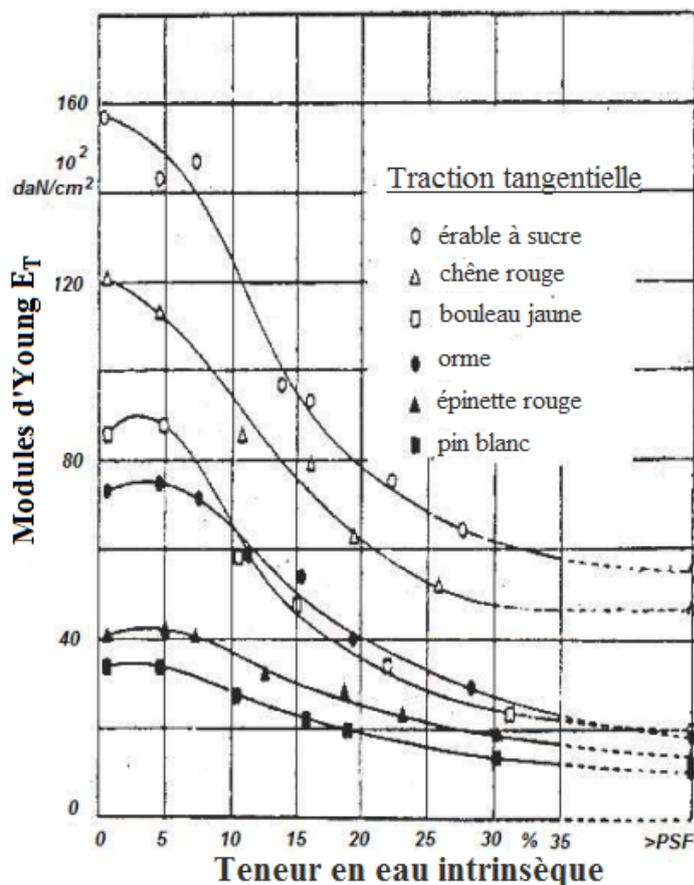


FIGURE 1.24: Effet de l'humidité sur le module d'Young tangentiel E_T (Goulet et Ouellet (1968) dans Moutee (2006))

tion 1.14, la partition de la déformation totale permet de distinguer : la déformation élastique (ε_e), le fluage viscoélastique (ε_ν), le retrait/gonflement (ε_w) et la déformation mécanosorptive (ε_{ms}). Cette écriture de la déformation totale fait l'hypothèse d'une activation indépendante entre le fluage viscoélastique et la mécanosorption. En considérant qu'il n'y a pas absence de cette activation, la déformation totale est partitionnée comme suivant : la déformation élastique (ε_e), la viscoélastique mécanosorptive ($\varepsilon_{\nu+ms}$), le retrait/gonflement (ε_w), voir équation 1.15.

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_e + \varepsilon_\nu + \varepsilon_w + \varepsilon_{ms} \quad (1.14)$$

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_e + \varepsilon_{\nu+ms} + \varepsilon_w \quad (1.15)$$

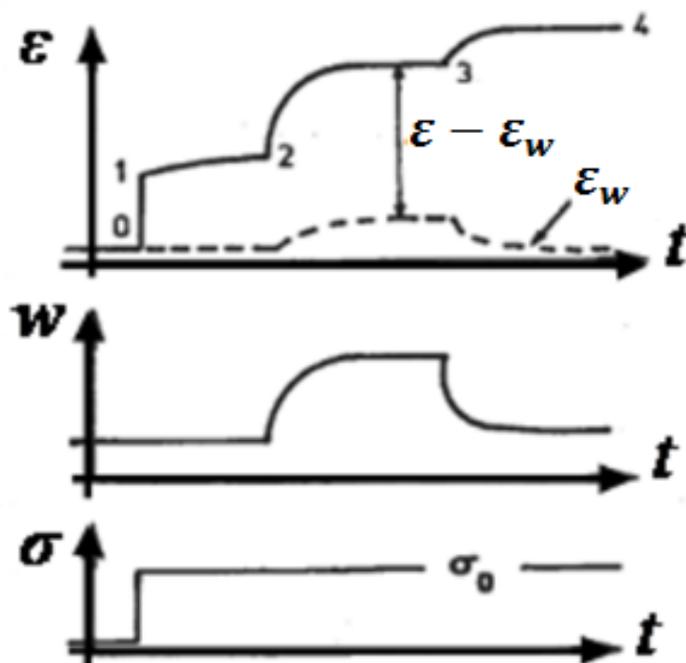


FIGURE 1.25: mise en évidence de la mécanosorption (d'après Gril (1988))

Pour faire des essais "purement" mécanosorptifs, certains auteurs comme Pittet (1996) et Saifouni (2014) ont utilisé des éprouvettes de faibles dimensions pour négliger notamment les effets de gradients hydriques. Cependant, de telles dimensions rendent très délicats les essais de compression à cause des risques de flambage. Dans les travaux de Hunt (1984), Hunt & Shelton (1987 a,b , 1988) l'existence de fluage limite (déformation maximale) et du seuil mécanosorptif est abordée. Le seuil mécanosorptif est un niveau de réponse du matériau en-dessous duquel un séchage ou une humidification sous contrainte engendre une augmentation de celle-ci, mais ne suit pas nécessairement la trajectoire mécanosorptive. Au delà de ce seuil, la déformation suit la trajectoire mécanosorptive. Un exemple de trajectoire mécanosorptive est donnée sur la figure 1.26. Des études ont montré que le fluage sous séchage est plus notable que celui observé lors d'une humidification. Ce constat serait dû à un phénomène nommé hygroverrou (Gril (1988)). Il s'agit d'un blocage de la déformation au cours du séchage. Dans les travaux très récents, Saifouni (2014) a étudié cet effet. Il a constaté la genèse de l'effet hygroverrou lors du séchage sous contrainte. Cet effet disparaît progressivement en phase d'humidification et finit par s'annuler au retour à l'humidité initiale. Il a également observé que la création et la disparition

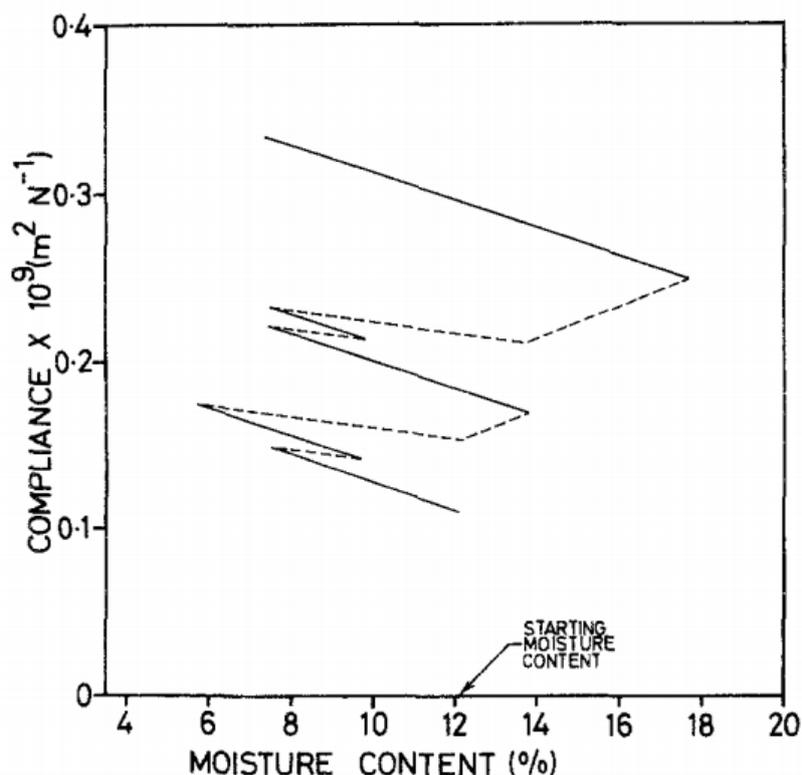


FIGURE 1.26: exemple de trajectoire mécanosorptive (Hunt (1984))

de l'hygroverrou étaient indépendantes des variations de la contrainte mécanique appliquée (voir figure 1.27). Dans la littérature il existe différents modèles rhéologiques pour modéliser le comportement mécanosorptif du bois. Certains modèles sont basés sur des approches phénoménologiques alors que d'autres sont plutôt axés sur la microstructure du bois. Parmi ces modèles certains font l'hypothèse d'une activation indépendante tels que les modèles de Ranta-Maunus et de Salin (Ranta-Maunus (1975), Salin (1992)), tandis que d'autres prennent en compte l'existence d'une activation dépendante comme le modèle de Gril (Gril (1988)). Le modèle proposé par Saifouni (2014) est axé sur la partition de la déformation (sous l'hypothèse d'une activation indépendante) en remplaçant le terme ε_{ms} dans l'équation 1.14 par ε_{HL} (HL=hygo-lock) qui représente la déformation hygroverrou. En procédant ainsi, les autres effets mécanosorptifs ne sont pas pris en compte. La non prise en compte de ces derniers a été accusée d'être à l'origine de l'écart constaté entre les résultats obtenus avec le modèle développé et ceux expérimentaux (voir figure 1.28).

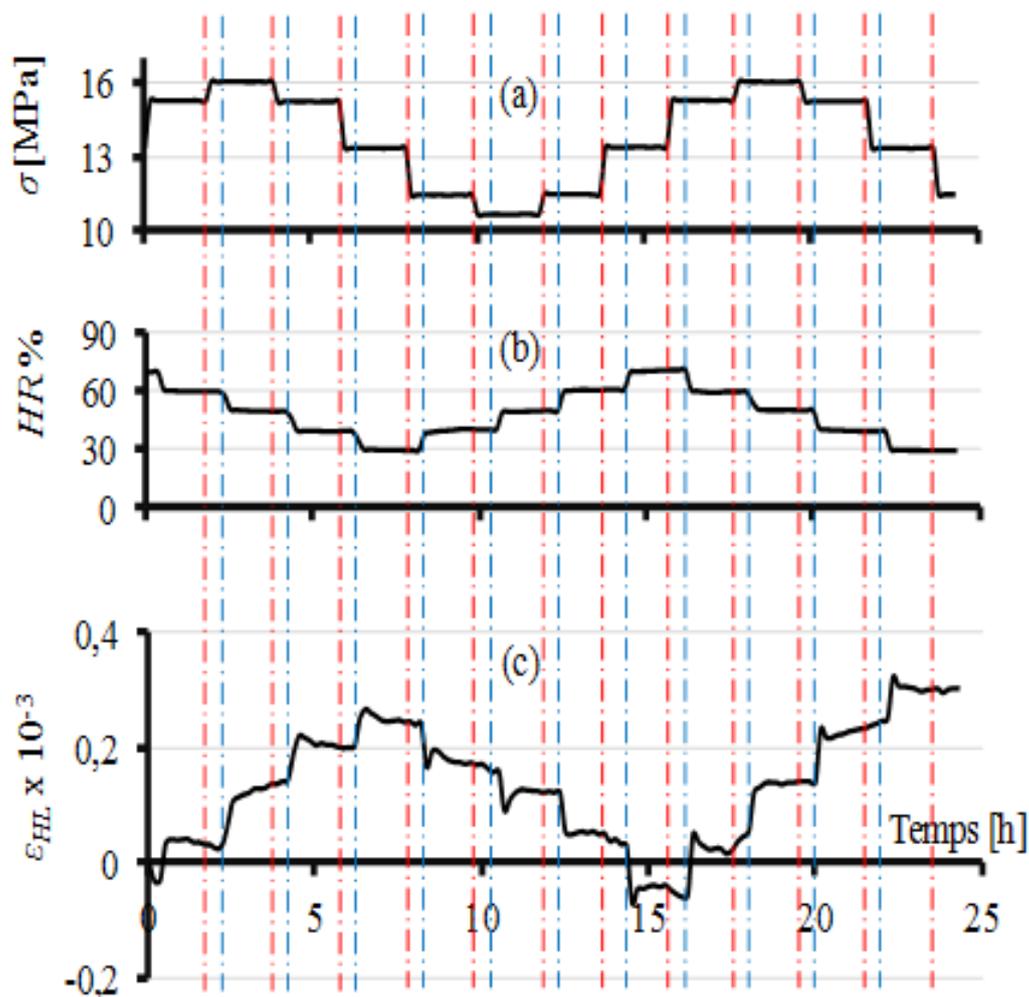


FIGURE 1.27: étude du blocage de déformation en séchage, a)-contrainte cyclique, b)-cycles d'humidité relative, c)-déformation hygroverrou (Saifouni (2014))

Conclusion

Les hétérogénéités du bois de l'échelle macroscopique à l'échelle de la cellule ont été présentées dans ce chapitre. Ce premier point était axé sur l'architecture, l'organisation, l'ultrastructure ainsi que la composition chimique du bois. L'appréhension du caractère hétérogène et multi-échelle est indispensable pour une meilleure caractérisation de ce matériau sous sollicitations hydriques et/ou mécaniques. On peut comprendre à partir de là qu'il peut être parfois indispensable de prendre en considération l'échelle en-dessous de celle sur laquelle on doit travailler pour mieux

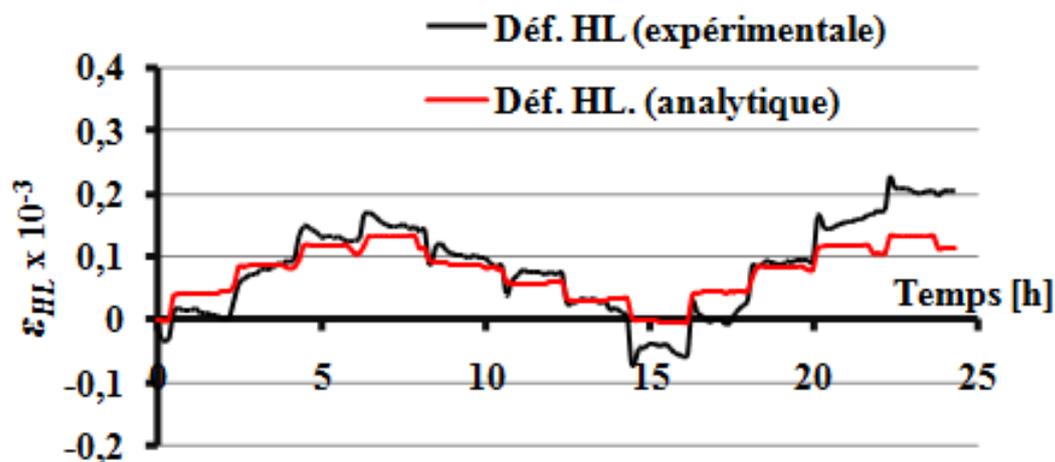


FIGURE 1.28: comparaison de ε_{HL} issue d'un modèle analytique et de résultats expérimentaux (Saifouni (2014))

interpréter les résultats obtenus. La problématique de l'eau dans le bois a été également abordée. En effet, la présence de l'eau dans le bois sous ses différentes formes, son interaction avec ce matériau ainsi que ses modes de transport, ont été discutés. L'impact néfaste des variations hydriques sur le bois en dessous du *PSF* a pu être rappelé. On a vu qu'il existe dans la littérature différentes méthodes pour déterminer les propriétés hydriques du bois.

Cependant, aucune des méthodes ne permet en général une caractérisation complète donnant à la fois les teneurs en eau, les coefficients de diffusion et de retrait/gonflement. Ces méthodes ne prennent pas en compte non plus les hétérogénéités locales du bois liées notamment la présence des cernes. La méthode de la balance en suspension a été appliquée à des éprouvettes de l'ordre de 1 mm d'épaisseur pour leur caractérisation hydrique (Perré et al. (2007)). Il est donc clair qu'on peut se retrouver avec des éprouvettes ne contenant que *EW* ou *LW* notamment lorsque la diffusion est radiale. La notion d'hétérogénéité à l'échelle du cerne trouve toute son essence dans de telles circonstances entre autres. Certains auteurs ont également souligné l'importance de prendre en compte les hétérogénéités. Il y a donc un réel besoin d'établir des méthodes permettant de caractériser de manière complète le bois tout en prenant en compte son caractère hétérogène lié principalement à la présence de *LW* et *EW*.

Le bois sous sollicitations mécaniques en interaction avec son environnement a aussi été abordé. En effet, on a pu voir que les structures de bois en service sous humidité constante ou variable exhibent des comportements très complexes qui sont liés à la durée d'application de la charge (comportement viscoélastique) d'une part, mais aussi au couplage entre le chargement et les variations hydriques (comportement mécanosorptif). Là encore, les données de la littérature que nous avons montrées dans ce chapitre ne prennent pas en compte la présence des gradients locaux de propriétés. Ces derniers doivent être considérés dès que l'on commence à travailler sur des éprouvettes très minces comme c'est le cas en général pour les essais "purement" mécanosorptifs. En effet, plus l'éprouvette est mince plus on se rapproche du comportement lié aux propriétés locales et non globales. Il est donc nécessaire de procéder à des expérimentations permettant de prendre en compte l'hétérogénéité de la réponse du matériau liée à la présence de ces gradients locaux. A partir de là on pourra procéder à une caractérisation locale puis globale des comportements viscoélastique et mécanosorptif du bois.

L'utilisation de techniques de mesures de champs globaux permet d'obtenir une réponse hétérogène d'un matériau à gradients de propriétés comme le bois sous sollicitations hydriques et/ou mécaniques. Il peut être possible ensuite de remonter par identification inverse aux propriétés locales du matériau grâce aux champs hétérogènes obtenus. Le chapitre suivant est consacré à la revue bibliographique des méthodes de mesures de champs et d'identification inverse ainsi que de leur application aux matériaux à gradients de propriétés comme le bois.

Chapitre 2 : Mesures de champs et identification inverse

Introduction

Les techniques de mesures de champs sont largement utilisées dans le domaine de la mécanique expérimentale (Grédiac & Hild (2011)). Elles ont radicalement montré les limites des méthodes classiques de caractérisation comme celles axées sur l'utilisation de jauges extensométriques. En effet, ces dernières donnent une réponse homogène et localisée du matériau testé. Leur usage peut s'avérer intéressant lorsqu'on souhaite une caractérisation homogène du matériau. Cependant, dès qu'on souhaite mettre en relief l'existence de gradients de propriétés liées à la présence hétérogénéités par exemple, le recours aux techniques de mesures de champs devient incontournable car elles permettent de cartographier la réponse du matériau étudié. En effet, les techniques de mesures de champs permettent de révéler des singularités pouvant être liées à des gradients de propriétés, d'endommagement, ou de défauts, dans la réponse d'un matériau.

Par ailleurs, les techniques de mesures de champs, ont bouleversé les méthodes de caractérisation des matériaux. En effet, grâce aux réponses pouvant déceler des hétérogénéités, il est possible de remonter aux propriétés locales d'un matériau.

Dans ce chapitre, une revue bibliographique sur les techniques de mesures de champs et d'identification inverse, est présentée. Ensuite, leurs applications au matériau bois sont présentées et discutées.

1 Méthodes de mesures de champs (2D) appliquées au bois

Dans la littérature il existe différentes techniques de mesures de champs utilisées en mécanique des matériaux et des structures : photoélasticité, méthode de déflectométrie, holographie, interférométrie speckle, etc. (Grédiac & Hild (2011)). Cependant on n'abordera ici que la corrélation d'images numériques (*CIN*), l'imagerie neutronique, l'imagerie par rayons X et la méthode de la grille, et leurs applications au matériau bois.

1.1 Corrélation d'images

Le développement de la *CIN* remonte dans les années 80 (Peters & Ranson (1982), Peters et al. (1983), Sutton et al. (1983)). C'est une méthode très présente

dans le domaine de la mécanique expérimentale (Sutton et al. (2009)). Elle consiste à procéder à une corrélation entre deux images en se basant sur les différences de texture de la surface investiguée de l'objet étudié. Cette surface est en général au préalable marquée avec un mouchetis de peinture afin de rendre possible la corrélation (voir figure 2.1). On procède par maximisation d'une corrélation (numé-

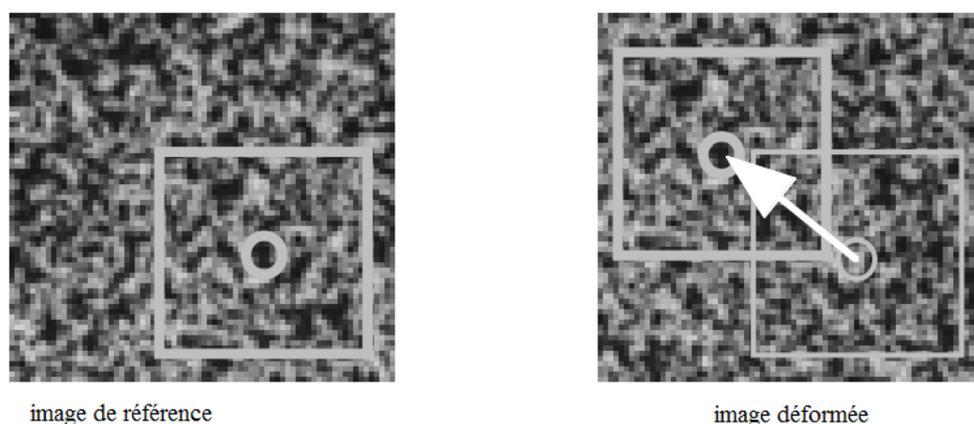


FIGURE 2.1: zones d'investigation sur une image de référence et sur une image déformée (Hild (2004))

riquement avec le plus souvent une interpolation des niveaux de gris afin d'atteindre des performances sub-pixelliques (la taille d'un pixel n'est pas unique) au voisinage de chacun des points homologues (points physiquement identiques) des deux images. Il s'agit de rechercher dans l'image déformée l'endroit où on atteint le maximum de vraisemblance avec l'image considérée dans l'image de référence (Hild (2004)). La reconnaissance des points homologues est rendue possible grâce au motif aléatoire ou au marquage régulier (grille). Lorsque les coordonnées des points homologues sont déterminées, on est capable d'évaluer les déplacements par différence. Les déformations locales sont obtenues par dérivation discrète. Les avantages de la *CIN* sont sans aucun doute sa capacité à utiliser un motif aléatoire, sa facilité de mise en œuvre ainsi que sa précision sub-pixellique (Badulescu (2010)). Cependant, la *CIN* n'est pas recommandée comme un outil efficace pour la mesure de petites déformations non homogènes (Pan et al. (2009)). L'organigramme des différentes étapes d'un algorithme classique de corrélation est montré sur la figure 2.2.

La *CIN* a déjà été appliquée à divers matériaux dont le bois. Pop et al. (2011), Méité et al. (2013), Xavier, Oliveira, Monteiro, Morais & de Moura (2014), Silva

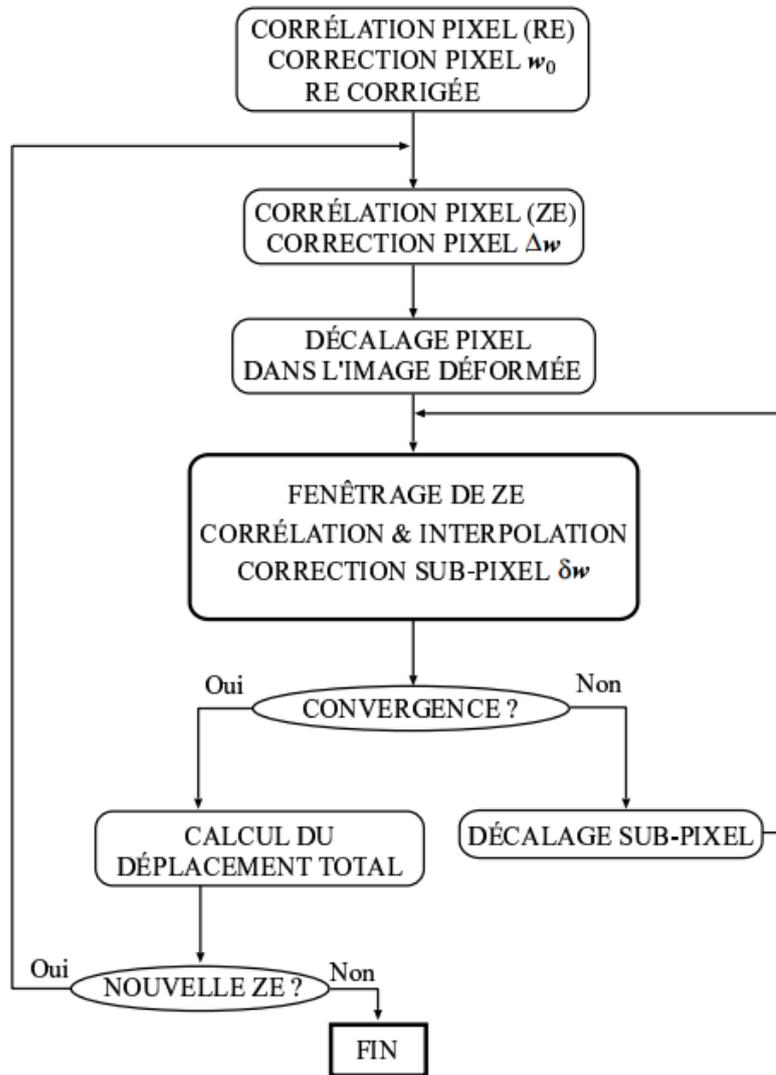


FIGURE 2.2: différentes étapes d'un algorithme classique de corrélation (Hild (2004))

et al. (2014) ont utilisé la *CIN* pour la caractérisation des paramètres de fissuration dans le bois. Gauvin et al. (2014), ont effectué des essais d'adsorption longitudinale sur des échantillons (épaisseur 6 à 10 mm) de peuplier (*Populus*) en utilisant la corrélation d'image. Les éprouvettes ont été initialement stabilisées à 75 % puis à 90 % (à 20 °C) d'humidité relative. Quelques uns des résultats obtenus sont présentés sur les figures 2.3 et 2.4. Les cartes sur les figures 2.3-a et 2.4-a permettent de noter une réponse hétérogène du matériau bois pour les deux types d'éprouvettes.

Les coupes montrées sur les 2.3-b et 2.4-b confirment ce constat. Néanmoins, même si les auteurs ont délimité l'emplacement de *LW* sur la figure 2.3-b, il est quand même très difficile d'en être sûr d'autant plus qu'il s'agit d'un feuillu. En effet, ils n'ont pas pu localiser l'emplacement du bois de transition et de *EW*, ce qui rend très délicate la tâche de cette délimitation pour *LW*. De plus, ils n'ont pas extrait les déformations dans *LW* et dans *EW*. Par conséquent aucune caractérisation n'a été faite pour *EW* ou pour *LW*.

Dans des travaux plus récents, Sanabria et al. (2015) ont étudié les déformations hydriques du bois par la *CIN*. Cette fois la méthode est appliquée à un résineux (*Picea abies* Karst). La figure 2.5 montre le scan de la face de l'éprouvette investiguée et les cartes de déformation obtenues pour une adsorption à 95%. Comme on le voit sur cette figure, la réponse du matériau bois est hétérogène. On distingue nettement le gradient de déformation à l'échelle du cerne de croissance. Néanmoins, aucune extraction de déformation dans *EW* ou *LW* n'a été faite. De plus aucune caractéristique du comportement hydrique de *LW* ou de *EW* n'a été évaluée.

1.2 Imagerie neutronique

L'imagerie neutronique (IN) est une technique non-destructive d'investigation de milieux matériels. Un neutron interagit faiblement avec la plupart des matériaux. Cependant, il interagit fortement avec certains composants chimiques notamment l'hydrogène. Cette technique est largement utilisée pour l'étude de la dynamique des fluides hydrogénés comme l'eau liée ou libre dans les matériaux comme les géomatériaux (sol, roche) et les matériaux biologiques (bois, composites à fibres végétales,...), (Penumadu (2009), Lehmann (2009), Kardjilov et al. (2011)). Dans des travaux très récents, Sanabria et al. (2015) ont développé un algorithme nommé *ANRC* ("Adaptive Neutron Radiography Correlation"). Cet algorithme permet de calculer localement les champs de déformation à partir de la texture d'images obtenues par IN. Les champs de déformations sont issus de la dérivation des déplacements qui sont calculés en corrélant chacune des images par rapport à une image de référence. La teneur en eau peut être déduite à partir des déformations. L'*ANRC* a été appliqué à des images obtenues sur des éprouvettes d'épicéa (*Picea abies* Karst) en adsorption. Les résultats obtenus avec cet algorithme ont été comparés à ceux obtenus avec la *CIN* (voir figure 2.5). Cette méthode permet de distinguer les niveaux de déformations hydriques à l'échelle du cerne. La figure 2.6 présente les cartes de déformation

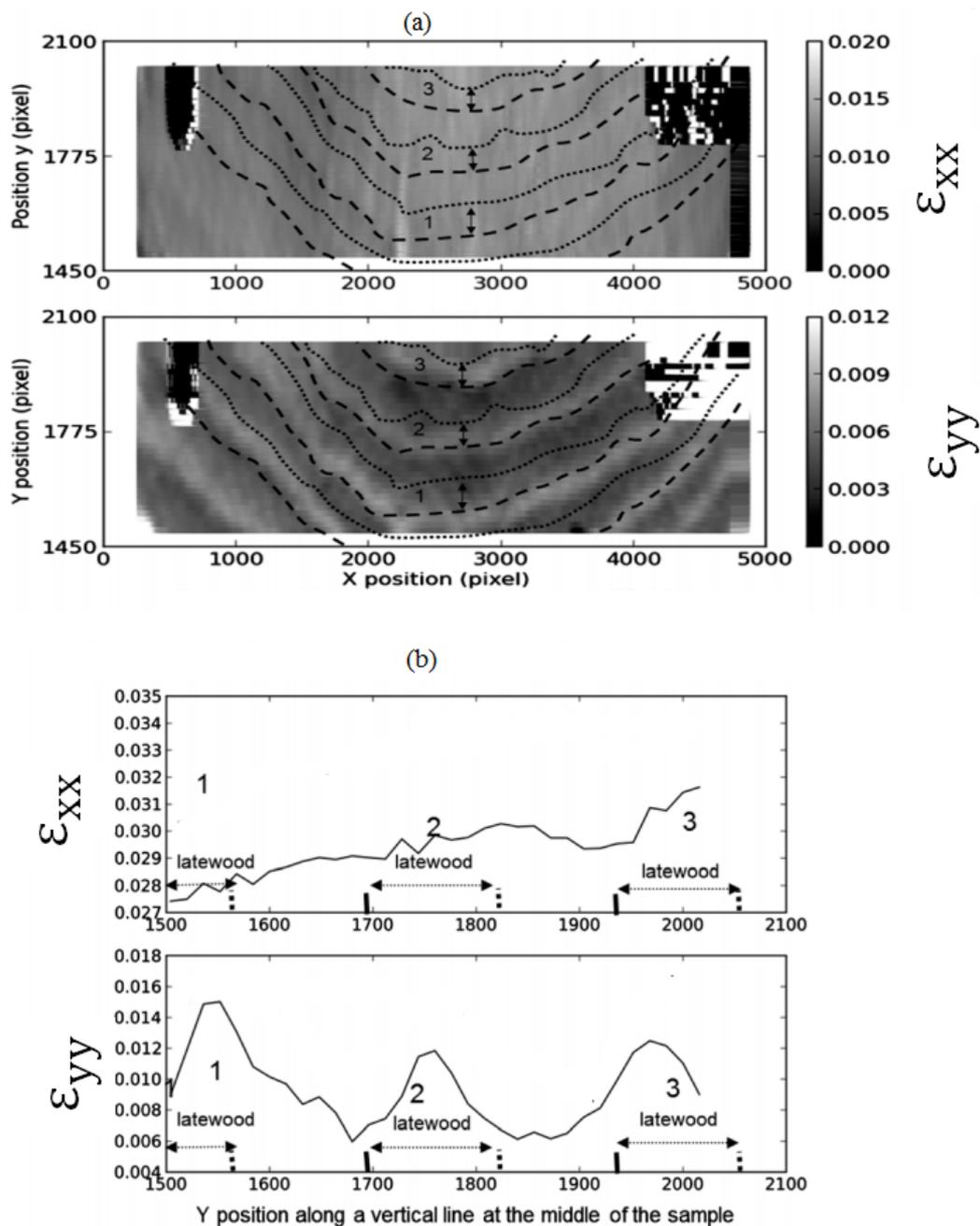


FIGURE 2.3: résultats expérimentaux (coupe dorsale), a)-cartes de déformations, b)-coupes horizontales au milieu de l'éprouvette (HR : 75-90 %, à 20°C), (adapté de Gauvin et al. (2014))

de l'une des éprouvettes testées. Les cartes de déformations données dans cette figure ont été déterminées pour une image à HR=95 %. L'image de référence utilisée

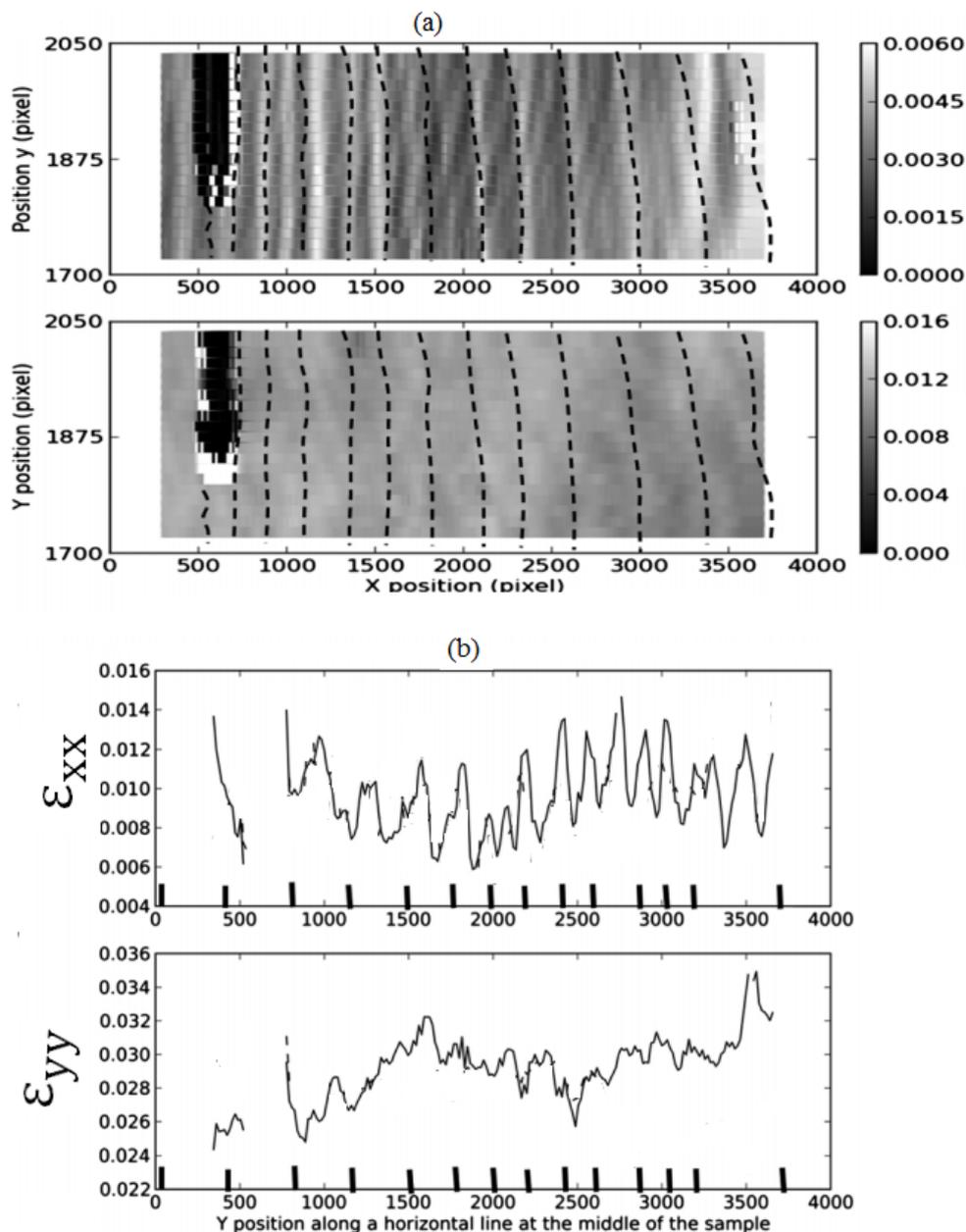


FIGURE 2.4: résultats expérimentaux (coupe sur quartier), a)-cartes de déformations, b)-coupes verticales au milieu de l'éprouvette (HR : 75-90 %, à 20 °C), (adapté de Gauvin et al. (2014))

est celle de HR=0 %. On peut constater que *LW* se déforme plus que *EW*. Pour obtenir les déformations de l'éprouvette testée dans le plan (R,T), il y a nécessité de déterminer l'angle d'inclinaison des cernes. En effet, ces derniers n'étant pas droits,

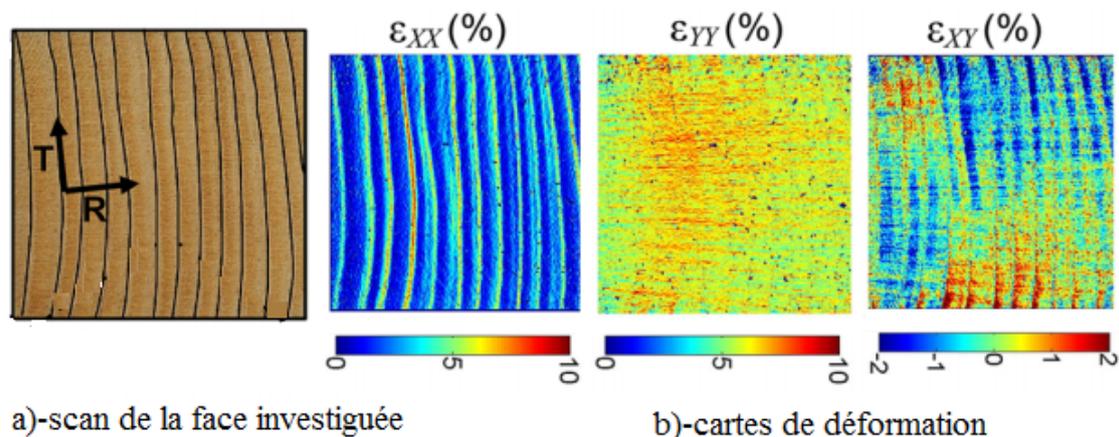


FIGURE 2.5: résultats expérimentaux avec la *CIN*, a)-scan de la face investiguée, b)-cartes de déformations, (HR=95 %), (adapté de Sanabria et al. (2015))

un changement de base est donc indispensable pour obtenir les déformations dans le plan matériel de la face investiguée. Pour plus de détails sur cet algorithme, voir Sanabria et al. (2015).

1.3 Imagerie par rayons X

La méthode d'imagerie par rayon X est une technique similaire à l'imagerie par neutrons mais moins sensible aux composants du bois que cette dernière (Mannes et al. (2007)). L'imagerie par rayons X est largement utilisée pour la caractérisation du bois. Marčok et al. (1996) l'ont appliquée pour identifier la présence du bois de réaction dans le hêtre. D'autres auteurs comme Sahlberg et al. (1997) et Cave (1997) ont évalué l'angle des microfibrilles dans le bois grâce cette méthode. Freyburger et al. (2009) ont utilisé cette méthode pour déterminer les profils de densité du bois. Tanaka et al. (2009) ont étudié les profils de teneur en eau au cours du séchage du cèdre du Japon. Leur étude a été faite sur trois échantillons avec trois plans de coupe différents : (L,R), (L,T),(R,T). La figure 2.7-a et -b présente respectivement la cartographie des teneurs en eau obtenues par rayons X de l'éprouvette (L,R) et des coupes radiales et longitudinales à différents instants lors du processus de séchage. Les figures 2.8 et 2.9 montrent les mêmes résultats obtenus sur les éprouvettes (L,T) et (R,T). On remarque bien la variabilité de la teneur en eau à l'échelle du cerne annuel de croissance. La figure 2.9 montre une différence notable (notamment à 0 heure) entre les profils de teneur en eau données par les coupes *E* et *F*. Ce constat

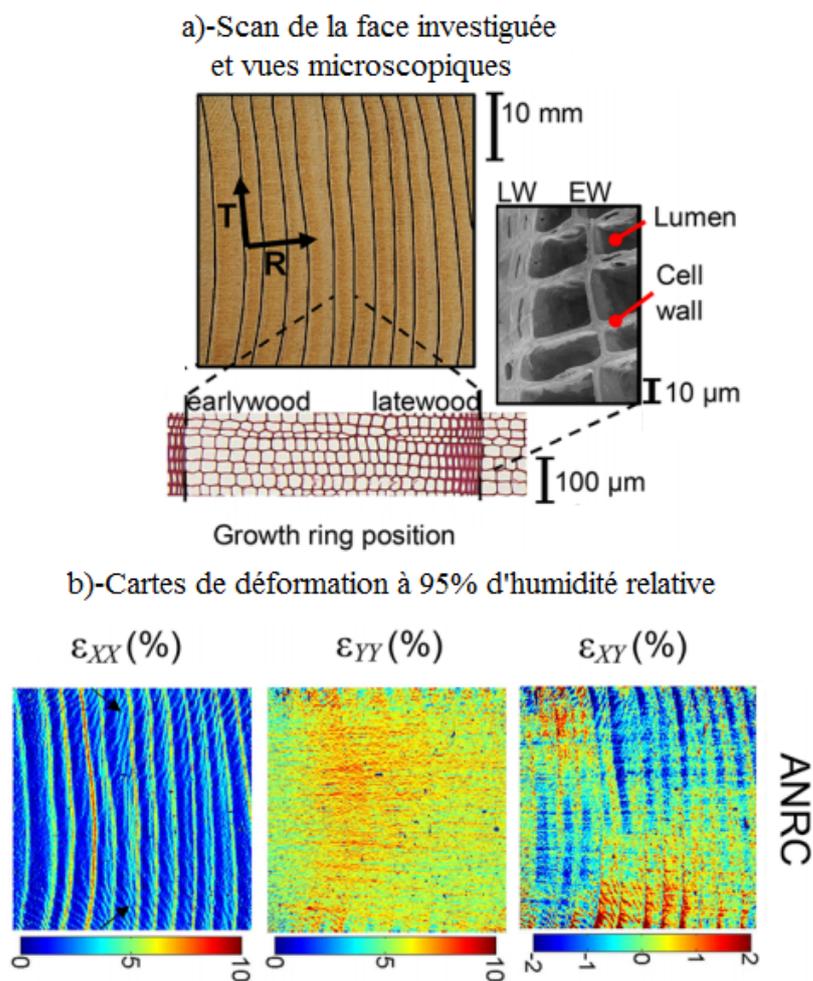


FIGURE 2.6: cartes de déformation en adsorption obtenues avec l'ANRC (HR=95 %), (Sanabria et al. (2015))

est sans aucun doute lié à la position relative des directions de coupe par rapport aux cernes annuels de croissance. Ces études ont été capables de donner une réponse hétérogène du matériau bois, mais aucune caractérisation de *LW* ou de *EW* n'a été faite en utilisant les profils de teneur en eau.

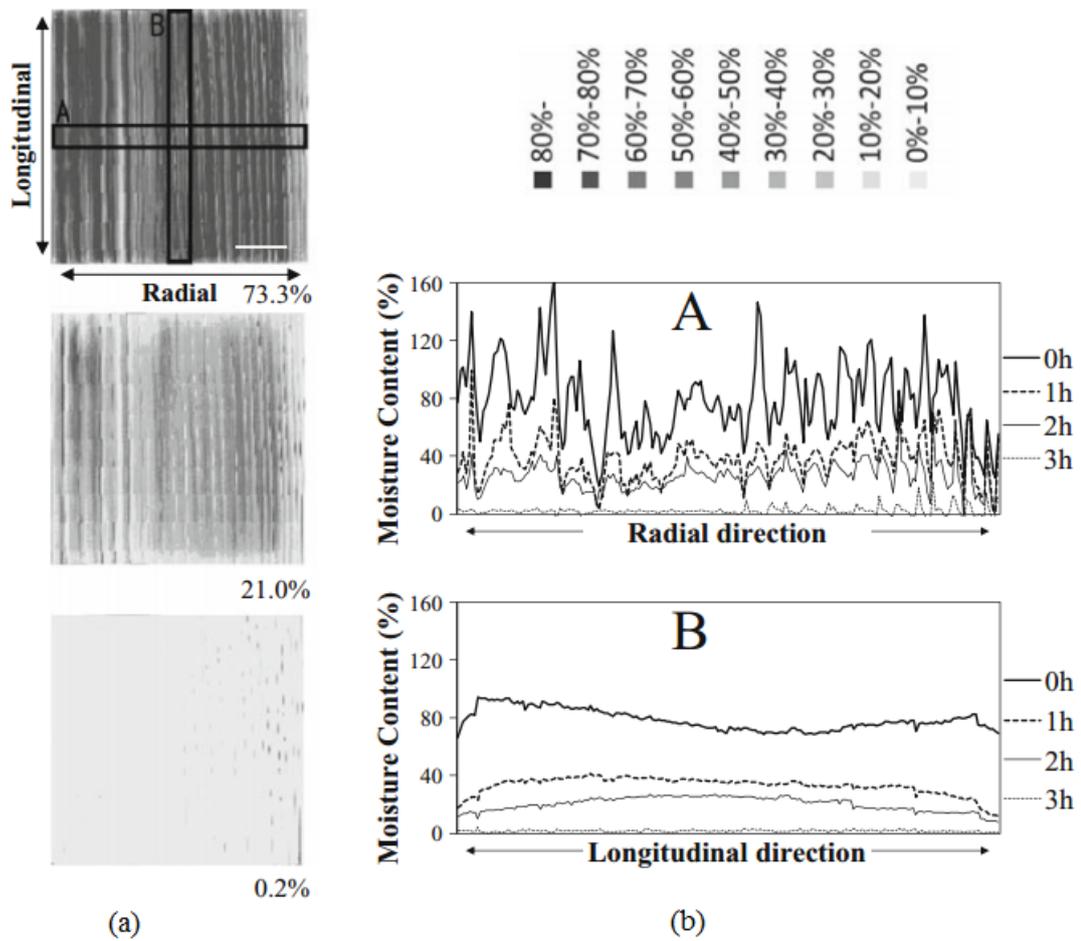


FIGURE 2.7: cèdre du Japon, éprouvette (L,R) sous séchage, a)-images par rayons X, b)-coupes suivant les deux directions, (Tanaka et al. (2009))

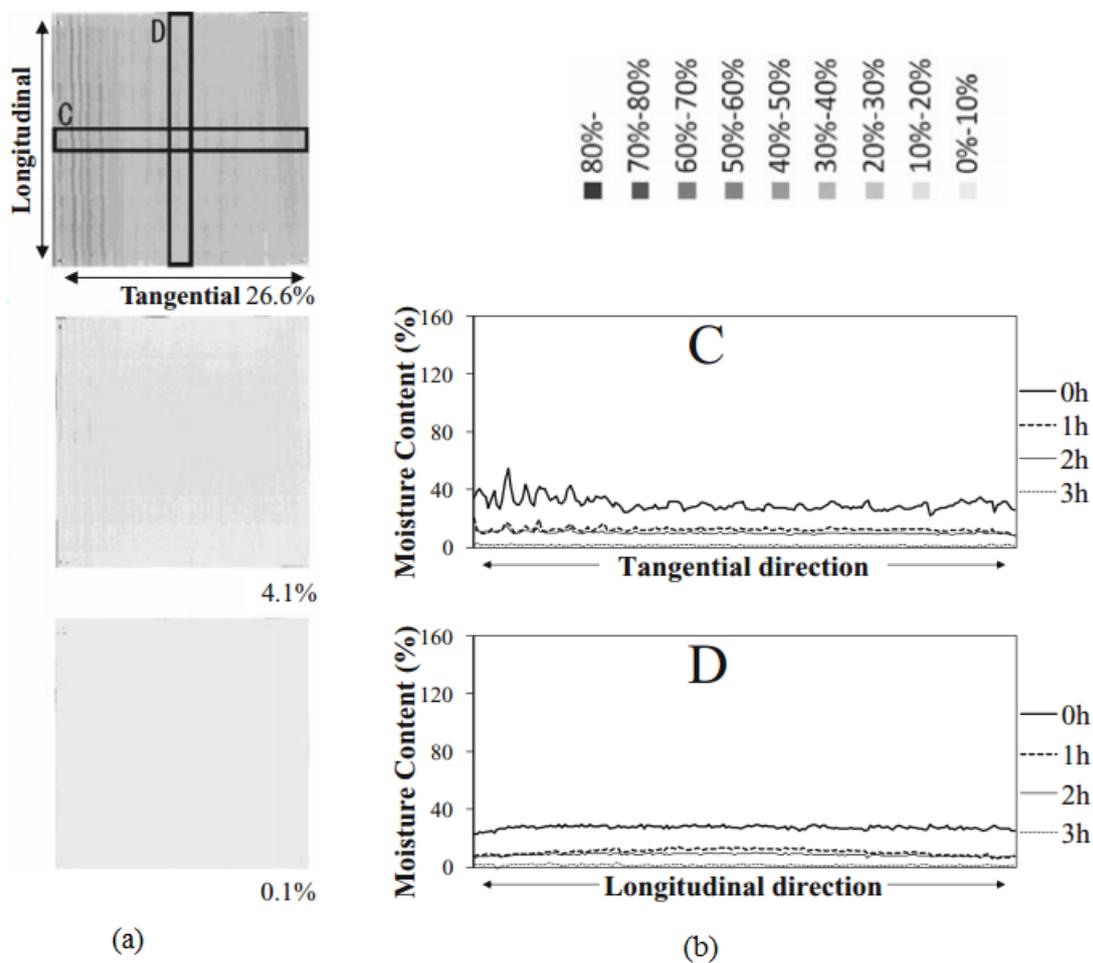


FIGURE 2.8: cèdre du Japon, éprouvette (L,T) sous séchage, a)-images par rayons X, b)-coupes suivant les deux directions, (Tanaka et al. (2009))

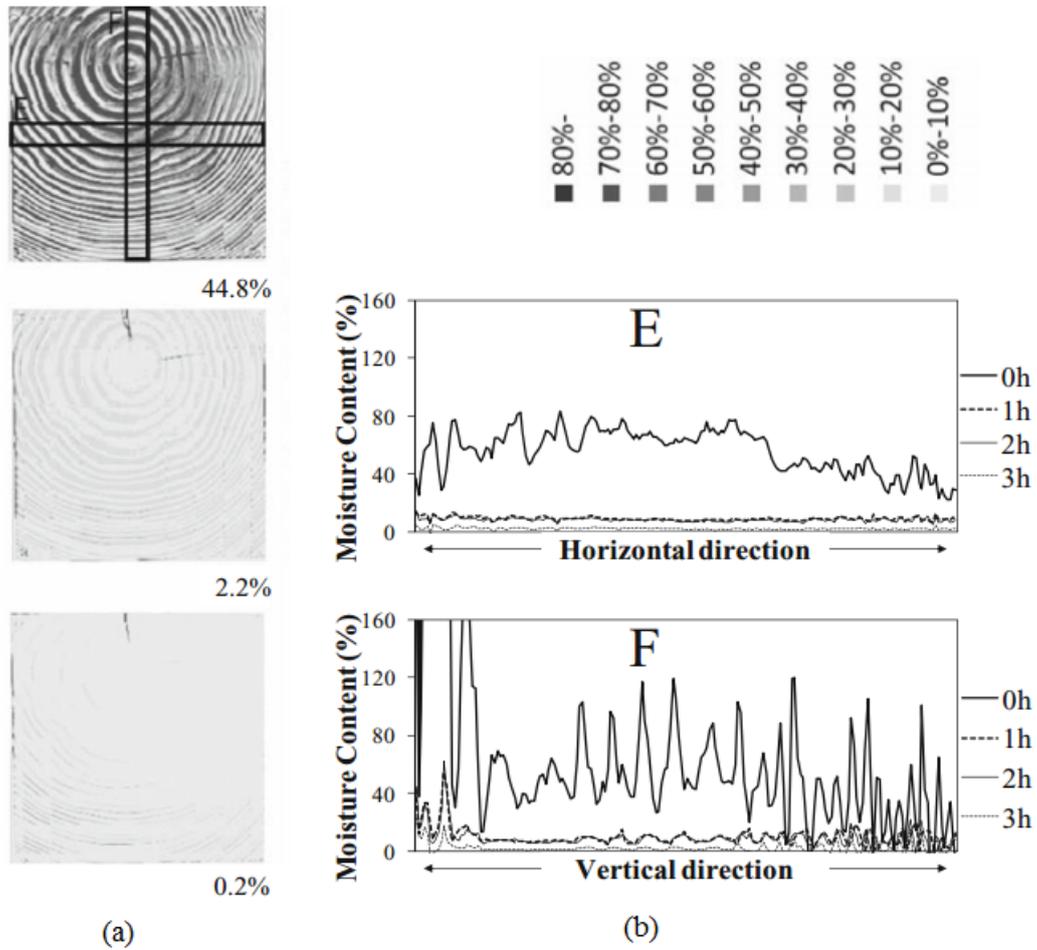


FIGURE 2.9: cèdre du Japon, éprouvette (R,T) sous séchage, a)-images par rayons X, b)-coupes suivant les deux directions, (Tanaka et al. (2009))

1.4 Méthode de la grille

La méthode de la grille est une technique de mesure sans contact en lumière blanche. Elle repose sur l'étude d'un codage périodique de la surface de l'éprouvette à investiguer. Ce codage s'obtient en transférant une grille périodique selon la procédure décrite par Piro & Grédiac (2004). La grille peut être unidimensionnelle ou croisée. Le principal avantage de cette méthode est sans aucun doute lié à l'étude d'un signal périodique. Ceci permet de procéder par analyse de Fourier pour le traitement de celui-ci. En pratique, lors d'une expérimentation, le suivi de la grille s'effectue grâce à une caméra numérique. On rappelle ici la théorie de cette méthode. Soit une grille croisée (à pas égal) dont les axes x et y sont parallèles à ses lignes (voir figure 2.10). L'intensité $S(x, y)$ à chaque pixel de coordonnées (x, y)

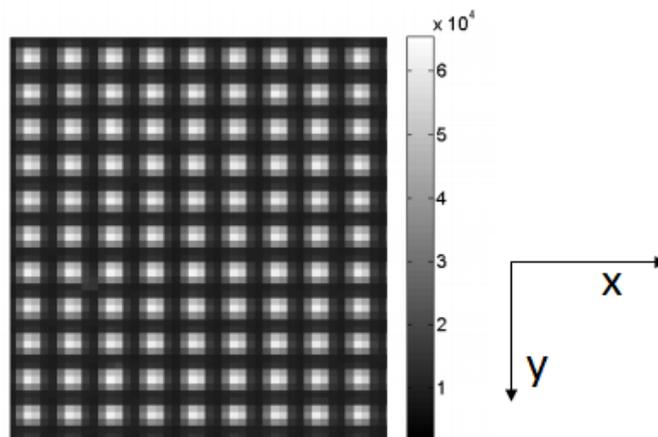


FIGURE 2.10: exemple de grille croisée, (Badulescu (2010))

peut être modélisée par l'équation 2.1 (Badulescu et al. (2009), Badulescu (2010)) :

$$S(x, y) = \frac{A}{2} [2 + \gamma \cdot \text{frgn}(2\pi f x + \Phi_x) + \gamma \cdot \text{frgn}(2\pi f y + \Phi_y)] \quad (2.1)$$

où γ est le contraste, A est l'amplitude, frgn est une fonction périodique de période 2π et f la fréquence de la porteuse prise égale à l'inverse du pas p . Φ_x et Φ_y sont respectivement les phases le long des axes x et y , Badulescu et al. (2009).

La relation linéaire entre Φ_x (respectivement Φ_y) au déplacement u_x (respectivement u_y), est présentée dans l'équation 2.2 :

$$\begin{cases} u_x &= \frac{-p}{2\pi} \Delta \Phi_x \\ u_y &= \frac{-p}{2\pi} \Delta \Phi_y \end{cases} \quad (2.2)$$

$\Delta \Phi_x$ et $\Delta \Phi_y$ sont les variations de phase calculées à partir des images finale et initiale par le biais de la transformée de Fourier fenêtrée selon les axes x et y . Cette transformée de Fourier est définie comme indiquée dans l'équation 2.3 :

$$\Psi(x, y, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\xi, \eta) g(\xi - x, \eta - y) \exp(-i2\pi f(\xi \cos\theta + \eta \sin\theta)) d\xi d\eta \quad (2.3)$$

où g est une fenêtre permettant de récupérer l'information en son centre (x, y) . Cette fenêtre peut avoir différentes formes. Une fenêtre gaussienne est en générale utilisée de par sa dérivabilité. Elle constitue un optimum vis-à-vis de différents critères notamment l'absence d'harmoniques dans les cartes finales obtenues (Grédiac et al. (2016)). L'enveloppe gaussienne est donnée par :

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2 - y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.4)$$

où σ est l'écart-type de la distribution de g . La distance entre deux mesures indépendante (résolution spatiale) peut est considérée comme étant égale à $\pm 3\sigma$ (Badulescu et al. (2009)). L'équation 2.3 réécrite avec respectivement $\theta = 0$ et $\theta = \frac{\pi}{2}$, permet d'investiguer les axes vertical et horizontal de la grille :

-pour $\theta = 0$

$$\Psi(x, y, \theta = 0) = R_x + iJ_x = M_x \exp(i\Phi_x) \quad (2.5)$$

d'où $\Phi_x = \text{atan}\left(\frac{J_x}{R_x}\right)$, avec R_x , J_x et M_x , respectivement les parties réelle et imaginaire et le module du nombre complexe $\Psi(x, y, \theta = 0)$.

-pour $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$\Psi(x, y, \theta = \frac{\pi}{2}) = R_y + iJ_y = M_y \exp(i\Phi_y) \quad (2.6)$$

d'où $\Phi_y = \text{atan}\left(\frac{J_y}{R_y}\right)$, avec R_y , J_y et M_y , respectivement les parties réelle et imaginaire et le module du nombre complexe $\Psi(x, y, \theta) = \frac{\pi}{2}$.

Dans l'hypothèse des petites déformations on peut exprimer les déformations comme

dans l'équation 2.7 :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \end{cases} \quad (2.7)$$

En combinant les équations 2.2 et 2.7, les déformations peuvent être réécrites comme indiqué dans l'équation 2.8.

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{-p}{2\pi} \Delta \left(\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_y = \frac{-p}{2\pi} \Delta \left(\frac{\partial \Phi_y}{\partial y} \right) \\ 2\varepsilon_{xy} = \frac{-p}{2\pi} \left[\Delta \left(\frac{\partial \Phi_x}{\partial y} \right) + \Delta \left(\frac{\partial \Phi_y}{\partial x} \right) \right] \end{cases} \quad (2.8)$$

La connaissance de Φ_x et Φ_y via les équations 2.5 et 2.5 permet d'obtenir les champs de déplacements et de déformations grâce aux équations 2.2 et 2.8. Pour plus de détails sur la méthode de la grille, voir Badulescu et al. (2009), Badulescu (2010), Grédiac et al. (2016).

La méthode de la grille a été utilisée pour étudier différents types de matériaux. Badulescu et al. (2009) l'ont appliquée pour étudier le comportement d'une plaque trouée en aluminium. Lors de son stage de master au sein du laboratoire Institut Pascal, Viguié (2012) a réalisé des essais de flexion 3 points sur un bicouche constitué d'une superposition de deux essences de bois : le pin et l'ayous. Les cartes de déformations ont permis de mettre en évidence le caractère hétérogène de la réponse en termes de déformations. En effet, pour le pin, on distingue nettement le gradient de déformation à l'échelle du cerne (voir figure 2.11-b). L'ayous étant une essence tropicale, la notion de *EW* et *LW* y est absente, c'est pour cela qu'on ne distingue pas de gradient comme c'est le cas pour le pin. Moutou Pitti et al. (2014) ont étudié le taux de restitution d'énergie d'une éprouvette en aluminium en fissuration. Grédiac & Toussaint (2013) ont étudié le comportement d'un enrobé bitumineux. Cette étude a révélé le caractère hétérogène de la réponse d'un tel matériau sous sollicitation mécanique (compression). En effet, ils ont pu mettre en évidence le gradient de déformation entre le liant (bitume) et les granulats (voir figure 2.12). Ceci montre la capacité de la méthode de la grille à révéler l'existence de gradients de propriétés au sein des matériaux hétérogènes. La méthode de la grille présente un bon compromis

entre la résolution de mesure (ce qui sort du bruit) et résolution spatiale (capacité à discerner les petits détails dans une carte). Il faut noter que les performances liées à la résolution spatiale et la résolution de mesure varient de manière antagoniste. En effet, plus le pas de la grille utilisée est petit, meilleure sera la résolution spatiale mais la surface de l'échantillon observable par la caméra sera plus petite. De plus, ceci accentue la sensibilité de la technique aux micro-mouvements parasites entre l'éprouvette étudiée et la caméra. La résolution spatiale peut être prise comme étant un multiple de l'écart-type de la fenêtre gaussienne. Elle s'apparente à la taille de la fenêtre gaussienne qui est égale à six fois l'écart-type de cette dernière. La résolution de mesure en déformation de la méthode de la grille est de l'ordre de quelques 10^{-4} (Grédiac & Sur (2014)). Les résultats obtenus par la méthode de la grille sont aussi affectés par le biais de mesure. Sa valeur dépend de la signature fréquentielle de la carte en chaque point considéré (Grédiac & Sur (2014), Grédiac et al. (2016)). Il n'est donc pas possible de donner une valeur unique représentative du biais pour la méthode de la grille. Néanmoins, une étude des performances métrologiques de la méthode de la grille a montré qu'elle demeure une technique efficace pour la caractérisation de gradients de propriétés (Grédiac et al. (2016)). Elle sera donc utilisée dans ce travail.

Les techniques de mesures de champs ont facilité la résolution des problèmes inverses en mécanique expérimentale. La section 2 est dédiée aux méthodes d'identification inverse.

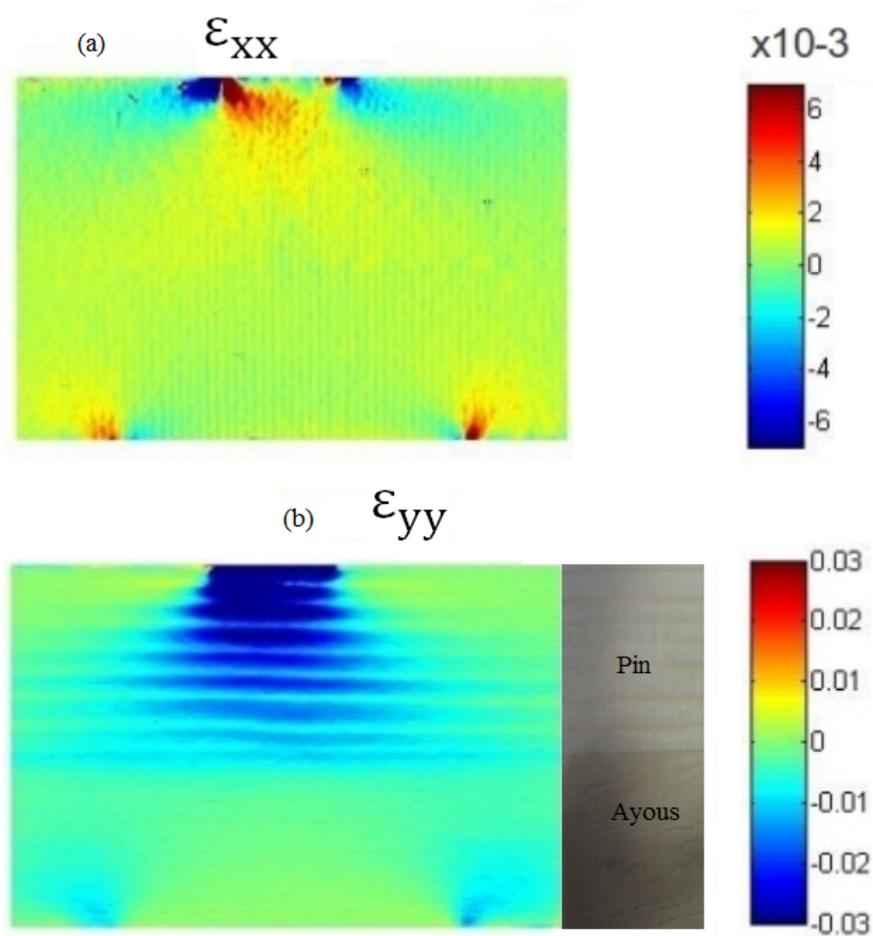
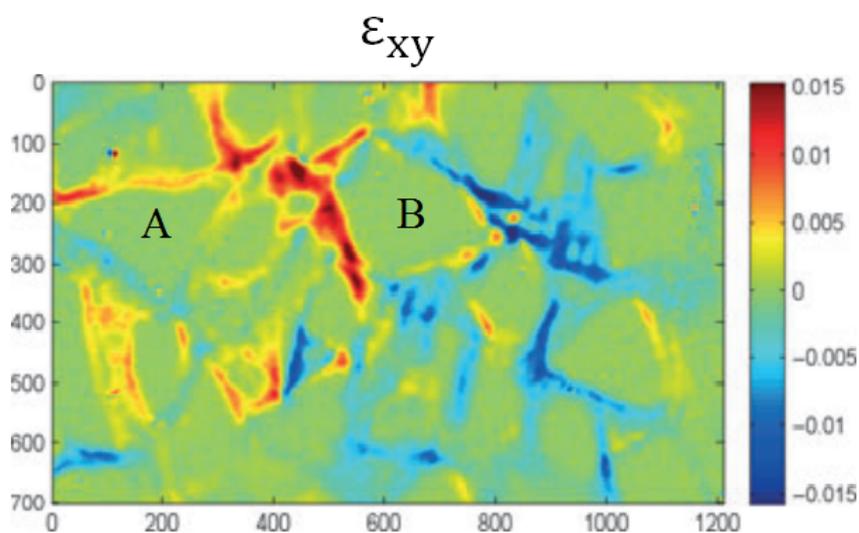
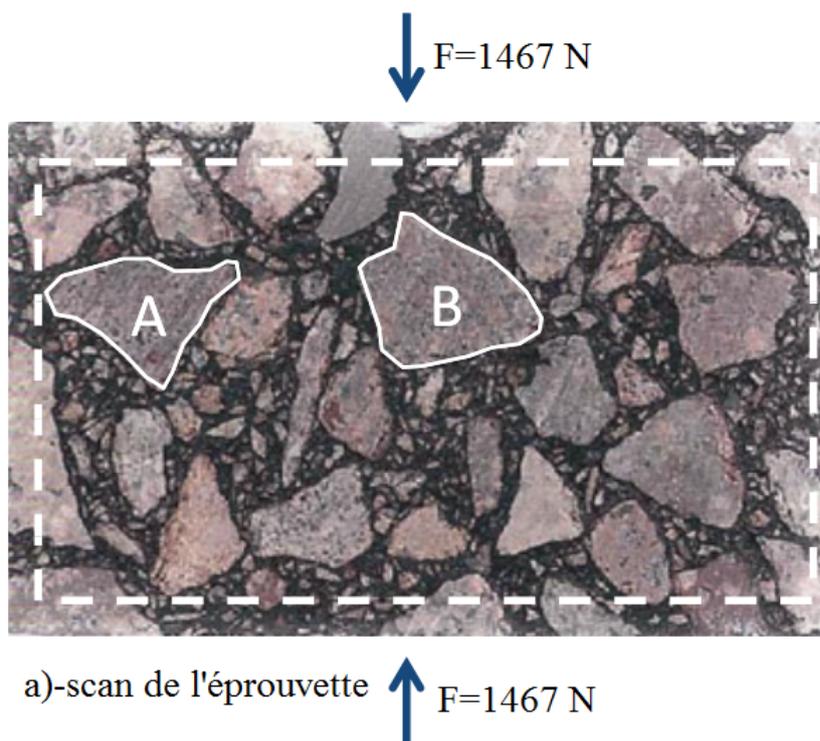


FIGURE 2.11: exemple de cartes de déformation obtenues en flexion 3 points d'un bicouche (pin+ayous), (Viguié (2012))



b)-carte de déformation en cisaillement

FIGURE 2.12: exemple de carte de déformation sur un enrobé bitumineux (axes en pixels, 1 pixel= $40\ \mu\text{m}$), (Grédiac & Toussaint (2013))

2 Identification inverse

2.1 Problème direct/problème inverse

Dans ce paragraphe on s'intéresse à la définition du problème direct et du problème inverse. Le problème direct consiste à déterminer les champs de contrainte, de déformation, ou de déplacement, connaissant la géométrie de la structure, ses conditions aux limites ainsi que les paramètres de comportement du matériau utilisé. C'est un problème classique de la mécanique des structures. Dans un problème inverse, on cherche à déterminer les paramètres du matériau. Contrairement au problème direct, les champs de déformation, ou de déplacement, sont connus. Comme dans un problème direct, la géométrie ainsi que les conditions aux limites sont des données du problème inverse. Le tableau 2.1 présente les données et les inconnues des problèmes direct et inverse. Les méthodes de mesures de champs ont rendu plus efficace la résolution des problèmes inverses. En effet, comme on l'a déjà mentionné précédemment, celles-ci permettent d'obtenir une réponse hétérogène du matériau. Ceci rend possible l'identification de plus de paramètres avec moins d'essais expérimentaux mais aussi la caractérisation des gradients de propriétés exhibés par le biais de la réponse hétérogène (Grédiac (1996, 2004)). Dans la littérature il existe différents méthodes d'identification inverse en mécanique expérimentale. Quelques unes de ces méthodes utilisées pour l'évaluation de paramètres de comportement mécanique, sont abordées dans la suite de ce chapitre.

	Problème direct	Problème inverse
Données	géométrie	géométrie
	loi de comportement	loi de comportement
	distribution de l'effort f	résultante de l'effort f
	paramètres du matériau	champs de déformation
Inconnues	champs de déformation	paramètres du matériau

TABLE 2.1: données et inconnues des problèmes direct et inverse, (Grédiac (2004))

2.2 Quelques méthodes d'identification inverse

Comme mentionné ci-dessus, quelques méthodes d'identification inverse sont discutées dans les paragraphes qui suivent. L'objectif n'étant pas de rentrer dans leur

formulation mathématique. Il s'agit ici de donner quelques exemples de méthodes d'identification utilisant des données obtenues par mesures de champs. On se contentera juste de rappeler le principe de chaque méthode. Dans la littérature, en mécanique expérimentale, on distingue entre autres les méthodes inverses suivantes :

- méthode de l'erreur en relation de comportement (*ERC*) : l'*ERC* est une mesure énergétique de l'écart entre deux champs de contrainte. Le premier champ est obtenu à partir d'une mesure de déplacement et de la donnée d'une relation de comportement. Ce premier champ de contrainte est dit cinématiquement admissible. Le deuxième champ quant à lui est statiquement admissible. C'est-à-dire qu'il vérifie les conditions limites en effort. Cette méthode initialement établie pour estimer l'erreur dans les calculs aux éléments finis, est devenu un outil d'identification paramétrique pour une loi de comportement donnée (Ladevèze et al. (1999), Pottier (2010)).
- méthode des champs virtuels (*MCV*) : la *MCV* est une méthode d'identification paramétrique largement utilisée dans la mécanique expérimentale. Cette méthode est apparue dans les années 80 (Grédiac (1989)). Elle est basée sur le principe des travaux virtuels. Elle permet l'identification directe des paramètres recherchés à partir de champs expérimentaux de déformation et de déplacement. Ces champs sont obtenus à partir de techniques de mesures de champs comme la méthode de la grille ou la *CIN*. Son application nécessite la construction de champs virtuels pouvant être définis sur toute la géométrie du domaine étudié ou par morceaux (Guo (2007), Syed-Muhammad (2007)). Cette méthode a connu des développements facilitant son application notamment avec la construction de champs virtuels dits spéciaux (Grédiac et al. (2002*a,b*, 2003)).
- méthode de recalage de modèle éléments finis (*FEU*) : la méthode de recalage de modèles éléments finis (Finite Element Model Updating (*FEMU*) en anglais) est axée sur le calage d'un modèle éléments finis sur des champs expérimentaux via un algorithme d'optimisation. L'approche originale a été présentée par Kavanagh & Clough (1971). Il existe différentes approches de cette méthode : en force (*FEMU* – *F*), en déplacement (*FEMU* – *U*). On trouve dans la littérature d'autres approches comme l'approche mixte en force et en déplacement (*FEMU* – *U* – *F*, figure 2.13), (Pottier (2010)). Cette dernière approche est axée sur un problème d'optimisation établi à partir des

champs de déplacements mesurés et calculés, et des efforts mesurés et calculés. Le jeu de paramètres à retenir doit rendre minimale la fonction coût construite à partir de ces données.

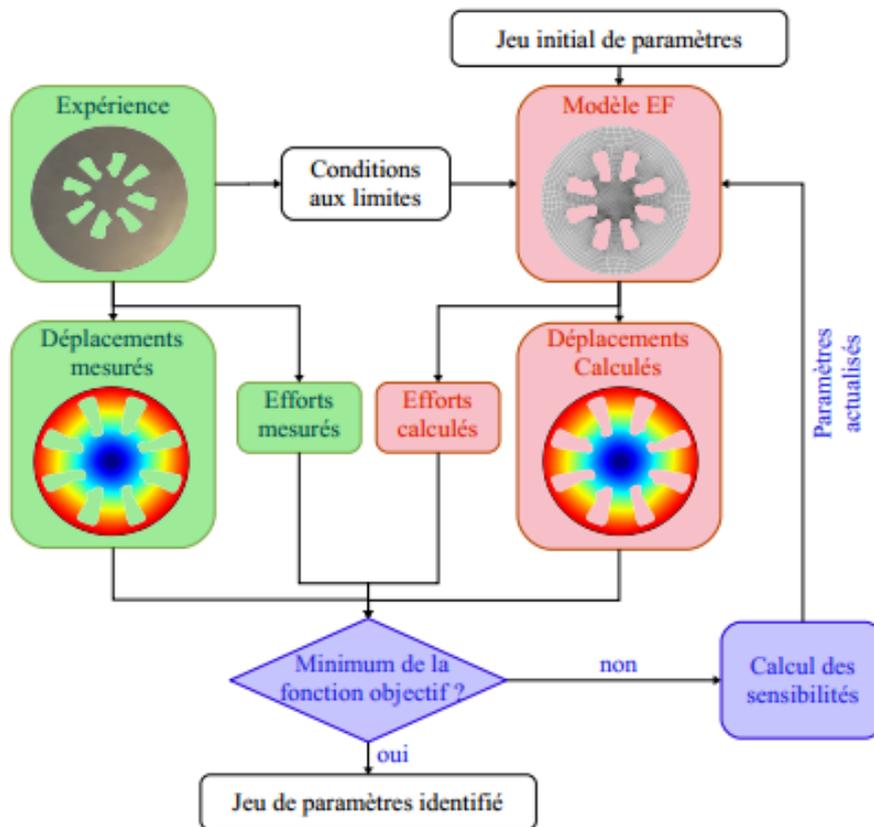


FIGURE 2.13: principe de la méthode inverse de type recalage de modèle éléments finis ($FEMU - U - F$), (Pottier (2010))

2.3 Applications des méthodes d’identification inverse pour la caractérisation du bois

Parmi les méthodes inverses présentées ci-dessus, aucune n’a jamais été utilisée pour caractériser le bois sous sollicitations hydriques ou hydromécaniques. Liu et al. (2001) ont proposé une méthode d’identification inverse pour la détermination du coefficient de diffusivité hydrique du bois. Nguyen (2014) a également mise en œuvre une méthode d’identification inverse pour une caractérisation du comportement du bois sous sollicitations hydriques. La figure 2.14 montre l’organigramme de cette

méthode. A partir d'un jeu de paramètres initiaux, la solution du problème de diffusion en terme de teneurs en eau est estimée par différences finies. Ces teneurs en eau issues du calcul numérique sont combinées avec celles obtenues par pesée pour construire une fonction coût. La résolution du problème consiste ensuite à minimiser cette fonction grâce à l'algorithme du Simplexe. Nguyen (2014) a obtenu la même évolution de teneur en eau en considérant comme condition aux limites une teneur en eau imposée d'une part, et en prenant en compte comme condition aux limites un échange surfacique (voir figure 2.15).

Leurs méthodes sont basées sur une résolution de la loi de Fick unidimensionnelle. Cependant, elles n'utilisent qu'une réponse homogène du matériau (teneur en eau totale). En effet, les auteurs n'ont pas pu prendre en compte les gradients de propriétés notamment liés à la présence de LW et de EW . De plus, elles ne permettent pas d'obtenir le coefficient de retrait/gonflement donc ne donnent aucune information sur l'état de déformation du matériau étudié. Par conséquent, la caractérisation est incomplète. La mise en œuvre de méthodes d'identification inverse construites à partir d'une réponse hétérogène issue d'une technique de mesures de champs est donc nécessaire afin d'évaluer les paramètres de comportement hydrique ou hydro-mécanique de EW et de LW .

Conclusion

Dans ce chapitre, quelques techniques de mesures de champs largement utilisées dans le domaine de la mécanique expérimentale, ont été présentées. Elles ont radicalement montré les limites des méthodes de caractérisation homogène de matériaux hétérogènes. En effet, comme on a pu le voir ces techniques permettent de révéler des singularités pouvant être liées à des gradients de propriétés notamment la présence de EW et de LW . On a pu s'apercevoir que leur utilisation permettait d'obtenir une réponse du matériau sous diverses sollicitations sans émettre d'hypothèses sur les conditions limites, les paramètres géométriques ou structuraux.

Par ailleurs, les techniques de mesures de champs ont rendu plus pratique la résolution des problèmes d'identification inverse. En effet, grâce aux réponses pouvant déceler des hétérogénéités, il est possible de remonter jusqu'aux propriétés locales d'un matériau. Cependant, aucune des méthodes d'identification inverse présentées dans ce chapitre n'a été utilisée pour une caractérisation du bois sous sollicitations

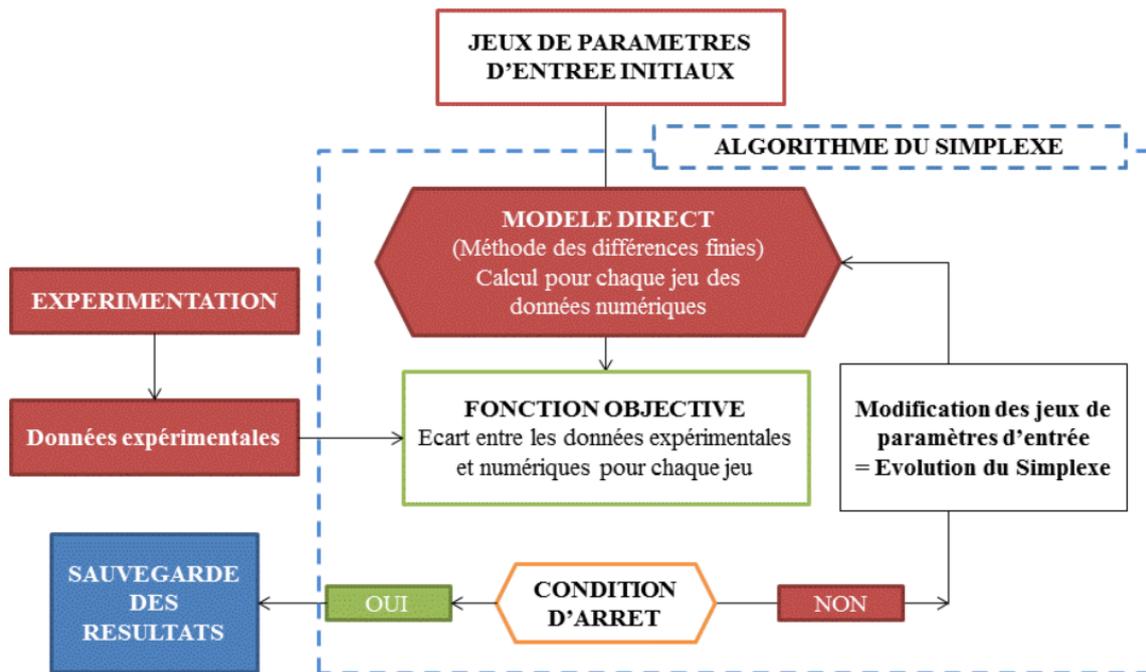


FIGURE 2.14: algorithme d'identification proposé par Nguyen (2014)

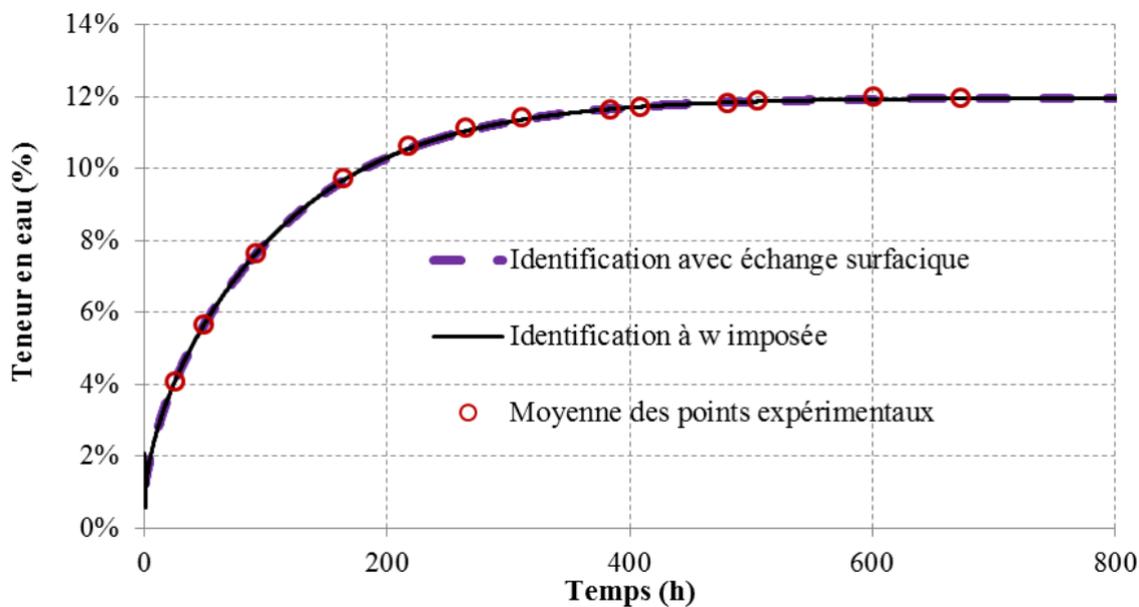


FIGURE 2.15: évolution de la teneur en eau en fonction du type de condition aux limites, comparaison aux points expérimentaux (Nguyen (2014))

hydriques ou hydromécaniques. Néanmoins, on retrouve des méthodes inverses qui ont été développées pour de tels problèmes mais leur mise en œuvre a été basée sur des champs homogènes de teneur en eau. Par conséquent, elles ne permettent pas une caractérisation du bois sous sollicitations hydriques ou hydromécaniques en tenant compte de ses gradients de propriétés.

Il y a donc besoin de proposer des méthodes d'identification inverse basées sur une réponse hétérogène du matériau bois sous sollicitations hydriques ou hydromécaniques. Dans la suite de l'étude, la méthode de la grille sera utilisée comme technique de mesures de champs pour les raisons mentionnées précédemment.

Chapitre 3 : Étude du bois sous sollicitations hydriques par la méthode de la grille

Introduction

La problématique des hétérogénéités dans le bois constitue un véritable verrou scientifique. En effet, comme on l’a montré plus haut, le bois exhibe un fort degré d’hétérogénéité à l’échelle macroscopique, mésoscopique et microscopique. La méthode de la grille a été déjà utilisée afin de révéler le caractère hétérogène du bois à l’échelle du cerne sous sollicitations hydriques (Dang et al. (2014, 2016)). Dans ce chapitre, on cherche à déterminer les déformations à l’échelle du cerne afin de mettre en évidence et d’évaluer les gradients de déformations entre EW et LW du Sapin Blanc du Massif Central. Les variabilités spatiales sont également étudiées en comparant les niveaux de déformations d’éprouvettes provenant d’un même arbre. Tout d’abord, la problématique du dispositif expérimental est discutée. Ensuite les essais préliminaires sur le Pin des Landes ainsi que le choix des conditions sont abordés. Les résultats expérimentaux obtenus sur le Sapin Blanc du Massif Central sont enfin présentés et discutés.

1 Dispositif expérimental

Dans cette section, la problématique de l’expérimentation est abordée. Les contraintes liées à l’expérimentation que l’on souhaite mettre en œuvre sont mises en relief. Le dispositif expérimental mis en place est également présenté.

1.1 Contraintes

La sollicitation hydrique du matériau bois en adsorption peut se faire de deux manières différentes.

La première consiste à mettre l’éprouvette étudiée dans une enceinte climatique à une humidité relative donnée afin d’obtenir une teneur donnée à l’équilibre. Cependant, avec cette approche, l’utilisation d’une caméra CCD pour la méthode de la grille ne pourra se faire qu’en ayant celle-ci dans la même enceinte où se trouve l’éprouvette. Ceci s’avère problématique dans la mesure où un écran d’humidité viendrait se déposer sur l’objectif pour le flouter et donc perturber fortement les mesures. En outre, pour acquérir des images depuis l’extérieur il faudrait comme écran, entre la face de l’éprouvette observée et la caméra, un matériau non réfléchissant et à indice de réfraction proche de celui de l’air à température ambiante, ce qui est difficile à

mettre en œuvre.

La seconde possibilité est quant à elle axée sur la mise en contact de l'éprouvette directement avec de l'eau mais ceci nécessite de réaliser un dispositif bien adapté afin de pouvoir utiliser la méthode de la grille. Cette approche a été retenue. Avec celle-ci, l'inconvénient majeur auquel on se confronte est qu'on ne peut pas avoir directement accès à la teneur en eau globale de l'éprouvette sollicitée. Cependant, comme on aura accès aux déformations hydriques, on pourra remonter aux teneurs en eau en régime transitoire ou stationnaire en dessous du *PSF* (ce point sera abordé au chapitre 4).

Dans la prochaine sous-section, le dispositif expérimental conçu pour une telle expérimentation est présenté.

1.2 Dispositif mis en place

Le dispositif expérimental mis en place pour l'étude du bois sous sollicitations hydriques par la méthode de la grille est présenté sur la figure 3.1. Il est constitué d'un récipient parallélépipédique sur lequel une ouverture rectangulaire est réalisée sur une de ses facettes. L'éprouvette testée est solidaire au récipient grâce à un mastic de silicone. Ceci garantit un contact direct de l'eau qui sera mise dans ce réceptacle avec la face opposée à celle investiguée. Cette dernière est équipée d'une grille croisée. Son impression sur l'éprouvette est faite via un transfert sur une colle préalablement étalée sur cette surface (Piro & Grédiac (2004)). Cette colle étant étanche à l'eau, aucun transfert hydrique n'est possible à travers cette face de l'éprouvette. Le pas p de la grille utilisée est de $200 \mu\text{m}$, soit $5 \text{ traits } \text{mm}^{-1}$, voir figure 3.2. A la fin de chaque cycle d'adsorption, l'eau est retirée et la désorption est réalisée dans les conditions de température et d'humidité ambiantes. Des images de la grille sont acquises à des intervalles de temps réguliers (toutes les 30 minutes) par une caméra Sensicam 12-bits 1040×1376 pixels, pilotée par son logiciel CamWare. La caméra est équipée d'un capteur CCD ("charge-coupled device") refroidi. Une source d'éclairage froid de type KL 2500 LCD ("liquid crystal display") alimentant trois bras flexibles et ajustables pour illuminer la surface investiguée, est utilisée. Ceci garantit un éclairage uniforme de la grille observée. Afin de réduire l'effet du bruit, chaque image obtenue est le résultat de 128 images moyennées. Par contre, pour acquérir des images moyennées et espacées régulièrement avec un pas de temps ajustable, on a eu recours à l'usage d'une macro AutoHotkey, car la version CamWare 3.14 utilisée

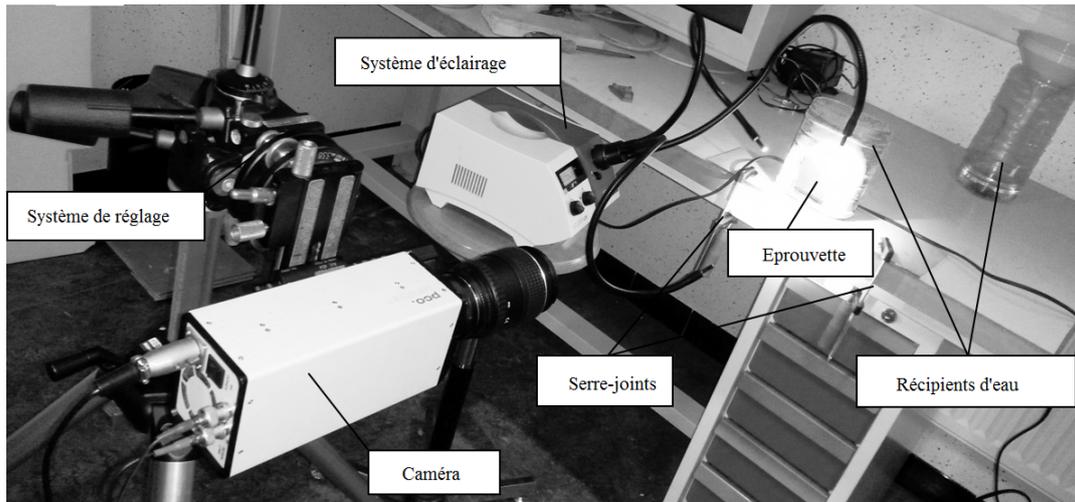


FIGURE 3.1: dispositif expérimental

ne permet pas une acquisition avec de telles contraintes. Les cartes de déformations sont ensuite obtenues à partir des images grâce à un outil de dépouillement développé sur Matlab^(R) (Badulescu (2010)).

2 Essais préliminaires sur le Pin des Landes (Pinus Pinaster)

Les essais préliminaires sur le Pin des Landes qui est aussi un résineux comme le Sapin Blanc du Massif Central, avaient pour objectif de valider le dispositif expérimental ainsi que l'épaisseur définitive des éprouvettes à tester dans la suite. Dans un premier temps, des éprouvettes de dimensions $49 \times 46 \times 20mm^2$ ont été soumises à l'adsorption tangentielle sans étanchéité sur les bords non perpendiculaires à la direction de diffusion. On a remarqué que les résultats obtenus n'étaient pas du tout acceptables car des effets de courbure de l'éprouvette testée sont apparus. Ainsi on a diminué l'épaisseur de l'éprouvette. En effet, les dimensions sont passées de $49 \times 46 \times 20mm^3$ à $49 \times 46 \times 8mm^3$. Des éprouvettes avec de telles dimensions ont été soumises à l'adsorption hydrique avec bords hors direction de diffusion non étanches. La figure 3.3 montre respectivement de gauche à droite le scan de la face sur laquelle la grille est transférée (a), la carte de déformation hydrique au bout de 12 heures d'exposition (b) ainsi que celle après 177 heures d'adsorption hydrique

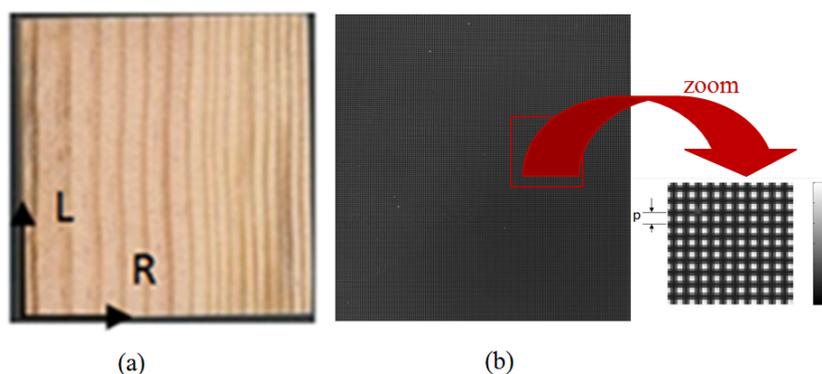


FIGURE 3.2: transfert d'une grille sur un éprouvette de pin des Landes : (a)-tcan de la face avant transfert (b)- vue après transfert

(c).

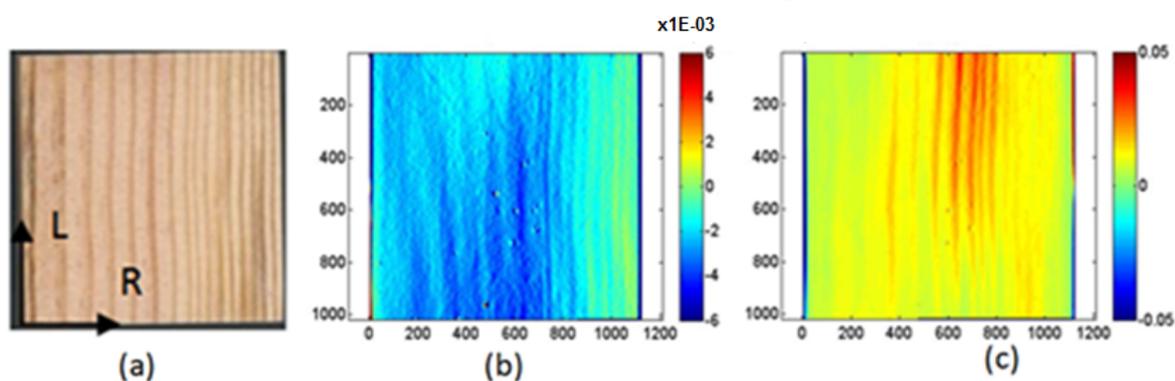


FIGURE 3.3: pin des Landes : (a) - scan de la face investiguée (b) - ϵ_{RR} après 12 heures d'exposition (c) - ϵ_{RR} après 177 heures d'exposition.

La figure 3.3-(b), montre qu'après 12 heures d'exposition la face en contact avec la grille est encore comprimée , mais la traction s'installe au fur et à mesure que la diffusion dure comme le confirme la figure 3.3-(c). En effet, lorsque la face en contact avec l'eau atteint un état hydrique prononcé, elle se dilate et met en compression celle opposée, donc celle en contact avec la grille. Cette dernière va très vite entrer en traction lorsque la diffusion dure dans le temps. Des gradients de déformations apparaissent clairement à l'échelle du cerne, mettant ainsi en évidence des propriétés hydriques différentes entre *EW* et *LW*. Les résultats mettent aussi en relief une modification de la déformabilité du matériau durant le test. En effet, lorsqu'on considère deux cartes de déformations obtenues à partir d'images prises successivement

on note que l'éprouvette devient de moins en moins déformable au fur et à mesure que la diffusion dure dans le temps. Ceci est lié au fait que l'état intrinsèque du matériau devient de plus en plus proche du *PSF* induisant ainsi une diminution notable du degré de liberté du bois relatif à ses variations dimensionnelles. A titre d'illustration, la figure 3.4 présente les cartes de déformation obtenues à trois instants différents comptés à partir du début de l'adsorption : $t_1 = 177$ heures (carte N° 21), $t_2 = 200$ heures (carte N° 22) et $t_3 = 600$ heures (carte N° 24). Un point particulier ($X = 600$ pixels, $Y = 400$ pixels, X et Y correspondant respectivement aux axes horizontal et vertical), appartenant à *EW* est investigué.

On remarque bien qu'entre les instants t_1 et t_2 , la déformation radiale en ce point varie de 1,431 % à 1,488 %; donc augmentant de 0,057 % pour une différence de temps d'exposition de 23 heures. En considérant la déformation en ce même point entre t_2 et t_3 , on note qu'elle évolue de 1,488 % à 1,672 %; donc un accroissement de 0,184 % pour une différence de temps d'exposition de 400 heures. Le constat important qu'il faut faire ici est que si la déformabilité du matériau était la même que pour l'intervalle de temps de t_1 à t_2 que celui de t_2 à t_3 ; il aurait fallu que 75 heures pour atteindre le même niveau de déformation au lieu de 400 heures. Ceci confirme la décroissance notable de la déformabilité du bois lorsque son exposition à l'adsorption dure dans le temps.

Cette section permet de valider le dispositif expérimental mis en place en ce concerne

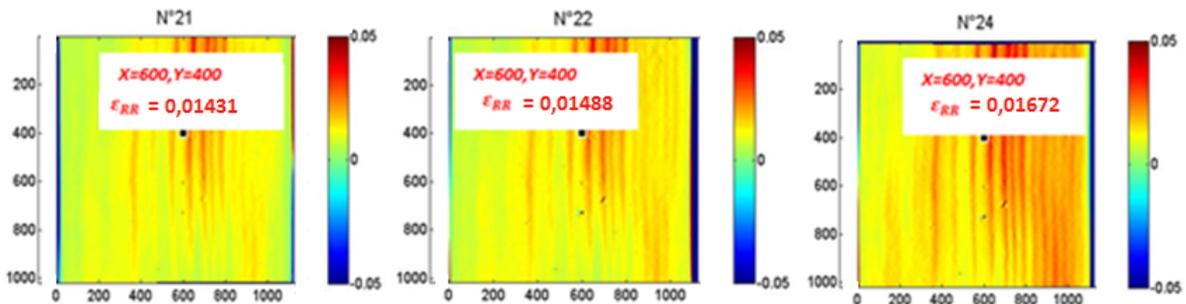


FIGURE 3.4: pin des Landes, ϵ_{RR} aux instants : $t_1=177$ heures (carte N° 21); $t_2=200$ heures (carte N° 22); $t_3=600$ heures (carte N° 24)

la réalisation d'essais d'adsorption hydrique sur le bois et la mise en évidence de gradients de déformations radiales à l'échelle du cerne annuel de croissance. Elle valide également le choix d'une épaisseur de 8 mm dans la direction tangentielle de diffusion. Dans la section 3, le choix des conditions limites définitives sera discuté.

3 Choix des conditions limites

Dans cette section, l'adsorption du bois sous deux types de conditions limites pour les bords hors direction de diffusion est étudiée sur une éprouvette de Sapin Blanc du Massif Central de dimensions $50 \times 49 \times 8 \text{ mm}^3$. L'éprouvette dont le scan de la face investiguée est présenté sur la figure 3.5, est d'abord soumise à l'adsorption avec bords libres puis séché naturellement et ré-humidifié selon le même principe avec bords étanches. Le mastic de silicone utilisé pour rendre les bords étanches s'enlève facilement. A l'issue de la deuxième humidification et après avoir ôté le mastic de silicone faisant office de barrière d'étanchéité à l'eau et après séchage naturel, une troisième humidification est réalisée. Les cartes de déformations obtenues sont présentées sur les figures 3.6, 3.7 et 3.8.

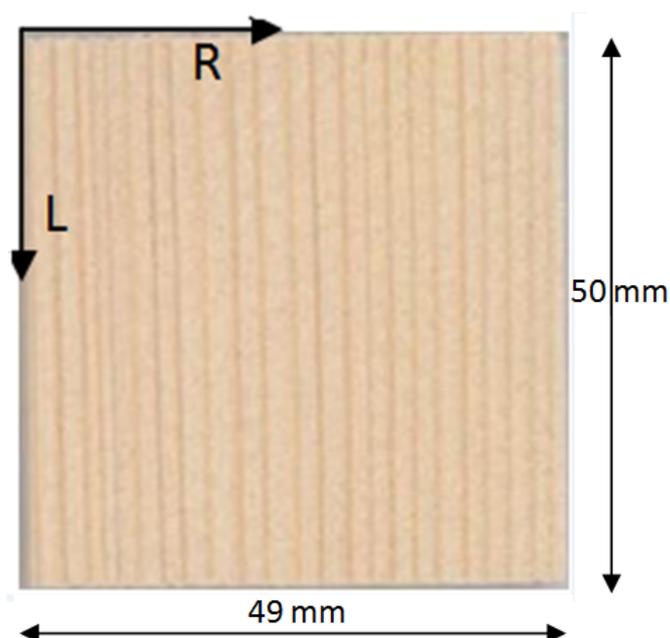


FIGURE 3.5: scan de la face en contact avec la grille

On observe après séchage et ré-humidification que EW n'est pas totalement en traction comme il l'était dans la première phase d'humidification. Ce constat est vrai quelle que soient les conditions aux limites. En effet, lors de la première humidification, on note dans un premier temps une compression aussi bien de LW et que de EW suivie d'une traction.

Une deuxième humidification avec bords étanches montre que dès le début de l'essai

il y a de la traction dans LW et de la compression dans EW . Ce phénomène serait dû à l'existence de déformations résiduelles lors du premier séchage. Jusqu'à la fin de l'essai la traction dans LW accroit tandis que dans EW , la compression persiste avec une décompression partielle. Ce même phénomène est observé lors d'une troisième humidification après un deuxième séchage avec comme conditions limites les bords libres.

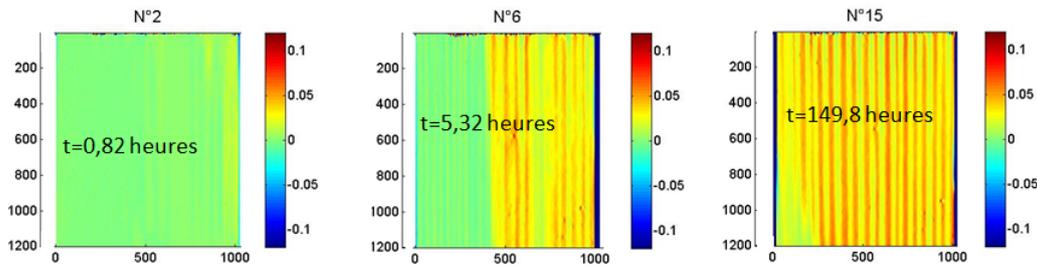


FIGURE 3.6: déformations : 1^{ère} humidification, bords libres

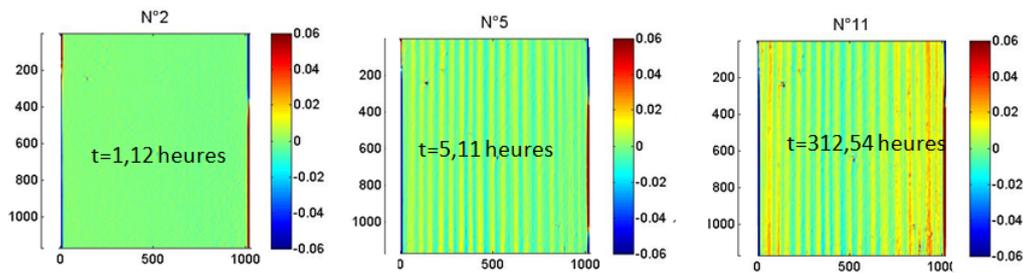


FIGURE 3.7: déformations : 2^{ème} humidification, bords étanches

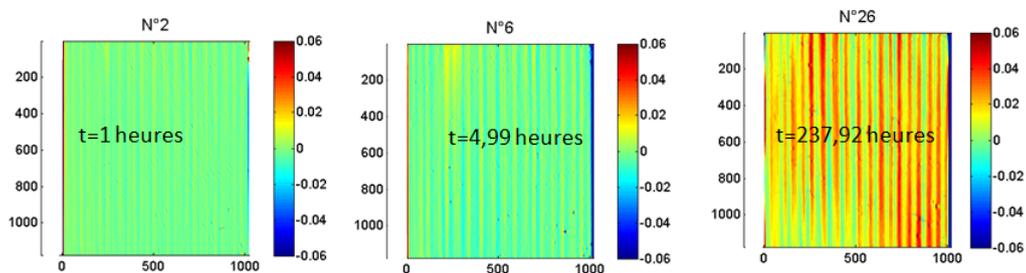


FIGURE 3.8: déformations : 3^{ème} humidification, bords libres

Hormis les observations mentionnées ci-dessus, on remarque que le mécanisme global de déformation est plus uniforme dans le cas de la deuxième et troisième humidifications. Pour la première humidification avec bords libres, au bout de 6,35 heures d'exposition, la déformation moyenne (face support de la grille) sur l'éprouvette est de 0,018. La même éprouvette séchée et soumise de nouveau à l'humidification mais cette fois-ci avec bords étanches, subit une déformation moyenne de 1.51×10^{-4} au bout de 7,16 heures d'exposition. Lors de la troisième humidification (bords libres) après séchage à l'issue de la deuxième, l'éprouvette accuse une déformation moyenne de $5,8 \times 10^{-4}$ après 7 heures d'exposition.

Ces observations peuvent être attribuées à la fois aux conditions aux limites et aux déformations résiduelles qui se sont manifestées après chaque séchage.

En résumé, l'éprouvette se déforme plus lors de la première humidification avec bords libres et moins lors de la deuxième humidification avec bords étanches. L'état de déformation lors de la troisième humidification avec bords libres est entre les deux. Dans les trois cas, la traction est présente dans LW mais plus accentuée lors de la première humidification.

La présence du mastic de silicone rendant étanches les bords périphériques de l'éprouvette lors de la deuxième humidification serait à l'origine de déformations en expansion gênées qui viendraient s'ajouter aux déformations résiduelles dues au premier séchage. Ce qui expliquerait la manifestation lors de la deuxième humidification d'un état de déformation moins significatif. Ayant soupçonné que le mastic de silicone utilisé pour rendre étanches les bords hors direction de diffusion induit des déformations longitudinales ou radiales gênées, un autre produit a été utilisé : il s'agit d'une résine qui polymérise dans moins de 5 minutes. Une résine similaire à cette dernière a été utilisée lors d'essais au laboratoire de génie des procédés et des matériaux de l'école centrale de Paris. Elle avait permis de rendre étanches les bords hors direction de diffusion d'une éprouvette d'épaisseur environ 1 mm pour rester fidèle à l'hypothèse de diffusion unidirectionnelle lors d'essais d'adsorption et de désorption par la méthode de la balance à suspension magnétique (Perré et al. (2007)). Par conséquent, dans la suite de l'expérimentation en adsorption et désorption sans contrainte, cette résine sera appliquée, sous forme de films très minces, sur les faces des éprouvettes hors direction tangentielle de diffusion.

La section 4 présente la procédure de découpe des éprouvettes de Sapin Blanc du Massif Central qui seront soumis aux sollicitations hydriques dans ce qui suit.

4 Principes de découpe des éprouvettes de Sapin Blanc du Massif Central

Les éprouvettes testées proviennent du même arbre appartenant à l'essence du Sapin Blanc du Massif Central. Elles ont été découpées à partir de zones situées de part et d'autre du cœur, numérotées respectivement de gauche à droite *PERIPH1* et *PERIPH2*, voir figure 3.9. Visuellement, on note que les bois *PERIPH1* et *PERIPH2* n'ont pas le même degré de coloration, ceci est peut être dû au mécanisme de croissance de l'arbre sur pieds. Des éprouvettes numérotées ont été coupées des bois *PERIPH1* et *PERIPH2*. Chaque éprouvette a approximativement comme dimensions $50 \times 49 \times 8 \text{ mm}^3$. La procédure de découpe des éprouvettes est présentée sur la figure 3.10. Leur teneur en eau initiale est environ de 12 %.



FIGURE 3.9: zones de découpe des éprouvettes

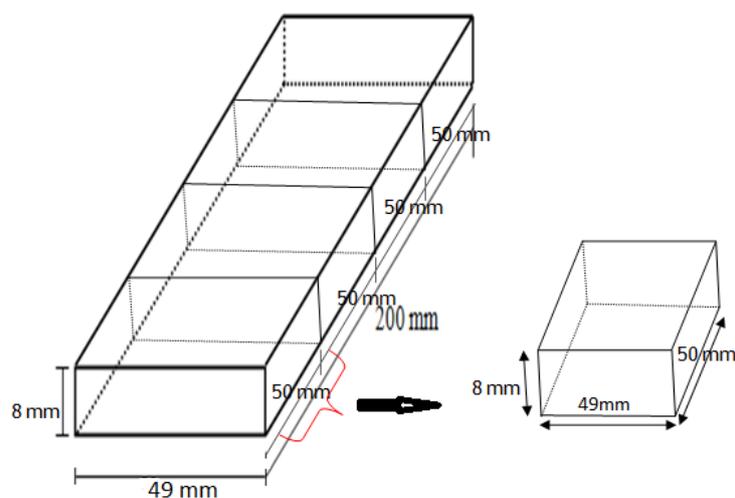


FIGURE 3.10: processus de découpe des éprouvettes

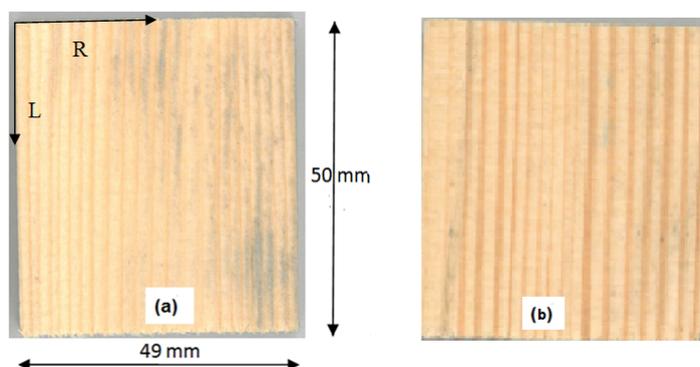


FIGURE 3.11: scans : (a)-éprouvette A (b)-éprouvette B

5 Essais d'adsorption et de désorption sur le Sapin Blanc

Des essais d'adsorption et de désorption ont été réalisés sur des éprouvettes issues respectivement des bois *PERIPH2* et *PERIPH1*. Les résultats expérimentaux de deux éprouvettes numérotées *A* et *B* et appartenant respectivement aux bois *PERIPH2* et *PERIPH1* sont présentés. Les autres résultats sont mis en annexes. La figure 3.11 montre les scans des faces des éprouvettes *A* et *B* qui sont investiguées par la méthode de la grille.

5.1 Cartes de déformation radiale

Cette sous-section présente des exemples de cartes de déformation radiale obtenues à partir d'images prises à différents instants lors de la diffusion en adsorption et en désorption. Celles-ci (figures 3.12 et 3.13) montrent de forts gradients de déformation entre EW et LW . Les figures 3.12-a et 3.12-b correspondent respectivement à des états de déformation de l'éprouvette A en adsorption et en désorption. Les figures 3.13-a et 3.13-b montrent respectivement les mêmes effets pour l'éprouvette B . Quelle que soit l'éprouvette considérée, le constat reste le même, LW subit des déformations hydriques plus prononcées que EW . Cette observation s'explique par le fait que LW est plus dense que EW et on sait que le coefficient d'expansion d'un matériau augmente lorsque la densité croît. En outre, on remarque que les niveaux de déformation des éprouvettes A et B sont différents même si elles sont soumises toutes les deux à des conditions limites d'état hydrique identiques. Cette différence sera expliquée plus tard à partir d'investigations effectuées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) sur d'autres éprouvettes issues respectivement de $PERIPH1$ et $PERIPH2$.

La sous-section 5.2 est dédiée à la réponse en terme de déformation longitudinale des éprouvettes A et B lors du phénomène de diffusion hydrique. Les déformations à l'échelle du cerne annuel de croissance sont également étudiées dans la section 6.

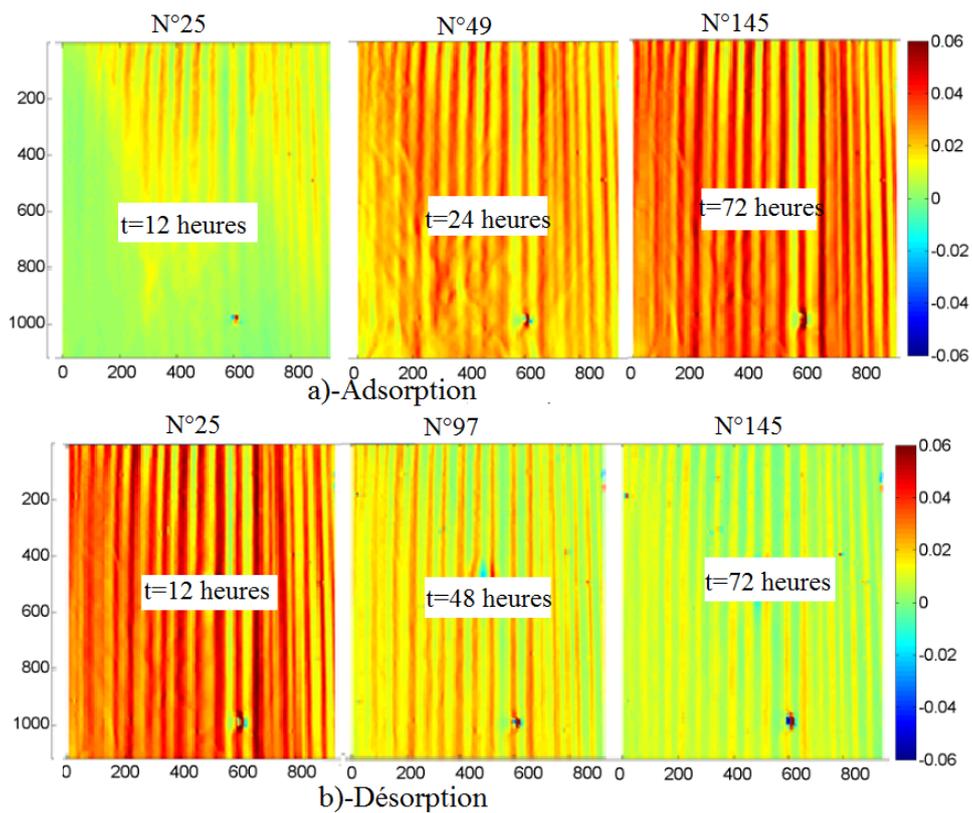


FIGURE 3.12: éprouvette A : cartes de déformation radiale

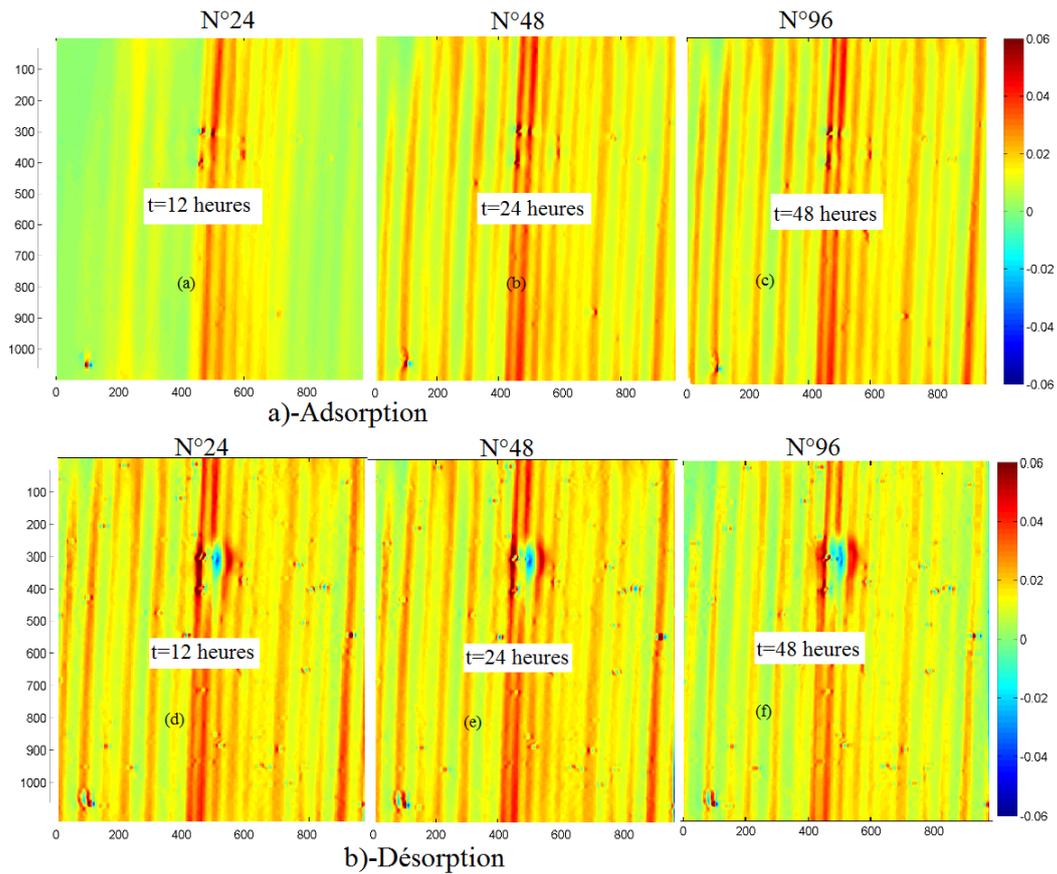


FIGURE 3.13: éprouvette *B* : cartes de déformation radiale

5.2 Cartes de déformation longitudinale

Quelques cartes de déformation longitudinale sont présentées dans cette sous-section. Les figures 3.14-a et 3.14-b correspondent respectivement à des états de déformation de l'éprouvette *A* en adsorption et en désorption. La figure 3.15 montre l'état de déformation longitudinale de l'éprouvette *B* à deux instants différents à compter du début de l'adsorption. Contrairement au constat fait pour les cartes de déformation radiale, les gradients de déformation entre *EW* et *LW* ne sont pas mis en évidence. Cette observation est liée au fait que l'alternance entre *EW* et *LW* est absente dans la direction longitudinale. La remarque qui a été faite au sujet de la différence du niveau de déformation radiale entre les éprouvettes *A* et *B* reste valable pour la réponse longitudinale sous sollicitation hydrique en adsorption.

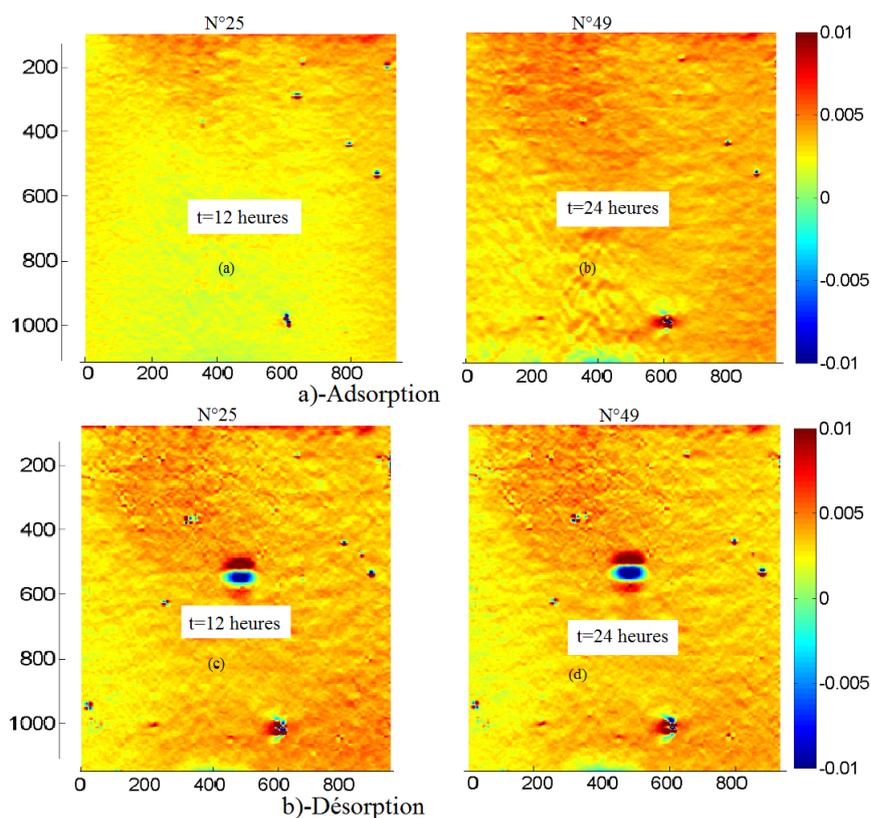


FIGURE 3.14: éprouvette *A* : cartes de déformation longitudinale

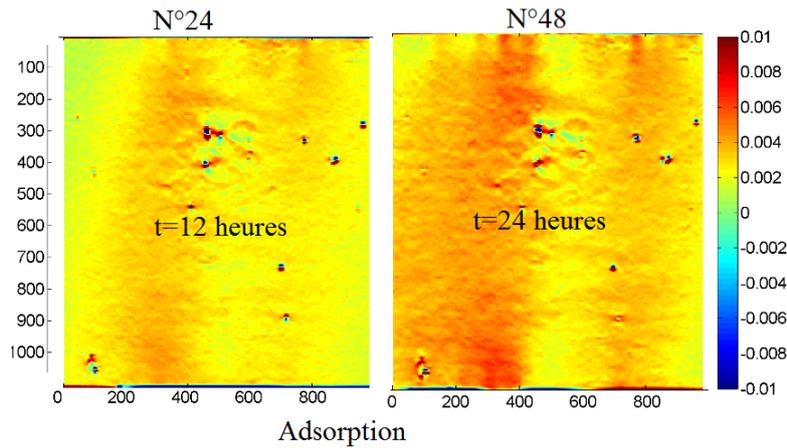


FIGURE 3.15: éprouvette *B* : cartes de déformation longitudinale

5.3 Profils de déformation radiale selon la direction RR

Les profils de déformation radiale pour trois coupes, correspondant à trois positions selon la direction longitudinale (voir figure 3.16) à différents instants lors de l'exposition de l'éprouvette *A* à l'adsorption, sont présentés ici. Comme on peut le constater sur les figures 3.17, 3.18 et 3.19, les profils de déformation radiale sont similaires même si l'amplitude varie d'une coupe à une autre (direction longitudinale). On peut noter aussi que l'amplitude de la déformation radiale varie en fonction de la position dans la direction radiale. Ceci révèle le caractère fortement hétérogène de la réponse du matériau à l'échelle d'une même éprouvette. En outre, les transitions entre *EW* et *LW* sont bien mises en évidence à l'échelle des cernes, les pics sont dans *LW* et les vallées dans *EW*. Les transitions entre *EW* et *LW* ne sont pas brutales, elles s'effectuent de manière progressive d'où la nécessité de construire des masques filtrant les cartes de déformations afin d'extraire les déformations dans *EW* et *LW* seulement.

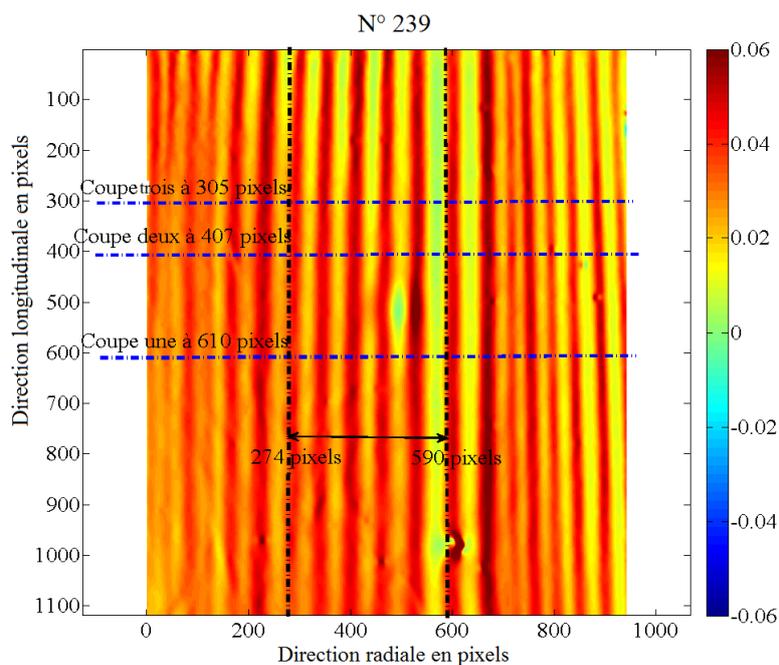


FIGURE 3.16: éprouvette A : positions des trois plans de coupe

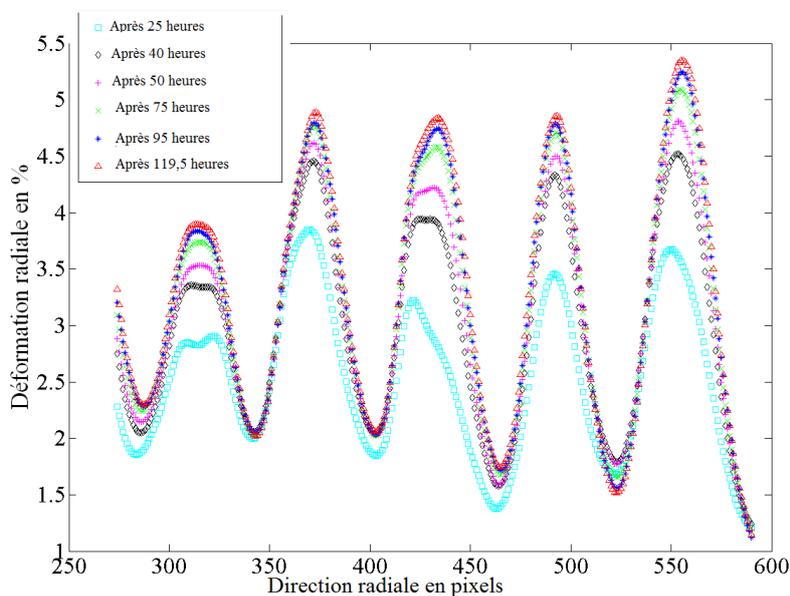


FIGURE 3.17: éprouvette A : coupe radiale à 610 pixels selon la direction LL

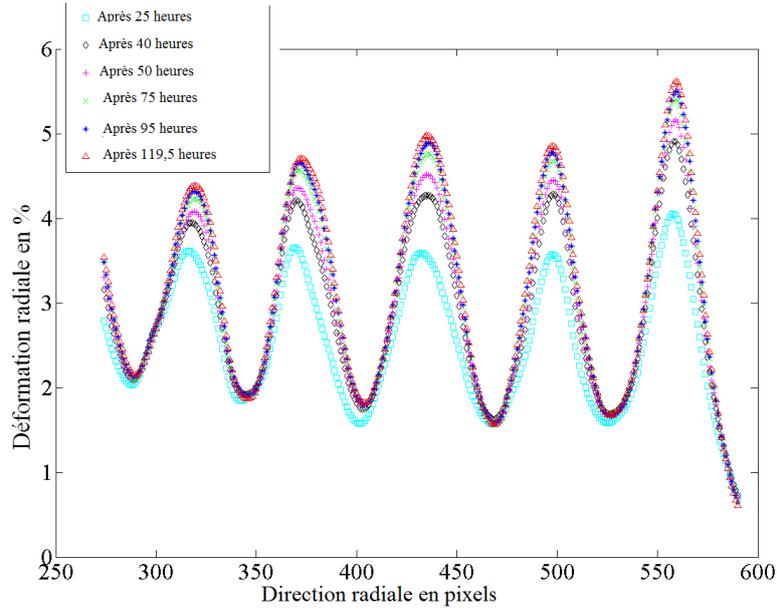


FIGURE 3.18: éprouvette A : coupe radiale à 407 pixels selon la direction LL

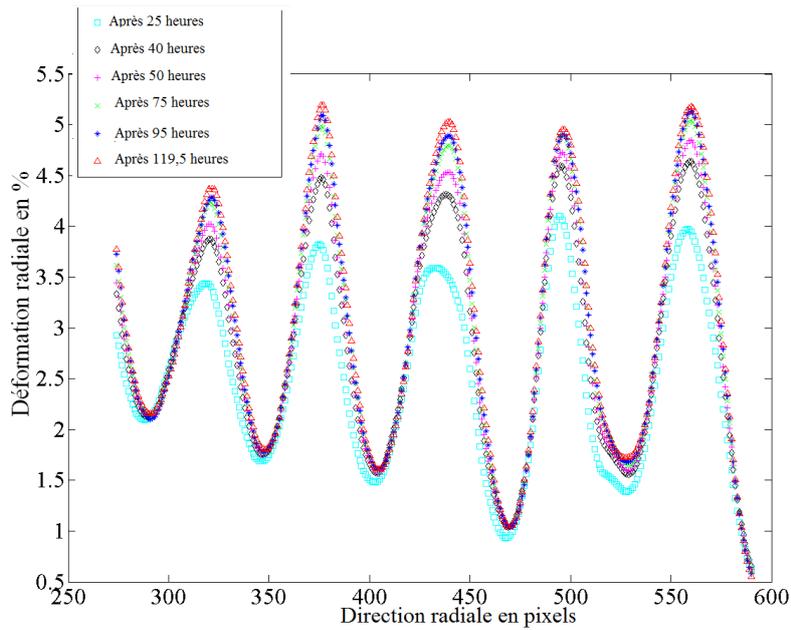


FIGURE 3.19: éprouvette A : coupe radiale à 305 pixels selon la direction LL

6 Extraction des déformations à l'échelle du cerne

Les déformations moyennes à l'échelle du cerne annuel de croissance sont déterminées en utilisant des masques d'extraction dont leur construction est présentée

dans la sous-section 6.1.

6.1 Construction des masques

Trois méthodes ont été testées pour la constructions des masques. La première est constituée des différentes étapes suivantes :

- chargement de la dernière carte de déformation obtenue lors de l'adsorption ;
- augmentation de l'intensité de la texture des pixels ayant un niveau de déformation plus prononcé ;
- binarisation de l'image pour obtenir le masque de EW ;
- et enfin déduction du masque de LW à partir de celui de EW .

Cette méthode devient très vite problématique dès lors que la distinction entre EW et LW n'est pas nette à l'œil nu. De plus, le passage de LW à EW n'est pas systématique à cause de la présence du bois de transition. Une autre méthode de construction qui a été testée est décrite dans les lignes suivantes :

- chargement du scan de la face en contact avec la grille ;
- augmentation de l'intensité de la texture des pixels ayant un niveau de déformation plus prononcé
- binarisation de l'image obtenue afin d'en déduire le masque de EW ;
- et enfin déduction du masque de LW à partir de celui de EW .

Cette deuxième méthode est sujette également de quelques problèmes, incluant la définition de la zone d'intérêt investiguée mais aussi la transition entre EW et LW . En effet, la surface entière du scan de l'éprouvette est supérieure à celle des cartes de déformation, puisque lors du paramétrage de la caméra, la surface entière de l'éprouvette n'est pas détectable dans la zone de d'intérêt définissable par la caméra. De plus, lors du traitement des images obtenues à partir de l'expérimentation, une nouvelle zone est définie par l'utilisateur. Il faudrait noter aussi que de cette dernière sont éliminés tous les pixels affectés par les effets de bord. Une troisième méthode a donc été mise en œuvre. Les différentes étapes sont explicitées ci-dessous :

- chargement de la dernière carte de déformation issue de l'expérimentation (LM, "last strain map") ;
- remplacement de toutes les déformations aberrantes par des zéros (NaN ("not a number")), zone saturées, ...). Ces valeurs aberrantes sont soit dues aux défauts de grille ou aux effets de bords ;

- recherche des valeurs maximale ($\varepsilon_{LM_{max}}$) et minimale ($\varepsilon_{LM_{min}}$) de déformation de la carte de corrigée LM ;
- définition des incréments positifs de déformation de EW ($Percent_{EW}$) et LW ($Percent_{LW}$) pour fixer la déformation maximale dans EW ($\varepsilon_{EW_{max}}$) et celle minimale dans LW ($\varepsilon_{LW_{min}}$), de sorte que :

$$\varepsilon_{EW_{max}} = \varepsilon_{LM_{min}} + Percent_{EW}, \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{LW_{min}} = \varepsilon_{LM_{max}} - Percent_{LW}, \quad (3.2)$$

Les valeurs de $Percent_{EW}$ et de $Percent_{LW}$ ne sont pas connues à priori. Elles doivent être ajustées de sorte que des pixels satisfaisant la contrainte dans l'équation 3.3, ne vérifient pas la condition donnée dans l'équation 3.4. Une fois que ceci est fait, tout pixel de la carte LM corrigée et dont la déformation satisfait la condition spécifiée dans l'équation 3.3 est considéré comme appartenant au masque de EW ($Mask_{EW}$). Plus $Percent_{EW}$ est grand, plus grand sera le nombre de pixels retenus dans EW et inversement.

$$\varepsilon_{EW_{min}} < \varepsilon_{EW} < \varepsilon_{EW_{max}} \quad (3.3)$$

De manière similaire, tout pixel de la carte LM corrigée dont la déformation satisfait la condition spécifiée dans l'équation 3.4 est affecté au du masque de LW ($Mask_{LW}$). Plus $Percent_{LW}$ est petit, plus faible sera le nombre de pixels retenus dans LW et inversement.

$$\varepsilon_{LW} > \varepsilon_{LW_{min}} \quad (3.4)$$

Cette méthode sera utilisée pour accéder aux déformations à l'échelle du cerne annuel de croissance.

6.2 Déformations radiales moyennes à l'échelle du cerne

Les déformations moyennes dans EW et dans LW pour l'éprouvette A , font l'objet de cette sous-section. Elles sont extraites à partir des cartes de déformation radiale en utilisant le processus présenté ci-dessus.

Durant l'adsorption de l'éprouvette A (voir figure 3.12-a), les cartes de déformations obtenues à partir d'images prises respectivement après $t_1 = 12$ heures (carte $N^\circ 25$) $t_2 = 72$ heures (carte $N^\circ 145$) d'exposition permettent d'investiguer le niveau de

déformabilité du bois à l'échelle du cerne. En effet, entre les instants t_1 et t_2 , la déformation radiale moyenne de EW varie de $7,5E-03$ à $2,1E-02$. Tandis que pour ce même intervalle de temps, celle de LW subit un accroissement de $1,17E-02$ à $4,19E-02$. La déformation radiale moyenne pour l'éprouvette entière (tous les pixels appartenant à EW et à LW) pour la même tranche temporelle augmente de $8,4E-03$ à $2,97E-02$. Des cartes de déformation radiale de la même éprouvette (voir figure 3.12-b) durant le processus de désorption, obtenues respectivement à $t_1 = 12$ heures (carte $N^\circ 25$) et $t_2 = 72$ heures (carte $N^\circ 145$), à compter du début de la désorption, offrent la possibilité d'étudier la déformabilité du bois à l'échelle du cerne durant un tel mode de sollicitation. Entre les instants t_1 et t_2 , la déformation radiale moyenne de EW diminue de $2,19E-02$ à $4,5E-03$. Alors que pour ce même intervalle de temps, celle de LW décroît de $4,12E-02$ à $1,14E-02$, et la déformation radiale moyenne de l'éprouvette entière pour tous les pixels retenus de EW et LW varie de $3E-02$ à $7,4E-03$.

La figure 3.20 présente l'évolution de la déformation radiale moyenne dans EW et dans LW durant l'adsorption et la désorption de l'éprouvette A . Comme on pouvait s'y attendre, la déformation radiale moyenne dans LW est supérieure à celle atteinte dans EW et celle de l'éprouvette est comprise entre les deux. La zone (zone 1)

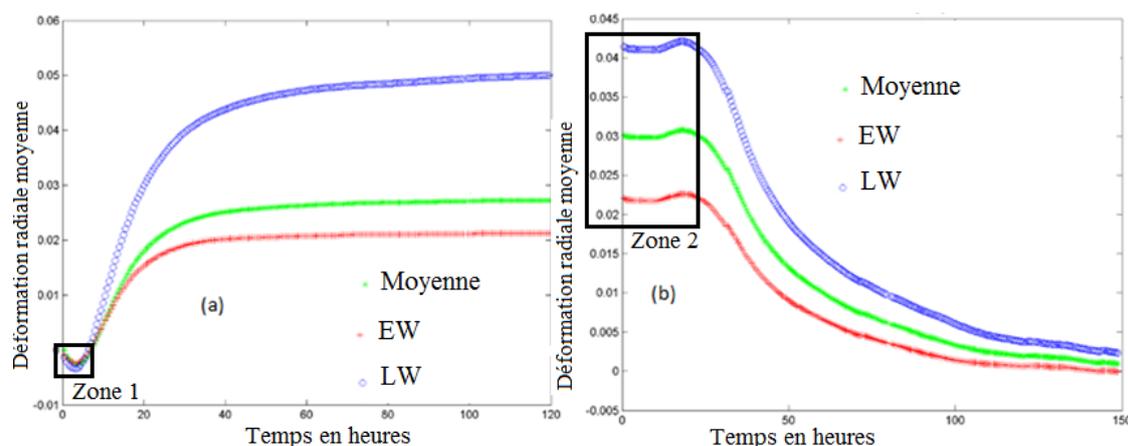


FIGURE 3.20: éprouvette A : évolution de la déformation radiale moyenne à l'échelle du cerne

indiquée sur la figure 3.20-a correspond à la phase lors de laquelle la face en contact avec la grille passe progressivement d'un état de compression à un état de dilatation hydrique lorsque le front d'eau avance au sein du matériau. En effet, initialement,

lorsque le côté en contact avec l'eau atteint un état hydrique plus prononcé, il subit une dilatation, induisant ainsi une compression de la face en contact avec la grille. Cette compression va disparaître au fur à mesure que la diffusion s'opère au profit de la dilatation hydrique. Ce constat a été fait lors de toutes les expérimentations réalisées dans les mêmes conditions.

Une autre zone (zone 2) est indexée sur la figure 3.20-b. Celle-ci correspond à la phase de transition de l'adsorption à la désorption. On peut noter qu'au début de celle-ci, la déformation radiale moyenne reste constant pendant une certaine durée puis subit une légère augmentation avant que le processus de désorption soit enclenché. Une explication possible de la déformation constante lors de cette phase, est l'évacuation de l'eau libre, car lors de celle-ci l'éprouvette ne subit pas de variations dimensionnelles. La légère augmentation peut être liée au phénomène inverse de celui observé pour la zone 1.

Cette analyse des résultats expérimentaux obtenus durant les phases d'adsorption et de désorption confirme que la diffusivité hydrique de *EW* est supérieure à celle de *LW*. De plus, la figure (voir figure 3.21) révèle que le taux d'accroissement de la déformation radiale moyenne dans *LW* est supérieur à ceux de *EW* car ce premier est plus déformable sous sollicitation hydrique (Watanabe et al. (1998)). Cette figure montre également que durant les phases d'adsorption et de désorption, le taux de déformation de l'éprouvette est compris entre celui de *LW* et de *EW*. Dans la sec-

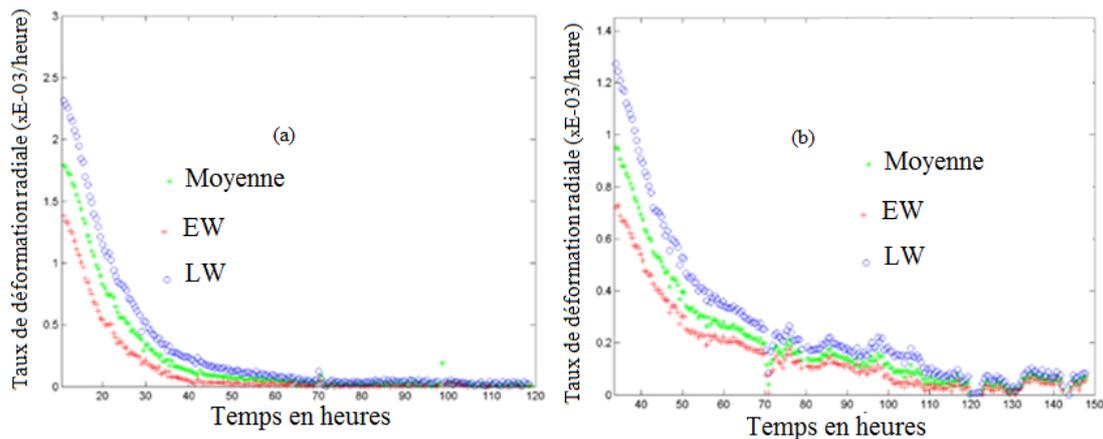


FIGURE 3.21: éprouvette *A* : évolution du taux de déformation hydrique radiale

tion 6.2, on avait mentionné que l'éprouvette *A* subissait un niveau de déformation

plus prononcé que l'éprouvette *B*, la section 7 est dédiée à l'explication de cette observation.

7 Observation au microscope électronique à balayage

Dans le souci de mieux comprendre la différence en terme de niveau de déformation entre les éprouvettes provenant de *PERIPH1* et de *PERIPH2*, une observation au MEB est effectuée sur le plan (R,T). Il y a aussi une éprouvette testée appartenant au cœur. L'échantillonnage ainsi que la préparation des éprouvettes sont présentés d'une part. Ensuite le principe du MEB est abordé et enfin les résultats obtenus sont discutés.

7.1 Éprouvettes

Les éprouvettes testées ont une géométrie cubique d'arête 10 mm (voir figure 3.22). Une microtrondeuse a été utilisée pour la procédure de découpe. Afin d'obtenir des faciès de découpe non brûlés (à cause du disque qui opère la découpe) des paramètres adéquats ont été prédéfinis. Un disque d'épaisseur 0,3 mm et de diamètre égal à 100 mm a été utilisé pour la découpe.

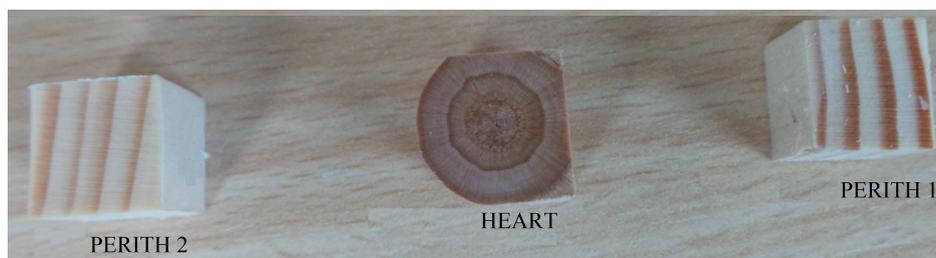


FIGURE 3.22: éprouvettes observées au MEB.

7.2 Préparation des éprouvettes au microtome

Après avoir découpé les éprouvettes on procède à une préparation de leur surface à observer. Cette dernière a été effectuée en employant un microtome allouant la

possibilité d'obtenir des surfaces bien adaptées pour l'observation au MEB. Le microtome est équipé entre autres d'une lame très coupante et d'une petite manivelle permettant le mouvement en translation de celle-ci ; un bouton permet d'assurer le réglage de la profondeur de découpe sur la surface de l'éprouvette.

7.3 Principe de l'observation au MEB

Le principe de fonctionnement du MEB est le suivant : On bombarde la surface de l'éprouvette testée par un faisceau incident d'électrons. Ces derniers excitent les électrons des atomes situés à la surface de l'éprouvette bombardée. Si les électrons excités possèdent suffisamment d'énergie, ils se précipitent vers l'écran de détection du microscope. Sinon ils restent à la surface de l'éprouvette et l'image obtenue est de mauvaise qualité. Ce phénomène est d'autant plus vrai lorsque le matériau est poreux, ce qui est le cas pour le bois. Pour éviter un problème, on procède d'abord à une injection de gaz (vapeur d'eau) dans la cellule de mesure du microscope afin que les électrons excités ionisent le gaz et aient suffisamment d'énergie pour se déplacer vers l'écran de détection pour obtenir une des images de meilleure qualité.

7.4 Résultats obtenus et discussion

La figure 3.23-a montre les trachéides de l'éprouvette prélevée du cœur. On constate que l'épaisseur de celles-ci est plus faible que pour les résultats obtenus pour deux autres éprouvettes. Les figures 3.23-b et 3.23-c semblent montrer que l'épaisseur des trachéides du bois *PERIPH2* est supérieure à celles de *PERIPH1*. Cette observation est en parfait accord avec les déformations expérimentales obtenues durant l'adsorption ou la désorption hydrique. En effet, la déformation hydrique est plus prononcée lorsque l'épaisseur des trachéides est plus élevée. Ceci expliquerait pourquoi l'éprouvette *A* subit un niveau de déformation plus notable que l'éprouvette *B*.

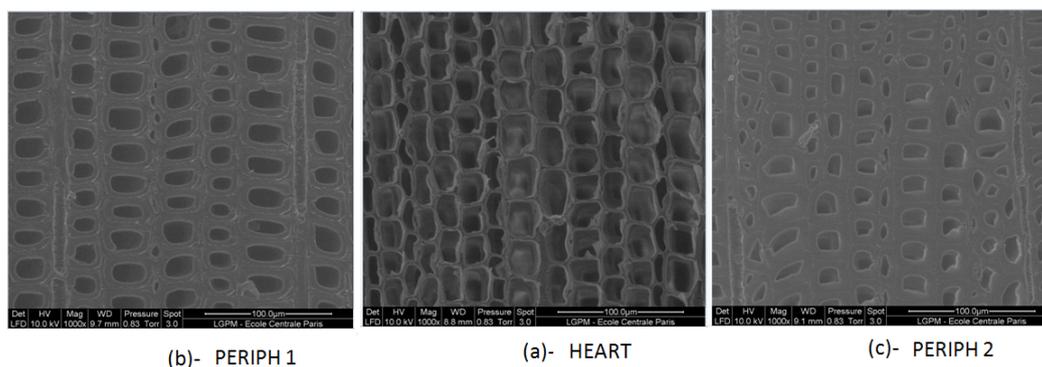


FIGURE 3.23: résultats obtenus au MEB .

Conclusion

Dans ce chapitre, l'étude du bois en adsorption et désorption par le biais de la méthode de la grille, a été abordée. On a vu qu'une telle étude présentait un certain nombre de contraintes liées à l'expérimentation. Néanmoins, un dispositif adapté a été mis en place. Des essais sur le Pin des Landes et sur le Sapin Blanc du Massif Central ont permis un choix définitif de l'épaisseur dans la direction tangentielle et des conditions limites. Les résultats obtenus sur le Pin ainsi que sur le Sapin Blanc ont permis de valider le dispositif expérimental. Ce dernier a été ensuite utilisé pour mener une campagne d'essais sur des éprouvettes de Sapin Blanc prélevées de part et d'autre du cœur. Les résultats expérimentaux montrent et confirment que LW subit un niveau de déformation plus prononcé sous sollicitations hydriques (adsorption, désorption) comparé à EW . On a pu mettre en exergue que la transition au sein des cernes ne se fait pas de manière brusque mais plutôt progressive. Partant de cette constatation, une procédure de construction de masques a été mise en place afin d'accéder aux déformations à l'échelle du cerne. En outre, on a pu constaté que les éprouvettes issues de part et d'autre du cœur ne subissaient pas le même niveau de déformation. Pour comprendre un tel constat, des éprouvettes ont été prélevées dans les mêmes zones et observées au MEB, et les résultats sur l'épaisseur des trachéides semblent être en accord avec celui-ci. Une méthode d'identification inverse des propriétés du bois à l'échelle du cerne sera mise au point pour une caractérisation de LW et EW . Le chapitre suivant est dédié à cette méthode.

Chapitre 4 : Identification à l'échelle du cerne des propriétés hydriques du bois

Introduction

Dans ce chapitre, on propose une méthodologie pour la caractérisation hydrique du bois à l'échelle du cerne de croissance. On cherche à déterminer les coefficients de diffusion et d'expansion de LW et EW et leur teneur en eau en phase d'adsorption. La résolution du problème posé dans ce chapitre s'appuie essentiellement sur des hypothèses qui seront décrites en section 1. Ensuite l'identification inverse sera explicitée dans la section 2 avant d'aborder la validation numérique de la méthode et son application à des données expérimentales .

1 Formulation du problème

1.1 Problème posé et hypothèses

La résolution du problème de diffusion est axée sur l'ensemble des hypothèses suivantes :

- H1 : la diffusion est supposée être unidirectionnelle vu les conditions aux limites d'état hydrique et l'épaisseur de l'éprouvette.
- H2 : en dessous du PSF la relation entre la déformation et la variation de la teneur en eau est linéaire.
- H3 : le transfert de chaleur n'est pas pris en considération compte tenu des conditions ambiantes de température et d'humidité relative dans lesquelles sont effectuées les essais.
- H4 : la diffusion est supposée fickienne en dessous du PSF .

On rappelle ici l'équation de la loi de Fick pour un problème de diffusion unidimensionnelle. Elle est donnée par l'équation 4.1.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

où D est le coefficient de diffusion (considéré comme constant), w la teneur en eau du matériau étudié, t le temps, et x la position dans l'épaisseur comptée à partir de la face en contact avec l'eau (voir figure 4.1). Puisque la diffusion tangentielle est étudiée, il est possible de considérer que le phénomène de diffusion qui s'opère

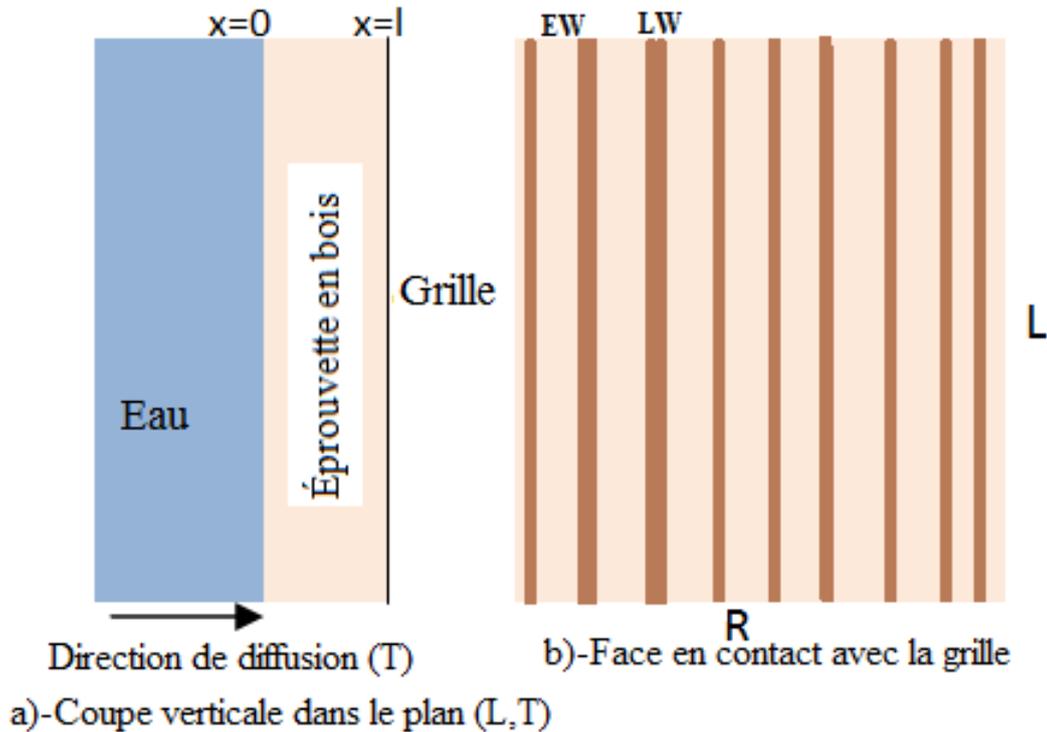


FIGURE 4.1: schématisation du problème d'adsorption étudié

dans EW et dans LW peut être étudié de manière séparée, donc la loi de Fick sera appliquée à chacun de ces matériaux. Ceci est en principe vérifiable par des mesures physiques ou par une approche numérique.

1.2 Résolution numérique de la loi de Fick

La solution de l'équation différentielle 1.13 par les diverses méthodes spécifiées au chapitre 1 à la section 2.3 dont des solutions analytiques proposées par Crank (1975) en fonction de la géométrie du matériau étudié ainsi que des conditions aux limites. Cependant, aucune de ces solutions ne décrit fidèlement le problème présenté sur la figure 4.1 qu'on souhaite résoudre. Pour prendre en compte la possibilité de variation de la teneur en eau au bord $x=l$ (en contact avec l'eau) de l'éprouvette, une résolution numérique est adoptée. Pour résoudre numériquement la loi de Fick 1-D, la Toolbox des équations aux dérivées partielles (PDEs en anglais) de Matlab^(R) est utilisée (Lawrence & Jacek (2011)). Cette Toolbox rend possible l'obtention d'une

solution d'une équation aux dérivées partielles de la forme indiquée en équation 4.2.

$$\frac{1}{D} \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \left(f \left(x, t, w, \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right)}{\partial x} \quad (4.2)$$

La PDEs s'applique pour $t_0 \leq t \leq t_f$ et pour $a \leq x \leq b$. L'intervalle $[a, b]$ doit être fini. Dans l'équation 4.2, $f(x, t, w, \frac{\partial w}{\partial x})$ désigne un terme de flux donné par l'équation 4.3.

$$f \left(x, t, w, \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{dw(x, t)}{dx} \quad (4.3)$$

A $t = t_0$ et pour $a \leq x \leq b$, des conditions initiales de la forme indiquée dans l'équation 4.4, doivent être satisfaites.

$$w(x, t_0) = w_0(x) \quad (4.4)$$

A tout instant t que ce soit en $x = a$ ou en $x = b$, la solution du problème doit être en accord avec une condition limite comme présentée dans l'équation 4.5.

$$p(x, t, w) + q(x, t) f(x, t, w, \frac{\partial w}{\partial x}) = 0 \quad (4.5)$$

La loi de Fick est valable seulement lorsque la teneur en eau est inférieure ou égale au *PSF*. Donc dans le problème établi sur la figure 4.1, la face en contact avec l'eau aura une teneur en eau maximale égale au *PSF*. Cette teneur en eau est supposée être atteinte de manière instantanée dès que la face et l'eau entrent en contact (Voir équation 4.6). De plus, la teneur en eau maximale à la face en contact avec la grille peut atteindre durant la diffusion fickienne une teneur en eau maximale égale au *PSF*, donc $w(b, t_f) = w_{fsp}$, t_f est l'instant auquel se termine le processus de diffusion hydrique.

$$w(0, t) = w_{fsp} \quad (4.6)$$

Selon le problème posé sur la figure 4.1, $a = 0, b = l, w_0(x) = w_0$. Si l'équation 4.5 relative aux conditions limites (*CL*) est écrite en $x=0$ et en $x=l$ on trouve que sur la face en contact avec l'eau les *CL* peuvent être écrites comme dans l'équation 4.6.

Pour la face en contact avec la grille, les CL peuvent être écrites comme indiqué dans l'équation 4.7.

$$\frac{dw(x,t)}{dx} = 0 \quad (4.7)$$

Cela voudrait dire qu'il n'y a aucun échange entre la face en $x = l$ et le milieu ambiant en raison de l'étanchéité de la colle sur laquelle la grille est imprimée. Avant d'aller plus loin, on peut remarquer que les CL en $x = 0$ et en $x = l$ sont respectivement de types Dirichlet et Neumann.

La résolution de ce problème via un maillage temporel et spatial donne la solution numérique de celui-ci. Cette solution numérique sera appliquée dans le but de simuler les teneurs en eau moyennes dans EW et LW afin d'alimenter le procédure d'identification des paramètres inconnus.

1.3 Inconnues du problème

Les paramètres inconnus du problème sont le coefficient de diffusion hydrique aussi bien pour EW que pour LW (D_{EW_T} et D_{LW_T}) dans la direction tangentielle, et leurs coefficients d'expansion hydrique (α_{EW_R} et α_{LW_R}) dans la direction radiale perpendiculaire à celle de la diffusion. De plus, les teneurs en eau (w_{EW} and w_{LW}) devront être déterminées, celles-ci dépendent principalement des coefficients de diffusion.

La méthode proposée pour l'évaluation de ces six paramètres est abordée dans la section 2.

2 Identification inverse

La théorie de la méthode d'identification proposée est abordée dans cette partie.

2.1 Bases de la méthode

La relation entre la variation de la teneur en eau et de la déformation est considérée comme étant linéaire en dessous du PSF durant l'adsorption ou la désorption hydrique (Merakeb (2006)). Elle est donnée par l'équation 4.8.

$$\varepsilon_{EW_{moyR}} = \alpha_{EW_{moyR}} \Delta w_{EW_{moy}} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{LWmoyR} = \alpha_{EWmoyR} \Delta w_{LWmoy} \quad (4.9)$$

ε_{EWmoyR} (respectivement ε_{LWmoyR}) est la déformation moyenne dans EW (respectivement dans LW) obtenue au plan LR ($x = l$). Δw_{EWmoy} (respectivement Δw_{LWmoy}) est la variation de la teneur moyenne en eau dans EW (respectivement dans LW), et donc la différence entre la teneur à un instant t donnée par rapport à celle initiale. α_{EWmoyR} (respectivement α_{LWmoyR}) est le coefficient d'expansion hydrique de EW (respectivement de LW) selon la direction radiale.

Soit $[\varepsilon_R]$ la carte de déformation obtenue par la méthode de la grille. Cette carte de déformation peut être partitionnée comme ci-dessous :

$$[\varepsilon_R] = [\varepsilon_{EW_R}] + [\varepsilon_{LW_R}] + [\varepsilon_{resd_R}] \quad (4.10)$$

où $[\varepsilon_{resd_R}]$ est la carte des déformations résiduelles dont ses valeurs non nulles sont aux pixels non attribués à EW ou à LW .

Les seules données d'entrée sont les cartes de déformation obtenues expérimentalement par la méthode de la grille (Badulescu (2010), Badulescu et al. (2009)). A ce stade, il y a nécessité d'utiliser les masques, dont la procédure de construction retenue a été présentée au chapitre 3. Ils permettent d'extraire $[\varepsilon_{EW_R}]$ et $[\varepsilon_{LW_R}]$, respectivement, à partir de $[\varepsilon_R]$.

$$[\varepsilon_{EW_R}] = [Mask_{EW}] .* [\varepsilon_R] \quad (4.11)$$

$$[\varepsilon_{LW_R}] = [Mask_{LW}] .* [\varepsilon_R] \quad (4.12)$$

L'opération $[E].*[F]$ correspond à une multiplication élément par élément des matrices $[E]$ et $[F]$ (notation spécifique à Matlab^(R)). Celles-ci doivent avoir la même dimension. Donc les masques pour EW et LW auront la même taille que les cartes de déformation à partir desquelles les déformations dans EW et LW seront extraites.

Les déformations moyennes, ε_{EWmoyR} et ε_{LWmoyR} (équations 4.8 and 4.9) sont évaluées à partir de $[\varepsilon_{EW_R}]$ et $[\varepsilon_{LW_R}]$ (équations 4.11 and 4.12).

On est capable maintenant de construire les fonctions coût à optimiser afin d'évaluer les propriétés hydriques de EW et de LW .

2.2 Fonctions coût

Les fonctions coût sont construites à partir des données numériques et expérimentales. Les premières sont basées sur les équations 4.8 and 4.9, tandis que les données expérimentales sont obtenues avec la méthode de la grille. Le modèle numérique peut être appliqué séparément à EW et à LW parce que l'extraction des déformations à partir des cartes de déformations expérimentales dans EW et dans LW est possible. Le problème d'optimisation consistera donc à minimiser deux fonctions coût, en l'occurrence celles présentées dans les équations 4.13 et 4.14.

$$F_{EW} = \sum_{Im_1}^{Im_2} [\varepsilon_{EW_{moy_R}} - \alpha_{EW_{moy_R}} \Delta w_{EW_{moy}}]^2 \quad (4.13)$$

$$F_{LW} = \sum_{Im_1}^{Im_2} [\varepsilon_{LW_{moy_R}} - \alpha_{LW_{moy_R}} \Delta w_{LW_{moy}}]^2 \quad (4.14)$$

$\varepsilon_{EW_{moy_R}}$, (respectivement $\varepsilon_{LW_{moy_R}}$) est la déformation moyenne dans EW , (respectivement LW) selon la direction radiale. Ces déformations sont obtenues via l'utilisation des masques. $\alpha_{EW_{moy_R}}$, (respectivement $\alpha_{LW_{moy_R}}$) correspond au coefficient radial moyen d'expansion de EW , (respectivement LW) selon la direction radiale. Δw_{imoy} est donnée par l'équation 4.15. Im_1 est la première image à partir de laquelle la fonction coût sera construite et Im_2 est la dernière image de la série de données. Im_1 et Im_2 sont fixées à partir des cartes de déformations obtenues lors de l'expérimentation.

$$\Delta w_{imoy} = w_{li} - w_{INI_{moy_i}} \quad (4.15)$$

La détermination de w_{li} passe par la résolution numérique de l'équation 1.13, et $w_{INI_{moy_i}}$ est la teneur en eau moyenne initiale de EW ou de LW (dans l'Equation 4.15 $i=EW, LW$).

Les équations 4.13 et 4.14 montrent avec que les fonctions coût sont non-linéaires. De plus, elles sont soumises à des contraintes linéaires d'inégalité présentées aux équations 4.16 et 4.17. En effet, Watanabe et al. (1998) ont montré que le coefficient d'expansion radial de EW est plus petit que celui de LW . De plus, la densité de LW est plus grande que celle de EW , et on sait que la diffusivité hydrique décroît

lorsque la densité augmente (Peck 1933, Cramer et al. 2005, Pereira et al. 2013). Par voie de conséquence, les paramètres recherchés doivent satisfaire les contraintes linéaires d'inégalités suivantes, qui limitent le domaine de recherche de la solution du problème d'optimisation :

Direction tangentielle

$$D_{EW_T} > D_{LW_T} > 0 \quad (4.16)$$

Direction radiale

$$0 < \alpha_{EW_R} < \alpha_{LW_R} \quad (4.17)$$

L'algorithme d'optimisation mis en place pour l'identification inverse va maintenant être présenté.

2.3 Algorithme de résolution

Comme mentionné ci-dessus, la première étape consiste à identifier la nature de la fonction coût à optimiser. Deuxièmement, le type de contraintes doit être explicité.

On vient de montrer dans la sous section 2.2 que les fonctions coût dans les équations 4.13 et 4.14 sont non-linéaires et qu'elles sont soumises aux contraintes linéaires d'inégalité spécifiées par les équations 4.16 and 4.17. Le solveur *fmincon* de la Toolbox d'optimisation de Matlab^(R) est utilisée pour la minimisation de ces fonctions coût. L'algorithme *sqp* (sequential quadratic programming) est utilisé, parqu'il est le plus robuste de ce solveur. Durant le processus d'optimisation, à chaque itération, la Toolbox PDEs de Matlab^(R) est utilisé pour résoudre la loi 1-D de Fick. Les différentes étapes de l'algorithme de résolution du problème d'identification inverse sont présentées sur la figure 4.2. Tout d'abord on fixe Im_1 et Im_2 afin de définir la plage de données à utiliser. A cette première étape, les conditions aux limites, les paramètres géométriques et le temps correspondant à chacune des cartes expérimentales de déformation (de Im_1 à Im_2) sont également renseignés. On précise par la suite si oui ou non les cernes sur la face investiguée de l'éprouvette sont verticales pour le choix des cartes de déformation radiale. A l'issue de cette étape, la fonction de seuillage est appelée pour construire les masques de LW et EW et pour partitionner chaque carte de déformation radiale. Ensuite pour chaque carte donnée, les déformations radiales moyennes dans EW et LW sont calculées. L'étape suivante

est la construction des fonctions coût. Lors de cette étape, le solveur de la loi de Fick est appelé pour obtenir les teneurs en eau à chaque instant t correspondant à une carte. Ces teneurs en eau permettront via la relation linéaire entre la variation de la teneur en eau et la déformation d'obtenir la déformation simulée à tout instant t correspondant à une carte. Les fonctions coût sont ensuite construites à partir des déformations moyennes expérimentales et simulées. L'avant dernière étape de l'algorithme est la minimisation de ces fonctions coût de manière itérative avec le solveur *fmincon* en prenant en compte ses paramètres d'entrée. Les contraintes entre les différents paramètres identifiés sont ensuite vérifiées. Si celles-ci sont satisfaites, on retient la solution du problème sinon on relance l'algorithme en raffinant certains paramètres d'entrée. Maintenant, la validation numérique de la méthode est abordée dans la section 3.

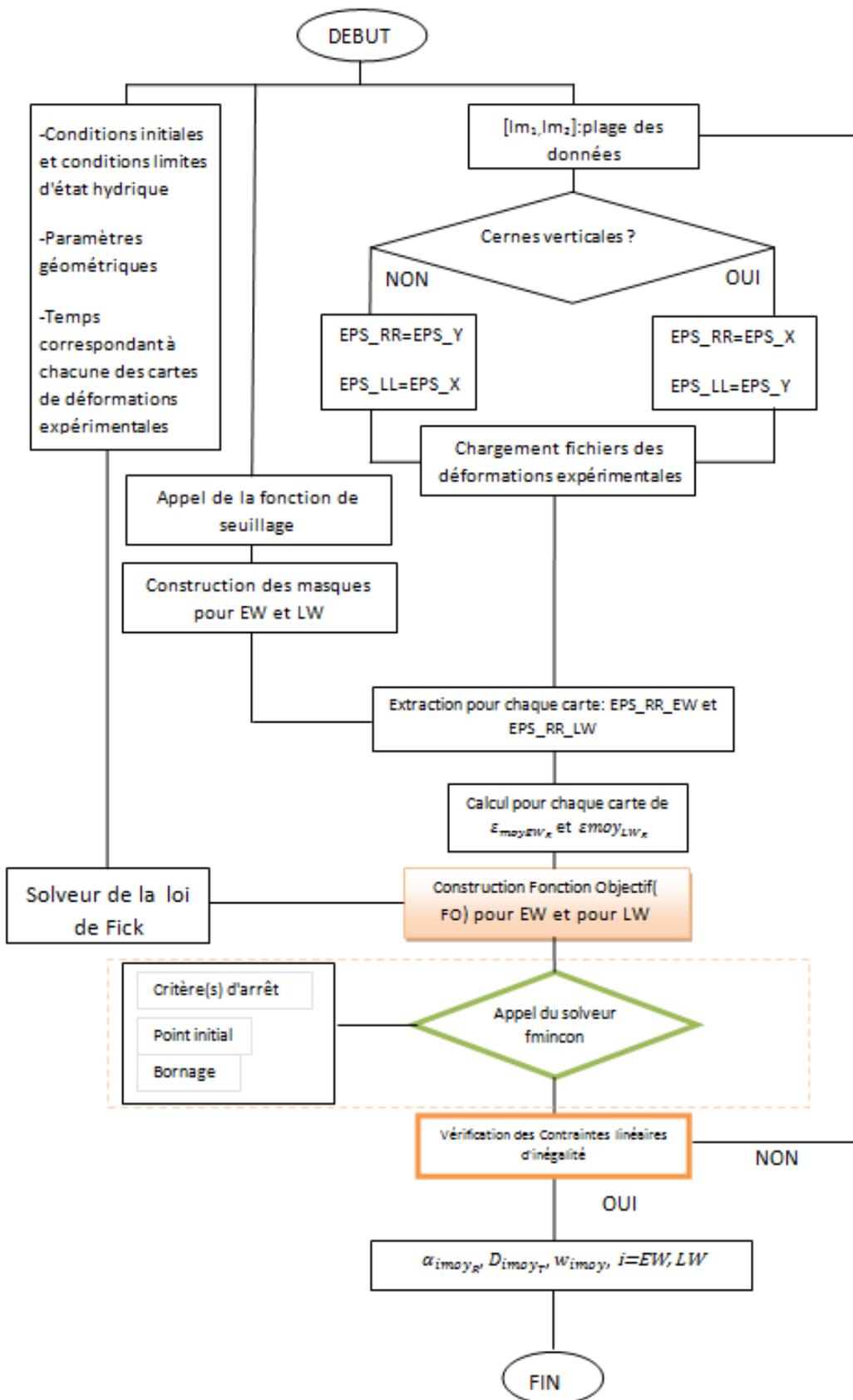


FIGURE 4.2: algorithme d'identification des propriétés hydriques du bois

3 Validation numérique

Cette section s'intéresse à la validation numérique de la méthode d'identification inverse proposée. L'influence des paramètres tels que le maillage, le PSF ainsi que les critères de convergence sont abordés.

3.1 Données simulées

Afin d'étudier l'influence du PSF et du maillage sur la solution numérique de la loi de Fick, on considère un matériau homogène d'épaisseur $l=8\text{mm}$ et dont les paramètres de bases sont présentés dans le tableau 4.1. Il est soumis à une diffusion en adsorption avec comme conditions aux limites celles indiquées sur la figure 4.1. La condition limite sur la face de l'éprouvette en contact avec l'eau est de type Dirichlet ($w = PSF$) et celle sur la face en contact avec la grille est de type Neumann ($dw/dx = 0$). La distribution initiale est considérée comme uniforme au sein de l'épaisseur ($w(x, 0) = w_0 = 12 \%$). La solution numérique de ce problème avec une discrétisation spatiale de 100 éléments et temporelle de 100 éléments ($0 \leq x \leq l$, $0 \leq t \leq t_f$ (avec $t_f = 252000s$, temps choisi en se basant sur la durée des expérimentations au chapitre 3)), est donnée sur la figure 4.3. La figure 4.3-a donne l'évolution de la teneur en eau durant tout le processus de diffusion, ceci à travers toute l'épaisseur au sein de la quelle le phénomène s'opère. On note que la teneur en eau augmente à tout instant $t > 0$ et pour $0 < x \leq l$. A $t = 252000s$ et en $x = l$, elle a atteint 21 % donc un accroissement de 9 % par rapport à la valeur initiale de 12 %. La figure 4.3-b présente le profil de teneur en eau à $t = 252000s$ au sein de l'épaisseur. Sur la figure 4.3-c, on montre l'évolution de la teneur en eau au bord $x = l$ et pour $0 \leq t \leq 252000s$. Étant donné que la déformation à tout instant t est donnée par $\varepsilon(l, t) = \alpha \Delta w(l, t)$, on déduit de l'évotion de la teneur en eau au bord $x = l$ le profil des déformations hydriques sur cette face. Ce dernier est présenté sur la figure 4.3-d. On note une allure similaire à celle de l'évolution des déformations hydriques.

α (% / %)	D (m^2/s)	PSF (%)	Maillage
0,30	10^{-10}	30	100×100

TABLE 4.1: paramètres de base

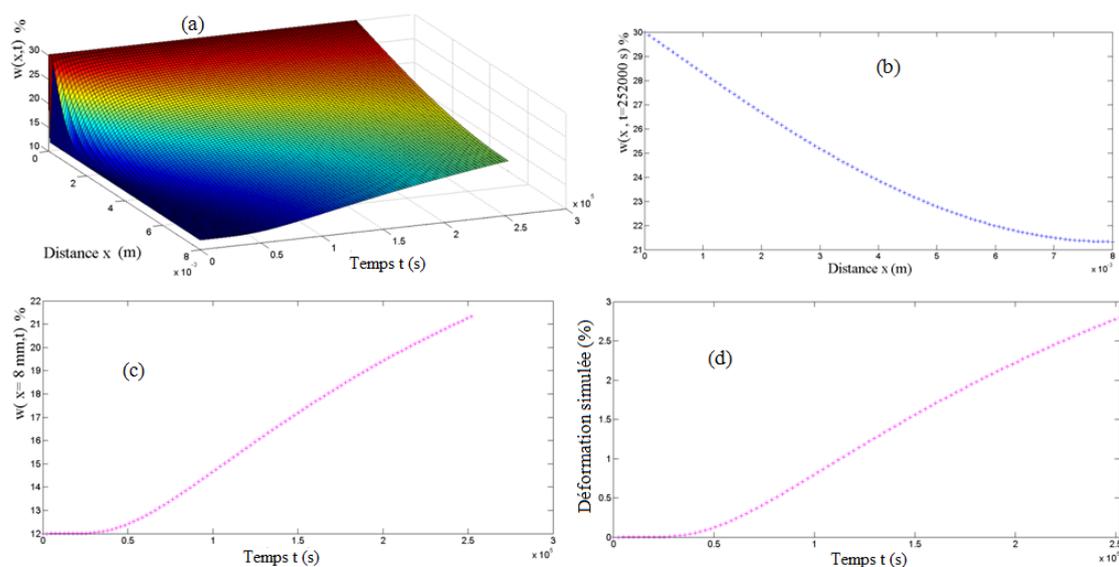


FIGURE 4.3: résultats numériques avec les données du tableau 4.1 : a)-évolution de la teneur en eau dans l'épaisseur à tout instant t , b)-profil de la teneur dans l'épaisseur à $t = t_f$, c)-profil de la teneur à tout instant t à $x = l$, d)-déformation à tout instant t à $x = l$

3.1.1 Influence du maillage

Dans cette sous section, on s'intéresse à l'influence de la valeur du PSF sur la solution numérique de la loi de Fick en 1-D. Par conséquent, les paramètres donnés dans le tableau 4.1 seront maintenus constants à l'exception du maillage temporel et spatial qui sera respectivement de 100×100 , 50×50 , 20×20 et 10×10 éléments. La figure 4.4 montre les profils de teneur en eau au sein de l'épaisseur durant tout le processus de diffusion pour les 4 types de maillage symétrique mentionnés ci-dessus. On remarque bien que la taille du maillage n'influence pas la solution numérique. Pour mieux s'en rendre compte, les profils d'état hydrique à $t = t_f$ sont représentés sur la figure 4.5. On remarque qu'il y a superposition de ceux-ci, ce qui confirme que la taille du maillage temporel et spatial n'a pas modifié la solution obtenue. Sur la figure 4.6, l'évolution de la teneur en eau en $x = l$ pour chaque maillage est représentée. La conclusion demeure toujours la même, le maillage n'impacte pas les profils hydriques obtenus par la résolution de la loi de Fick 1-D. On considère maintenant deux maillages non symétriques (100×50 , 50×100) afin d'étudier l'effet de la symétrie sur la solution numérique. Après résolution du problème on constate

que la symétrie n'a aucun effet sur l'allure de celle-ci.

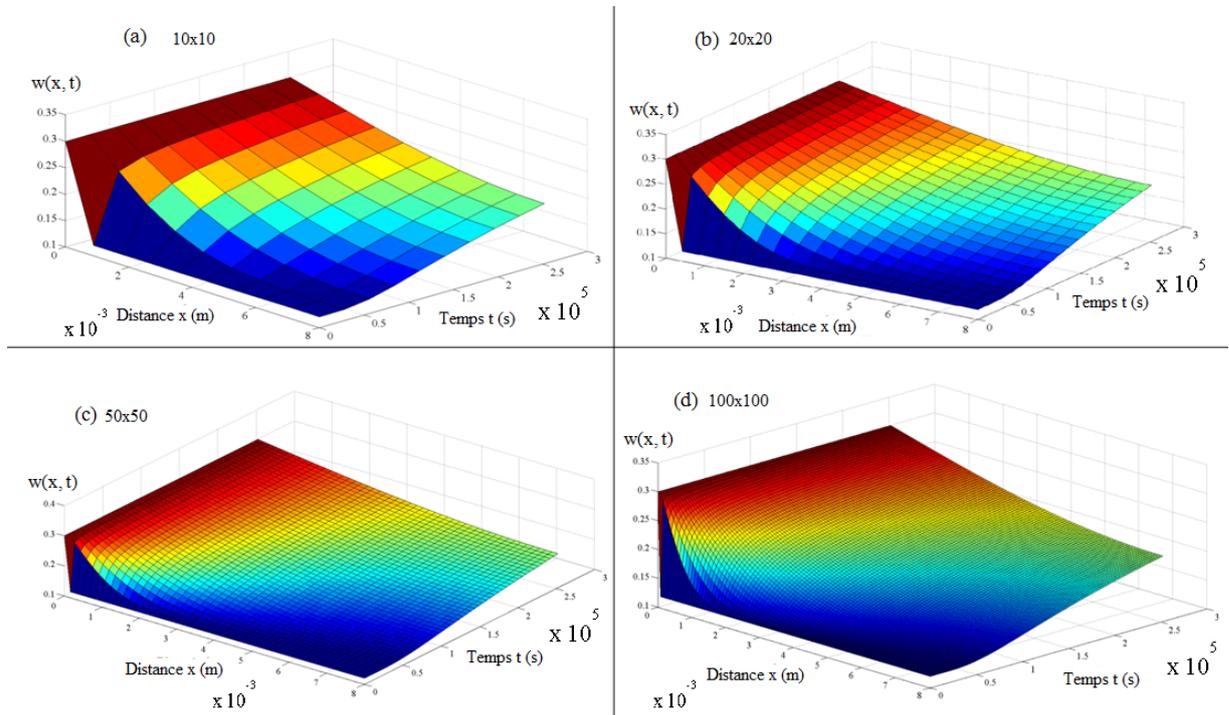


FIGURE 4.4: profils de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $0 \leq t \leq t_f$

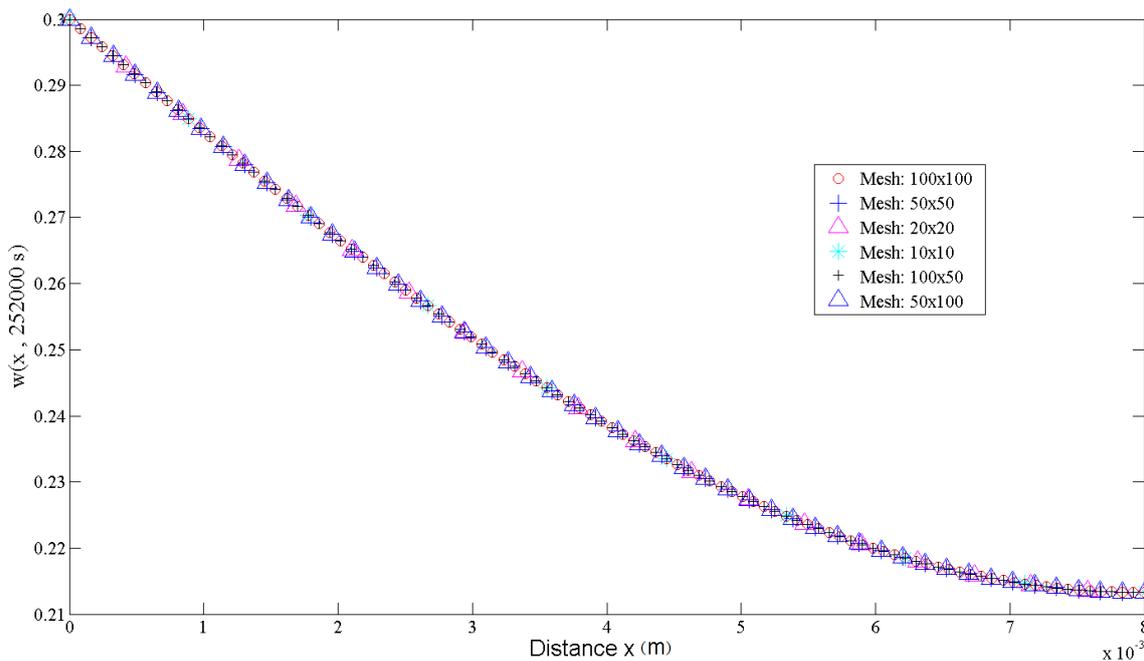


FIGURE 4.5: profils de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $t = t_f$

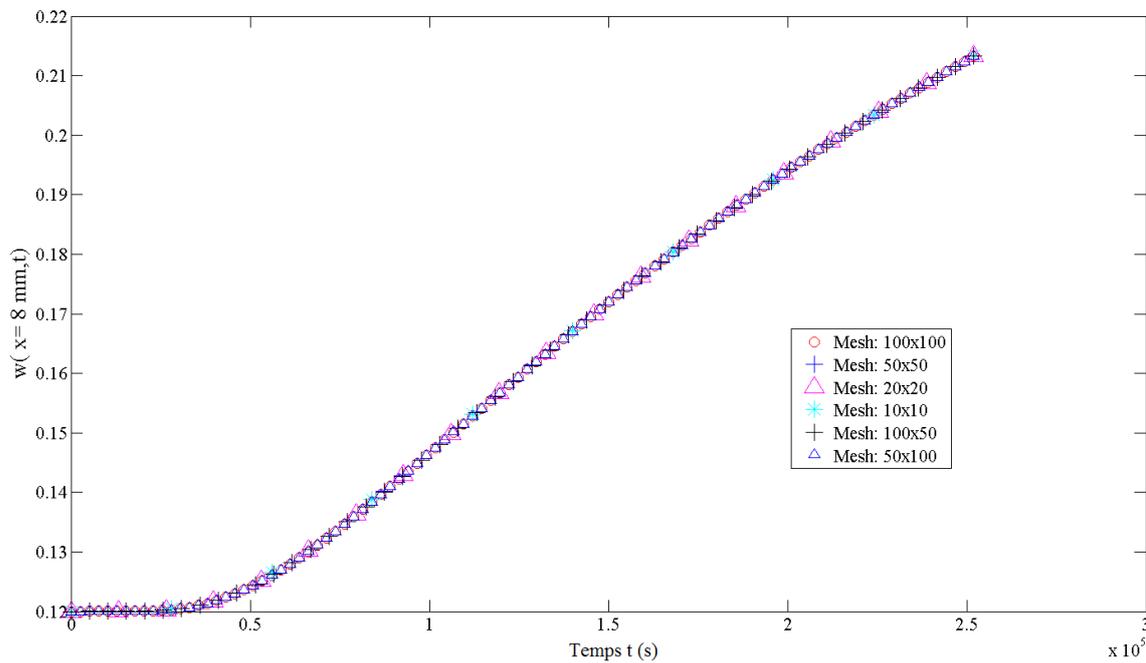


FIGURE 4.6: évolution de la teneur en eau au bord $x = l$

3.1.2 Influence du PSF

Cette sous section est dédiée à l'étude de l'impact du PSF sur la solution numérique de la loi de Fick en 1-D. Les paramètres donnés dans le tableau 4.1 seront donc maintenus constants y compris le maillage, à l'exception du PSF qui sera respectivement de 25, 27, 29 et 30 %. Les profils de la teneur en eau au sein de l'épaisseur à tout instant t , pour chacune des 4 valeurs de PSF mentionnées ci-dessus, sont présentés sur la figure 4.7. Cette dernière montre que la valeur du PSF n'impacte

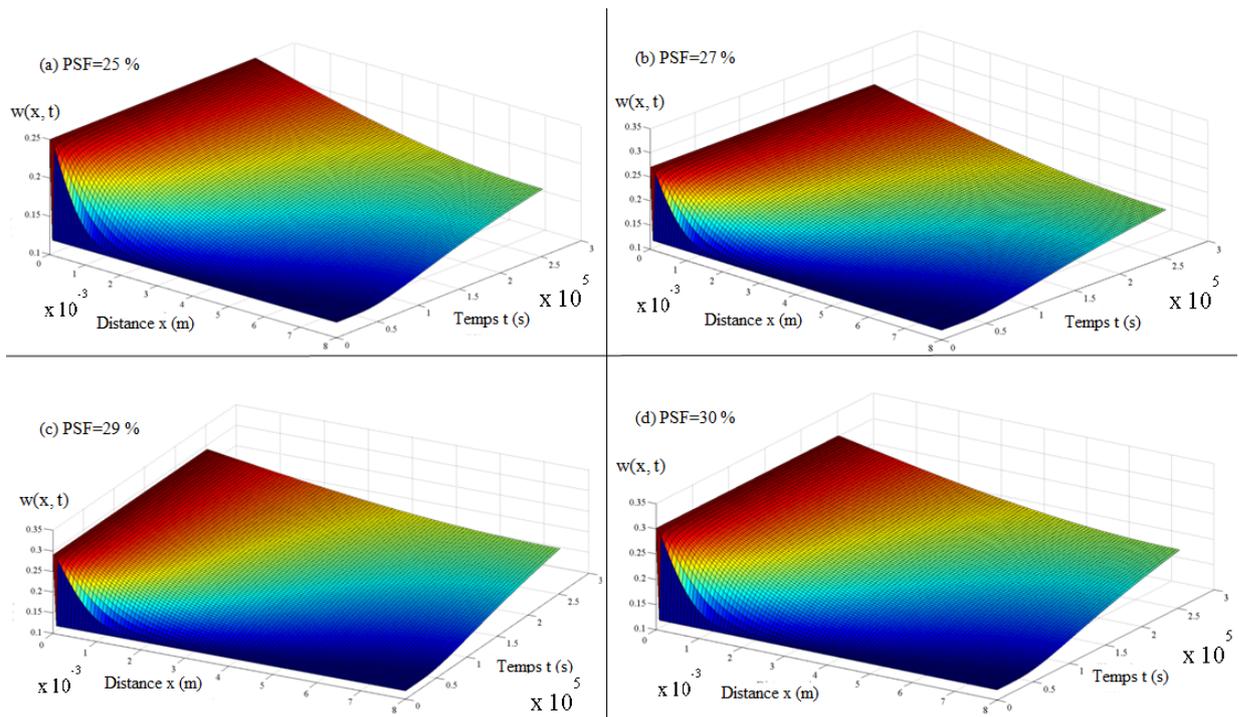


FIGURE 4.7: profils de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $0 \leq t \leq t_f$ pour chaque PSF

pas l'allure de la solution numérique de la loi de Fick 1-D mais plutôt les valeurs de celle-ci en chaque point du maillage. Afin de mieux s'en apercevoir, les quatre profils obtenus en faisant varier le PSF de 25 à 30 % sont représentés dans le même système de coordonnées sur la figure 4.8. On voit nettement que pour un temps et une position donnés la valeur de la teneur en eau croît lorsque le PSF augmente. En effet, la CL d'état hydrique sur la face de l'éprouvette en contact avec l'eau est supposée être égale au PSF , donc à une position donnée dans l'épaisseur de l'éprouvette et à un instant fixé, la valeur de la teneur en eau sera plus élevée lorsque celle

du PSF l'est. La figure 4.9 présente le profil de la teneur en eau à $t = t_f$ au sein de l'épaisseur pour chaque valeur de PSF . En effet, à $t = t_f$:

- pour $PSF = 30\%$, on a $21,33\% \leq w(x, t_f) \leq 30\%$
- pour $PSF = 29\%$, on a $20,81\% \leq w(x, t_f) \leq 29\%$
- pour $PSF = 27\%$, on a $19,77\% \leq w(x, t_f) \leq 27\%$
- pour $PSF = 25\%$, on a $18,77\% \leq w(x, t_f) \leq 25\%$

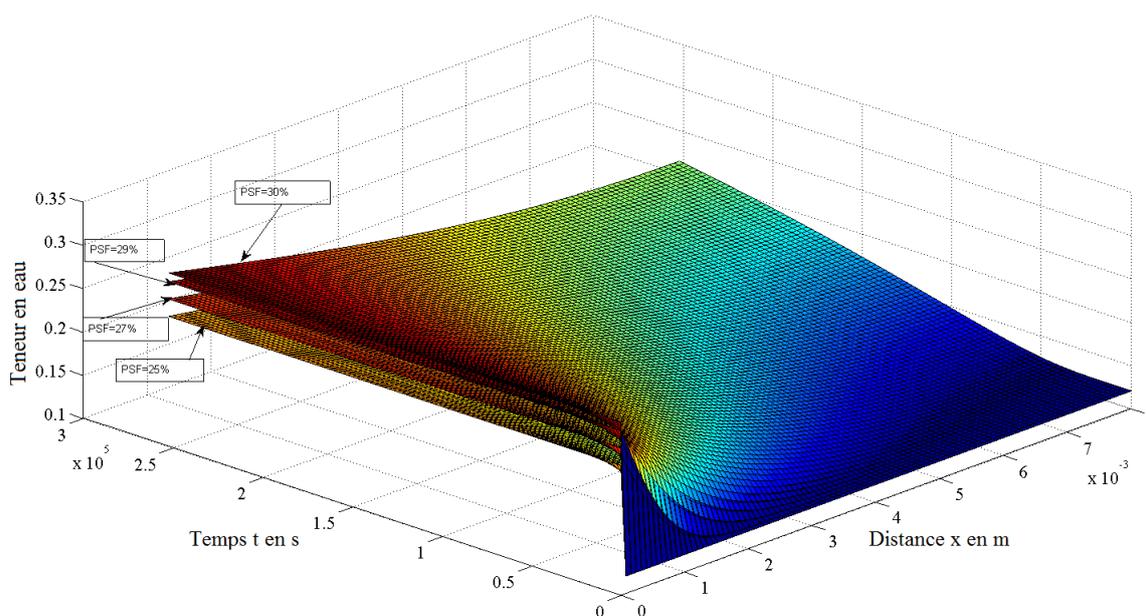


FIGURE 4.8: comparaison des profils au sein de l'épaisseur pour $0 \leq t \leq t_f$

La figure 4.10 montre l'évolution de la teneur en eau au bord $x = l$ pour chaque valeur de PSF étudiée. On constate que cette dernière impacte fortement la teneur en eau en ce point notamment lorsque la diffusion dure dans le temps. En effet, à $t = t_f$ en $x = l$, pour des valeurs de PSF respectives de 25, 27, 29, 30 %, la teneur en eau s'est accrue respectivement de 6,74 %, 7,77 %, 8,81 % et 9,33 % ; par rapport à sa valeur initiale de 12 %. La figure 4.11 présente ces valeurs sous forme de diagramme en barres. La valeur moyenne du PSF est de 27,75 % et son écart type est de 2,22 %, tandis que la valeur moyenne de l'accroissement de $w(l, t_f)$ est de 8,16 % et son écart type est de 1,15 %. On voit bien que l'écart type de l'accroissement de la teneur en eau au bord $x = l$, à $t = t_f$, est quasiment divisé par deux comparé à celui des valeurs de PSF étudiées.

La conclusion que l'on peut tirer de cette étude est que la valeur du PSF impacte

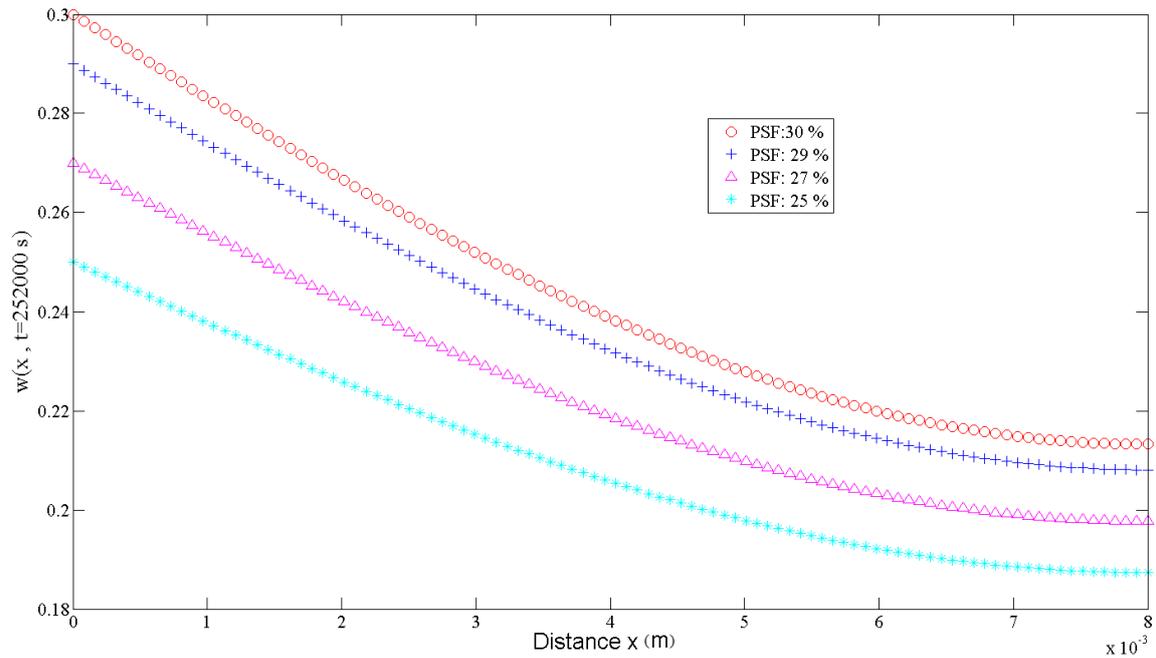


FIGURE 4.9: effet du PSF sur le profil de la teneur en eau au sein de l'épaisseur pour $t = t_f$

globalement et de manière notable la valeur de la solution numérique en chaque point du maillage temporel et spatial. L'impact du PSF sur les paramètres recherchés sera discuté dans la sous section 3.2. L'influence de l'épaisseur l sur la solution numérique de la loi de Fick est également présentée dans l'annexe 4.1.

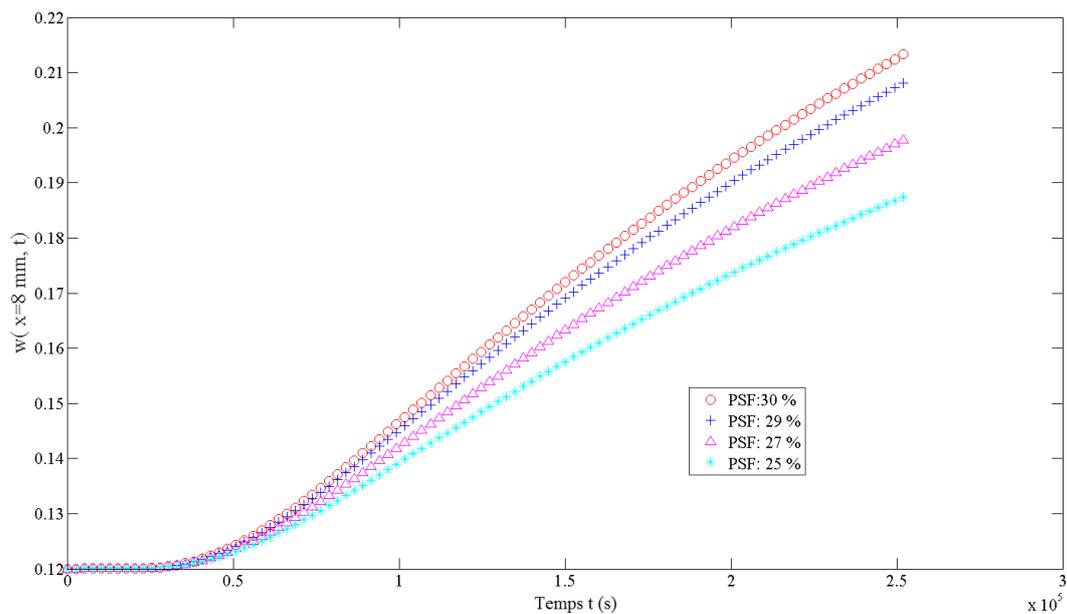


FIGURE 4.10: effet du PSF sur l'évolution de la teneur en eau au bord $x = l$

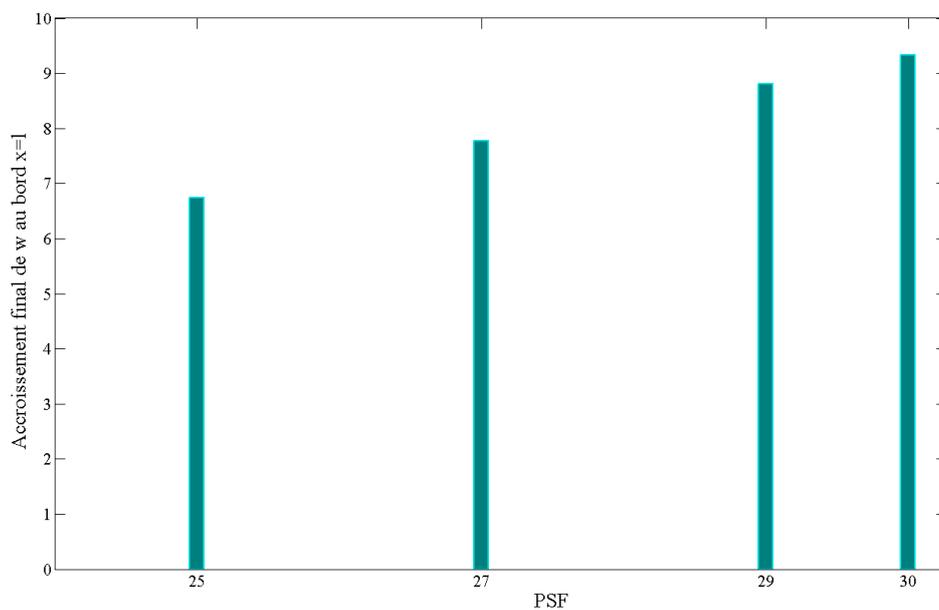


FIGURE 4.11: accroissement de $w(l, t_f)$ pour chaque valeur du PSF

3.2 Identification sur données simulées

Dans cette sous section, la convergence de la méthode est discutée ainsi que l'impact du maillage et du PSF sur la valeur des paramètres recherchés.

3.2.1 Convergence de la méthode

La méthode d'identification est axée sur la minimisation d'une fonction coût construite à partir de données simulées, en l'occurrence celles présentées sur la figure 4.3. α étant le coefficient d'expansion hydrique, la déformation à tout instant t au bord $x = l$ est donnée par $\varepsilon(l, t) = \alpha \Delta w(l, t)$. La fonction coût à minimiser est donnée par l'équation 4.18.

$$F = \sum_{k=1}^N [\varepsilon_{rsim}(l, t_k) - \alpha \Delta w(l, t_k)]^2 \quad (4.18)$$

où N est le nombre d'éléments correspondant à la discrétisation temporelle qui est égal à 100 si on fait référence au tableau 4.1. $\varepsilon_{rsim}(l, t_k)$ est la déformation réelle simulée. Concrètement, pour $D = 10^{-10} m^2/s$ et avec les conditions limites indiquées à la sous section 3.1, on résout numériquement la loi de Fick 1-D, puis on en déduit $\varepsilon_{rsim}(l, t_k)$ pour $\alpha = 0,30\%/%$. Ensuite on minimise l'écart entre $\varepsilon_{rsim}(l, t_k)$ et $\alpha \Delta w(l, t_k)$. Lorsqu'on utilise les paramètres exacts comme valeurs d'entrée avec le paramétrage par défaut du solveur $fmincon$, l'algorithme fait une itération et donne comme valeurs de sortie celles utilisées pour simuler les données réelles, i.e $D_{xx} = 10^{-10} m^2/s$ et $\alpha = 0,30\%/%$. L'algorithme a été aussi lancé avec comme point d'entrée $D_{xx} = 10^{-9} m^2/s$ et $\alpha = 0,10\%/%$. Les critères d'arrêt sont les tolérances sur la variation des paramètres recherchés et la fonction coût, prises égales à 10^{-17} . Les résultats de sortie sont présentés sur la figure 4.12. Cette dernière présente l'évolution de la fonction coût, le nombre total d'évaluations de la fonction coût et le "first order of optimality" (équivalent aux conditions de *Kuhn-Tucker*) à chaque itération. Comme on peut le voir sur cette figure, la convergence de l'algorithme est justifiée et les paramètres optimaux sont $D_{xx} = 10^{-10} m^2/s$ et $\alpha = 0,30\%/%$. En effet, la décroissance de la fonction coût ainsi que la diminution du "first order of optimality" attestent la convergence de méthode.

L'impact du maillage ainsi que de la valeur du PSF seront discutés ci-dessous.

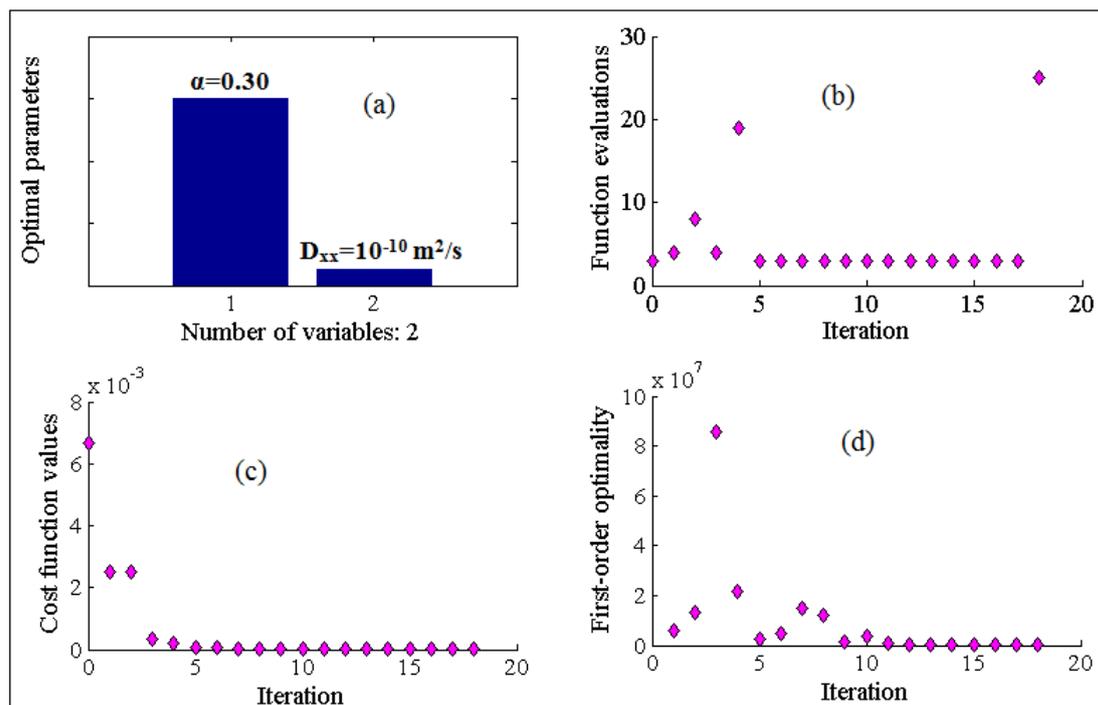


FIGURE 4.12: résultats de validation : a)-paramètres identifiés, b)-valeur de la fonction coût à chaque itération, c)-nombre total d'évaluations de la fonction coût à chaque itération, d)-évolution du " *first order of optimality* "

3.2.2 Impact du maillage et du PSF sur les paramètres identifiés

L'exemple traité au point 3.2.1 a été repris en considérant des maillages spatiaux différents. On a remarqué que le maillage spatial n'impacte pas les résultats des paramètres identifiés, mais il a un effet sur la durée de la résolution du problème. Concernant la discrétisation temporelle, elle est choisie en fonction du nombre de points où la déformation réelle est connue donc il doit être au plus égal à ce nombre. Son choix doit permettre de retrouver une allure de la déformation issue des paramètres identifiés correspondant à l'allure réelle. Quant à la valeur du *PSF*, il est évident qu'elle a un impact sur les paramètres identifiés puisqu'elle influence les profils d'état hydrique à partir desquels la fonction coût est construite. Son impact sera évalué dans la section 4 où l'identification sera faite sur des données expérimentales.

4 Applications aux données expérimentales

La méthode d'identification inverse est maintenant appliquée aux résultats expérimentaux des éprouvettes A et B , obtenus durant la phase d'adsorption. La procédure de construction de masques détaillée dans la section 6 au chapitre 3 est utilisée. Quatre cas d'études sont effectués avec pour chaque éprouvette deux masques (un pour EW et un pour LW) pour chaque cas. Pour l'éprouvette A , $\varepsilon_{LM_{min}} = 0\%$ and $\varepsilon_{LM_{max}} = 7,99\%$, et pour l'éprouvette B , $\varepsilon_{LM_{min}} = 0\%$ et $\varepsilon_{LM_{max}} = 4,96\%$. Des exemples de masques sont présentés dans l'annexe 4.2. Les valeurs des paramètres utilisés pour construire les masques de l'éprouvette A sont présentés dans le tableau 4.2. D'autre part, le tableau 4.3 présente les paramètres utilisés pour obtenir les

Cas d'études	Percent _{EW}	Percent _{LW}
Cas 1	0,019	0,030
Cas 2	0,019	0,035
Cas 3	0,019	0,040
Cas 4	0,020	0,040

TABLE 4.2: paramètres utilisés pour les masques de l'éprouvette A .

masques de l'éprouvette B .

Cas étudiés	Percent _{EW}	Percent _{LW}
Cas 1	0,012	0,0296
Cas 2	0,012	0,028
Cas 3	0,012	0,026
Cas 4	0,010	0,026

TABLE 4.3: paramètres utilisés pour les masques de l'éprouvette B .

La figure 4.13 montre la variation de cette amplitude pour LW pour différents masques. On s'aperçoit que le masque impacte l'amplitude de la déformation radiale moyenne de l'éprouvette A . Sur la figure 4.14 on note que le choix du masque agit également sur l'amplitude de la déformation radiale moyenne de LW et EW pour l'éprouvette B . En effet, plus $\varepsilon_{LW_{min}}$ est grande, plus l'amplitude de la déformation de LW est élevée, et plus $\varepsilon_{EW_{max}}$ est petite, plus l'amplitude de la déformation radiale moyenne de EW est faible.

Les masques des quatre cas d'études de chaque éprouvette sont utilisés pour identifier les paramètres avec une valeur du PSF de 30 %. Le tableau 4.4 présente

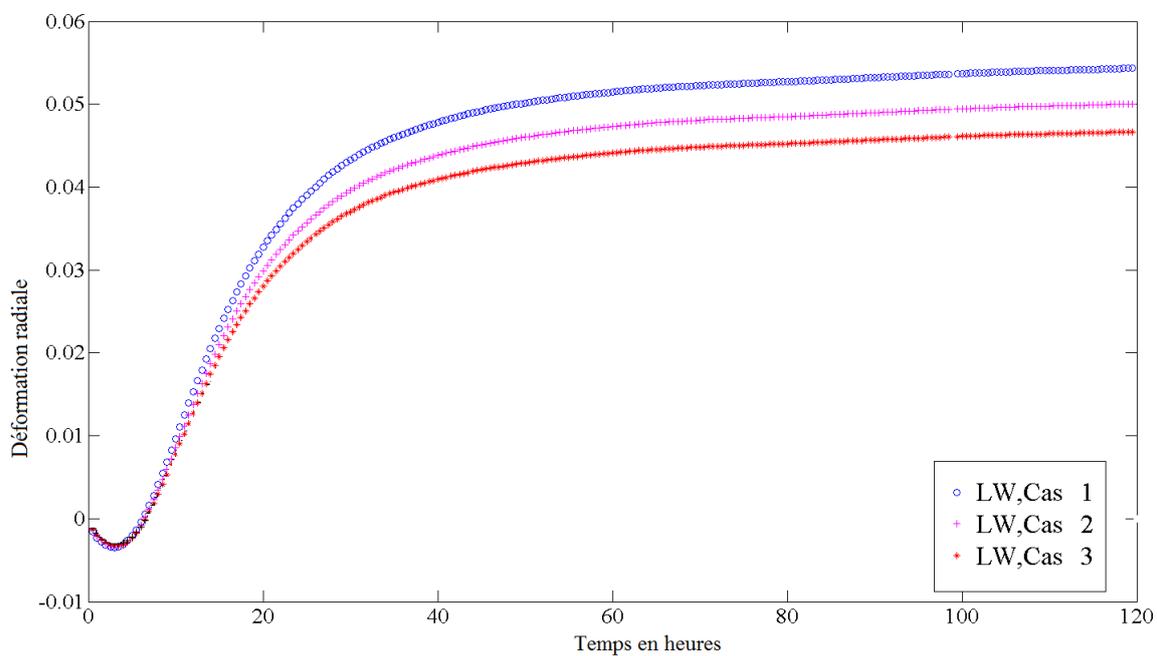


FIGURE 4.13: effets du masque sur l'amplitude, éprouvette A.

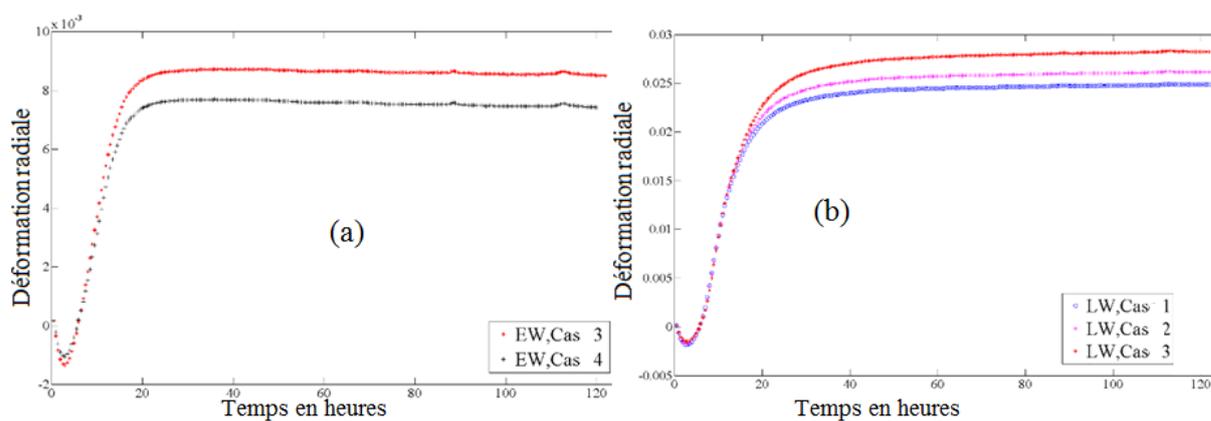


FIGURE 4.14: effets du masque sur l'amplitude, éprouvette B.

les résultats issus de l'identification pour l'éprouvette *A*. On remarque bien que les paramètres identifiés peuvent subir de légères variations d'un masque à un autre. Ce constat reste le même pour les résultats obtenus pour l'éprouvette *B*, voir le tableau 4.5. Dans le chapitre précédent, on avait noté que l'éprouvette *A* prélevée

Cas étudiés	$D_{EW}(m^2/s)$	$D_{LW}(m^2/s)$	$\alpha_{REW}(\%/ \%)$	$\alpha_{RLW}(\%/ \%)$
Cas 1	2,0635E-09	1,1290E-09	7,44E-02	25,20E-02
Cas 2	2,0635E-09	1,1207E-09	7,44E-02	23,09E-02
Cas 3	2,0635E-09	1,1150E-09	7,44E-02	21,63E-02
Cas 4	2,0440E-09	1,1150E-09	7,69E-02	21,63E-02

TABLE 4.4: résultats obtenus pour l'éprouvette *A* ($PSF=30\%$).

Cas étudiés	$D_{EW}(m^2/s)$	$D_{LW}(m^2/s)$	$\alpha_{REW}(\%/ \%)$	$\alpha_{RLW}(\%/ \%)$
Cas 1	1,3323E-09	9,9097E-10	5,01E-02	12,75E-02
Cas 2	1,3323E-09	1,1374E-09	5,01E-02	13,82E-02
Cas 3	1,3323E-09	1,0434E-09	5,01E-02	14,94E-02
Cas 4	1,2897E-09	1,0434E-09	4,45E-02	14,94E-02

TABLE 4.5: résultats obtenus pour l'éprouvette *B* ($PSF=30\%$).

de *PERIPH2* subissait un niveau de déformation hydrique beaucoup plus prononcé que celui de l'éprouvette *B* issue de *PERIPH1*. Une observation au MEB, a révélé que l'épaisseur des trachéides du bois issu de *PERIPH2* est supérieure à celle du bois provenant de *PERIPH1*, ce qui expliquerait cette différence de niveau de déformation. Cette conclusion partielle est en parfait accord avec les résultats obtenus en terme de coefficients d'expansion hydrique pour les éprouvettes *A* et *B*. En effet, le coefficient d'expansion hydrique de LW_A , (respectivement de EW_A), est plus élevé que celui de LW_B , (respectivement de EW_B). Le coefficient d'expansion hydrique augmente lorsque la densité accroît (Watanabe et al. (1998)).

On note également que pour chacune des éprouvettes *A* et *B*, la diffusivité hydrique de EW est supérieure à celle de LW , ce qui est tout fait en accord avec le fait que LW soit plus dense que EW (Pereira et al. (2013)).

Cependant, on note que d'une manière globale, les paramètres de diffusivité hydrique identifiés pour l'éprouvette *A* sont plus élevés que ceux évalués pour *B*. Une autre explication est nécessaire pour justifier ce résultat. L'une des explications possibles serait la présence plus prononcée de rayons ligneux dans *B* conformément

aux résultats obtenus au MEB sur des éprouvettes issues respectivement de *PERIPH1* et de *PERIPH2* (voir section 7 du chapitre 3). En effet, la présence des rayons ligneux accroît la diffusivité dans le plan transverse donc aussi dans la direction tangentielle.

L'analyse de ces résultats montre et confirme l'existence de la variabilité locale et spatiale des propriétés hydriques du bois.

On avait évoqué dans la sous-section 3.1.2 que le *PSF* avait un impact sur les valeurs de teneur en eau obtenues. Pour s'apercevoir de son impact sur les paramètres identifiés, les masques des cas 1 et 2 (voir tableau 4.2) de l'éprouvette *A* sont utilisés avec trois valeurs de *PSF* : 25 %, 27 % et 29 % en plus des 30 %. Les résultats obtenus après identification sont donnés au tableau 4.6. Les paramètres identifiés pour les cas 1 et 2, témoignent de l'effet du changement de la valeur du *PSF* sur ceux-ci. En effet, les coefficients d'expansion sont beaucoup plus sensibles au changement du *PSF*. On remarque bien que la valeur du coefficient d'expansion augmente lorsque celle du *PSF* décroît et ceci quel que soit le type de bois considéré (*EW* ou *LW*). La figure 4.15 qui représente les résultats obtenus avec les masques du cas 1 sous forme de diagramme en barres confirme ce constat. Cependant, le coefficient d'expansion hydrique est une propriété intrinsèque du bois donc le fait de changer la valeur du *PSF* qui est juste une *CL* dans le cas de notre étude ne devrait pas impacter autant la valeur du coefficient d'expansion. Ceci suggère que les valeurs obtenues du coefficient d'expansion hydrique ne sont que des valeurs apparentes.

PSF=25 % (a)				
Cas étudiés	$D_{EW}(m^2/s)$	$D_{LW}(m^2/s)$	$\alpha_{REW}(\%/‰)$	$\alpha_{RLW}(\%/‰)$
Cas 1	2,0626E-09	1,1285E-09	10,31E-02	34,9E-02
Cas 2	2,0626E-09	1,1204E-09	10,31E-02	31,98E-02
PFS=27 % (b)				
Cas étudiés	$D_{EW}(m^2/s)$	$D_{LW}(m^2/s)$	$\alpha_{REW}(\%/‰)$	$\alpha_{RLW}(\%/‰)$
Cas 1	2,0638E-09	1,1289E-09	8,93E-02	30,24E-02
Cas 2	2,0638E-09	1,1204E-09	8,93E-02	27,71E-02
PSF=29 % (c)				
Cas étudiés	$D_{EW}(m^2/s)$	$D_{LW}(m^2/s)$	$\alpha_{REW}(\%/‰)$	$\alpha_{RLW}(\%/‰)$
Cas 1	2,0640E-09	1,1293E-09	7,88E-02	26,68E-02
Cas 2	2,0640E-09	1,1209E-09	7,88E-02	24,45E-02

TABLE 4.6: étude de l'influence du PSF sur les paramètres identifiés, éprouvette A.

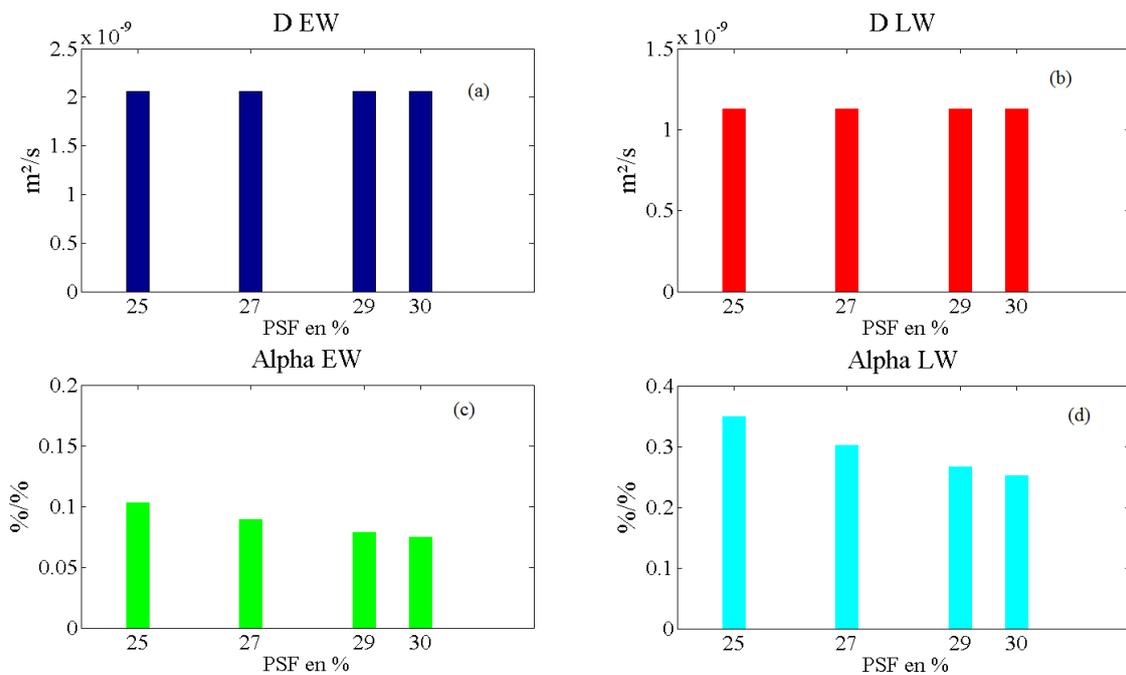


FIGURE 4.15: influence du PSF sur les paramètres identifiés, éprouvette A, cas 1.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la démarche qui a permis de proposer une méthode d'identification paramétrique inverse du bois à l'échelle du cerne de croissance,

avec comme données d'entrée les déformations hydriques obtenues avec la méthode de la grille. L'objectif était d'évaluer les coefficients de diffusion et d'expansion hydriques de LW et EW et leur teneur en eau en phase d'adsorption. La résolution du problème posé dans ce chapitre s'est appuyée sur des hypothèses dont la relation linéaire entre la variation de la teneur en eau et la déformation hydrique ainsi que de la validité de la loi de Fick pour un problème unidimensionnel. La résolution de cette dernière a été faite de manière numérique en utilisant Matlab^(R). Ce modèle numérique résolvant la loi de Fick a été couplé aux résultats expérimentaux pour construire des fonctions coût dont la minimisation sur Matlab^(R) permet d'accéder aux paramètres recherchés. Dans un premier temps la méthode a été validée numériquement. L'étude de l'influence du maillage ainsi que celle de la valeur du PSF ont été également effectuées. L'application de la méthode aux données expérimentales a donné des paramètres tout à fait en accord avec les résultats escomptés. L'étude de l'impact du masque et celle de la valeur du PFS ont été faites. Les structures bois en service sont en réalité soumises simultanément aux sollicitations mécanique et hydrique, c'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5 : Étude du bois en séchage sous contrainte à l'échelle du cerne par la méthode de la grille

Introduction

L'objectif, dans le présent chapitre, est d'étudier le comportement du bois à l'échelle du cerne de croissance sous l'effet couplé de chargements hydrique (séchage) et mécanique (compression). La méthode de la grille déjà employée aux chapitres 3 et 4, est également utilisée ici pour l'obtention des champs de déformation. Dans un premier temps les conditions expérimentales sont présentées. On aborde d'abord les contraintes expérimentales ainsi que les moyens matériels et méthodes déployés pour mener à bien les expérimentations. Les résultats expérimentaux sont ensuite présentés. Les cartes de déformations radiales obtenues lors des différentes expérimentations en environnement variable sont présentées et discutées. Comme déjà précisé dans la section 3 du chapitre 4, la déformation du bois sous contrainte dans un tel environnement inclut le comportement élastique, le fluage viscoélastique, la mécanosorption et le retrait/gonflement. Une investigation à l'échelle du cerne du bois en séchage sous contrainte est ensuite effectuée. Enfin, des méthodes d'identification paramétriques sont proposées afin de caractériser le bois en environnement constant ou variable sous contrainte, et de partitionner la déformation totale.

1 Conditions expérimentales

Les contraintes expérimentales, les approches expérimentales et le conditionnement des éprouvettes seront abordées dans cette section. Ensuite, le dispositif expérimental sera présenté et la validation du système de limitation des échanges hydriques sera également discutée.

1.1 Contraintes expérimentales

Le problème principal qui se pose dans le cas présent est relatif au contrôle et à la mesure de la teneur en eau de l'éprouvette lors du séchage sous chargement en compression en utilisant la méthode de la grille comme moyen d'investigation. En effet, l'utilisation d'une telle technique en vue d'obtenir la réponse du matériau, nécessite une acquisition directe d'images de la surface étudiée de l'éprouvette testée. Donc l'idéal, serait d'avoir tout le dispositif expérimental dans une enceinte contrôlée en humidité et en température et offrant la possibilité de suivre l'évolution de la teneur en eau intrinsèque de l'éprouvette sous contrainte mécanique, ceci tout en

permettant d'acquérir des images. Nous ne disposons pas cependant d'un tel équipement. Le conditionnement retenu pour l'étude expérimentale est présenté dans la sous-section 1.2.

1.2 Approches expérimentales et conditionnement des éprouvettes

Vu les contraintes explicitées dans la sous-section 1.1, le conditionnement suivant a été utilisé. Chaque éprouvette testée est d'abord immergée dans de l'eau pour une durée inférieure à 24 heures, après avoir transféré la grille et pesé sa masse avant immersion. Ensuite, à l'issue de l'immersion, elle est essuyée pour éliminer toute pellicule d'eau en surface puis pesée pour connaître sa teneur en eau. Cette dernière dépasse facilement le *PSF* (environ 30 %). L'éprouvette est donc laissée dans une salle où l'humidité et la température sont contrôlées afin de subir un séchage naturel libre dans ces conditions. Au fur et à mesure que le séchage s'opère, on vient peser l'éprouvette pour voir si la teneur en eau globale est proche de la valeur de 30 %. Lorsque la teneur en eau intrinsèque globale est jugée suffisamment proche de cette valeur spécifiée, le chargement mécanique est appliqué. Ce dernier peut être réalisé de deux manières. La première approche qui a été testée consiste en des chargements cycliques instantanés répétés. A un instant donné on effectue une pesée et une acquisition d'images sous chargement mécanique puis on décharge et on attend un certain temps avant de répéter la même opération. Ce processus peut être effectué à différents instants donnés au fur et à mesure que le séchage s'opère. Donc pour chaque instant de pesée, on dispose de la réponse du matériau pour un cycle de chargements instantanés. Il est possible d'évaluer les modules d'élasticité à chaque instant correspondant à une pesée donc à une teneur en eau. Par conséquent, l'influence du séchage les propriétés mécaniques du bois peut être appréciée via l'évaluation de l'évolution des modules d'élasticité au cours de la perte de masse. Cette approche permet également de connaître la teneur en eau à tout instant souhaité mais n'offre pas la possibilité de voir le couplage entre variations hydriques et chargement mécanique car la durée d'application du chargement instantané est très courte (<3 minutes). Par voie de conséquence, une seconde approche a été envisagée.

Dans cette deuxième approche, une fois que l'éprouvette est conditionnée en humidité, on applique un chargement continu. Le problème qui se posera donc sera axé sur

la détermination des teneurs en eau aux différents instants de prise d'images. Pour palier ce problème, l'utilisation d'une éprouvette témoin qui a quasiment les mêmes caractéristiques que l'éprouvette testée est envisageable. Cette deuxième éprouvette sera exactement conditionnée en humidité comme celle destinée au chargement mécanique. Alors que la première éprouvette est sous chargement mécanique continu, la deuxième est pesée à chaque prise d'image afin d'obtenir la teneur en eau correspondante.

Même si les deux approches présentées ci-dessus s'intéressent à la problématique du comportement du bois lors d'un séchage naturel sous contrainte mécanique, elles l'abordent selon deux angles différents. En effet, la première approche permet d'évaluer l'effet du séchage sur les modules d'élasticité et vu que l'éprouvette n'est chargée que ponctuellement pendant chaque mesure, il n'y aura pas de couplage mécano-hydrique. Donc cette approche se résume en une appréciation des effets du séchage sur les modules d'élasticité. La seconde approche, quant à elle, offre la possibilité d'étudier le couplage mécano-hydrique dans la mesure où l'éprouvette sur laquelle porte l'expérimentation est chargée de manière continue. Donc dans cette présente démarche, on cherche à évaluer l'impact de l'effet couplé du séchage et d'un chargement mécanique sur le comportement du bois. Cependant, l'utilisation d'une éprouvette témoin pour obtenir les teneurs en eau dans la seconde approche n'est pas bien adaptée car son histoire hydromécanique est sans doute trop différente de celle de l'éprouvette testée à cause des fluctuations des réponses d'une éprouvette à l'autre liées au caractère hétérogène du bois. Il faut donc adopter d'une troisième approche. Cette dernière peut être vue comme étant un compromis entre les deux premières approches. En effet, elle consiste en un chargement répétitif non instantané lors du séchage naturel. Durant chaque cycle de chargement, la charge est maintenue pendant une durée jugée suffisamment longue pour espérer observer les effets de couplage, mais suffisamment courte pour ne pas perdre trop d'informations sur la variation de la teneur en eau intrinsèque du bois. En effet, celle-ci ne sera connue qu'au début et à la fin de chaque cycle de chargement. Par conséquent, lors d'un cycle de chargement, la teneur en eau est supposée évoluer linéairement car elle n'est connue qu'à deux instants seulement. La validité de cette évolution va dépendre fortement de la durée de chargement, car en réalité la teneur en eau varie de manière non linéaire en fonction du temps. Lors de l'expérimentation on a enlevé l'éprouvette du montage pour la mettre dans un sac plastique étanche, le tout dans un sac isotherme la nuit afin de réduire au maximum les échanges hydriques avec le milieu

ambiant. La validation de ce mode de conservation est présentée dans le paragraphe 1.3.1.

1.3 Éprouvettes testées

Les éprouvettes utilisées proviennent du même tronc d'arbre que celles présentées au chapitre 3, section 4. Elles ont été obtenues selon la même procédure de découpe et leur teneur en eau initiale est d'environ 12 %. Une éprouvette est utilisée pour la validation du système de limitation des échanges hydriques non souhaités. Trois autres éprouvettes sont testées en compression sous séchage. Ces éprouvettes ont une épaisseur d'environ 2 cm afin d'éviter les risques de flambage sous compression. On rappelle que toutes les éprouvettes testées sont en Sapin Blanc du Massif Central.

1.3.1 Validation du système de limitation des échanges hydriques

Le scan d'une des faces (L, R) de l'éprouvette testée est présenté sur la figure 5.1. Cette éprouvette a pour dimensions $L \times R \times T = 50 \times 49 \times 20 \text{ mm}^3$. Sa masse sèche est égale à 20,38 g. Après une mise en eau par immersion de 93 heures, celle-ci est de 36,83 g. Le gain de masse est de 16,45 g par rapport à sa masse initiale, soit une teneur en eau intrinsèque de 80,7 %. Cette valeur de la teneur en eau indique que le point de saturation des fibres (*PSF*) est largement dépassé puisqu'il est de l'ordre de 30 %. Le tableau 5.1 montre bien que malgré l'utilisation d'un système

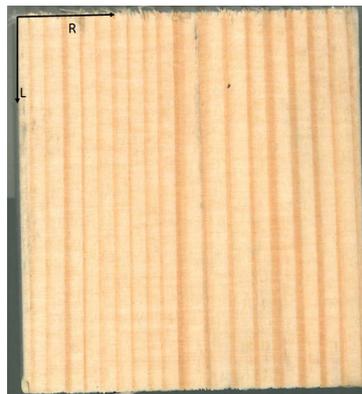


FIGURE 5.1: scan d'une face sur le plan (L, R) de l'éprouvette de validation du dispositif de conservation

de conditionnement pour limiter les échanges hydriques entre l'éprouvette et son

environnement extérieur d'un jour au suivant, il y a une légère perte de masse. Cette dernière est de 220 mg de J_1 à J_2 tandis qu'elle est égale à 400 mg de J_2 à J_3 . Enfin elle prend une valeur de 240 mg de J_3 à J_4 ; soit un total de 860 mg de perte de masse due au système de conditionnement pour la limitation des échanges hydriques de J_1 à J_4 . Cette perte totale représente 5,23 % de teneur en eau mais vu le temps écoulé entre la dernière mesure de J_1 et la première de J_2 , la dernière mesure de J_2 et la première de J_3 , et la dernière mesure de J_3 et la première de J_4 , elle reste relativement faible. Donc le système de limitation des pertes de masse non souhaitées semble bien adapté. Il sera utilisé pour toutes les expérimentations qui seront présentées par la suite dans le présent chapitre.

Jours	J1			J2				J3			J4	
N° pesée	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
M _{tot} en g	36,83	-	33,73	33,51	33,49	31,58	30,83	30,43	29,62	28,81	28,57	27,84
M _{eau} en g	16,45	-	13,35	13,13	13,11	11,2	10,45	10,05	9,24	8,43	8,19	7,46
w (%)	80,7	-	65,5	64,42	64,32	54,95	51,27	49,31	45,33	41,36	40,18	36,6
Temps relatif	0 h	2 h	5 h 42'	0 h	2 h	4 h	6 h	0 h	2 h	4 h	0 h	2 h
Heure	9h45'	11h45'	15h27'	9h35'	11h35'	13h38'	15h38'	10h40'	12h42'	14h57'	9h48'	11h48'

TABLE 5.1: résultats de validation du dispositif de conservation

1.3.2 Éprouvettes à solliciter en compression

Dans ce qui suit, le terme expérimentation désigne une succession d'essais de chargement et de déchargement.

Trois expérimentations sont effectuées sur trois éprouvettes débitées sur quartier du même tronc d'arbre. Une photographie de la face étudiée et des faces latérales de chacune de ces éprouvettes est présentée sur les figures 5.2, 5.3 et 5.4. On note une différence notable sur la taille et l'inclinaison des cernes annuels de croissance dans les plans (R, T) et (R, L). Ceci impacte sans aucun doute la réponse de chacune de ces éprouvettes en terme de déformation. La différence de couleur d'une éprouvette à l'autre est due principalement à un effet optique lors de la prise des photographies et non au matériau. L'éprouvette (Ep1) testée lors de la première expérimentation a pour dimensions $L \times R \times T = 48 \times 40 \times 18 \text{ mm}^3$ tandis que celle (Ep2) lors de la deuxième expérimentation a pour dimensions $L \times R \times T = 48 \times 42 \times 18 \text{ mm}^3$. La troisième éprouvette (Ep3) a quant à elle pour dimensions $L \times R \times T = 48 \times 43 \times 18 \text{ mm}^3$. Pour chacune des ces trois éprouvettes, la face (L, R) montrée sera étudiée.

Cette dernière sera équipée d'une grille croisée avec le même pas ($200 \mu\text{m}$) selon L et R. La procédure de transfert de la grille est la même que celle utilisée au chapitre 3 (Piro & Grédiac (2004)). Le tableau 5.2 présente les masses avant et après transfert de la grille sur chacune des éprouvettes. Les teneurs en eau seront déterminées par rapport aux masses en prenant en compte la présence de la grille. La colle qui a servi de support pour le transfert de la grille est hydrophobe donc sa masse est supposée constante.

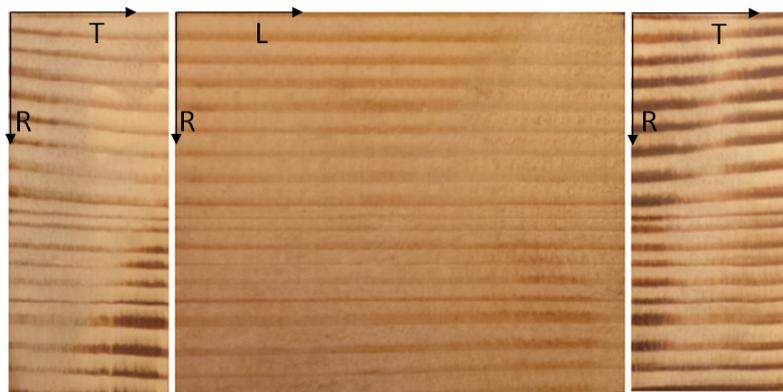


FIGURE 5.2: éprouvette testée lors de la première expérimentation (Ep1)

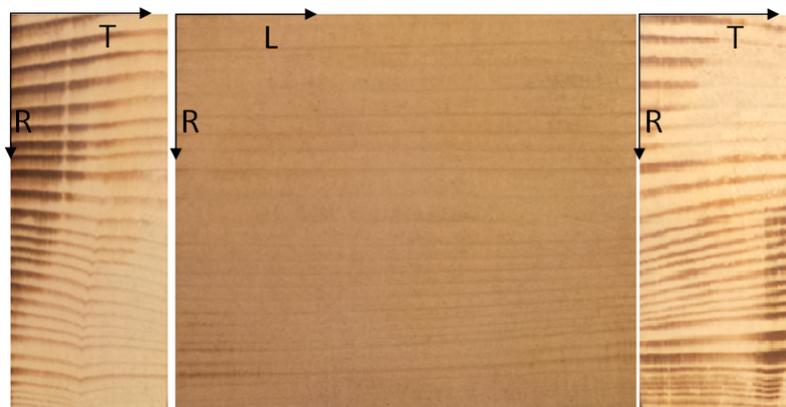


FIGURE 5.3: éprouvette testée lors de la deuxième expérimentation (Ep2)

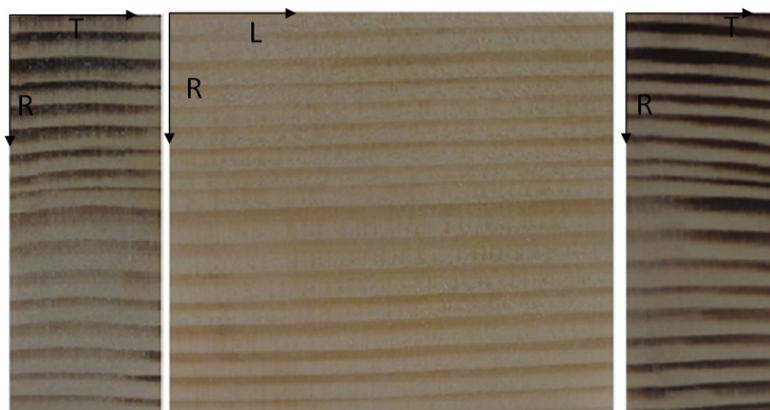


FIGURE 5.4: éprouvette testée lors de la troisième expérimentation (Ep3)

Désignations	Expérimentation 1	Expérimentation 2	Expérimentation 3
Masse initiale sans grille (g)	16,7043	17,9955	16,8693
Masse initiale avec grille (g)	17,7265	19,0160	17,6564

TABLE 5.2: masses initiales avec et sans grille

1.4 Dispositif expérimental

1.4.1 Éléments du dispositif

Le dispositif expérimental est constitué d'une caméra Sensicam équipée d'un capteur CCD. Celle-ci est positionnée et calibrée pour obtenir les paramètres souhaités pour mener à bien l'expérimentation. Une source de lumière blanche permet d'éclairer la face étudiée (équipée d'une grille). Une presse Zwick d'une capacité de 50 kN est utilisée pour le chargement en compression radiale. Durant l'expérimentation l'éprouvette est enlevée soit pour être pesée, soit pour être conservée dans le système de limitation d'échanges hydriques présenté au paragraphe 1.3.1. Donc la mise en place d'un système de maintien des paramètres initiaux de réglage est nécessaire. Pour ce faire, on doit mettre en place un système de repérage assurant un positionnement constant de l'éprouvette par rapport à la caméra. Le système de repérage est constitué d'une part de deux plots en acier sous forme de disques fixés sur le support et tangents à l'éprouvette. Ils sont positionnés en amont de celle-ci. Ils jouent ainsi le rôle d'une butée côté caméra en maintenant constante la distance entre l'éprouvette et celui-ci. En ce qui concerne la position de la cible par rapport à l'axe de la caméra, on a reporté l'axe de symétrie géométrique de l'éprouvette per-

pendiculaire au plan de mesure (R, L) sur le support de celui-ci, l'empreinte de cet axe est également sur la cible elle-même. On est ainsi capable de garantir un positionnement correct de l'éprouvette après chaque pesée. Afin de garantir une distribution uniforme de la charge appliquée sur l'éprouvette, une petite bande d'élastomère est disposé à chaque fois que nécessaire, sur la surface de chargement afin d'absorber les irrégularités éventuelles de cette dernière. Le dispositif expérimental en question est présenté sur la figure 5.5.

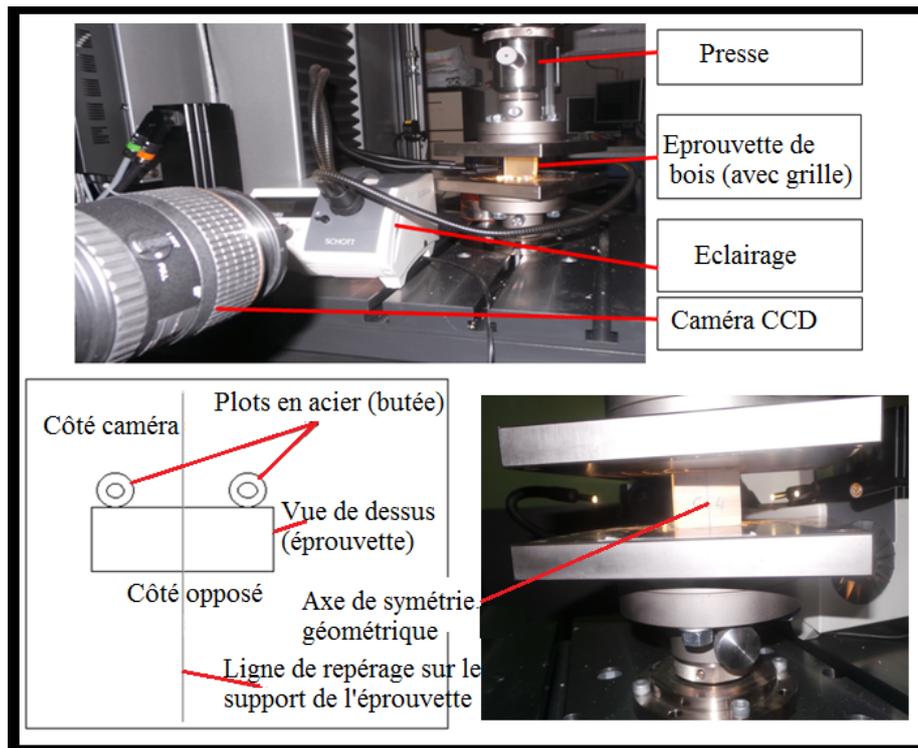


FIGURE 5.5: dispositif expérimental

1.4.2 Cycles de chargement/déchargement

Les cycles de chargement/déchargement appliqués lors des trois expérimentations effectuées en séchage sous compression, sont présentés ici . Pour chacune des expérimentations, le niveau de chargement (1,5 kN) et la durée de la recouvrance (2 heures) sont les mêmes. La compression est radiale pour toutes les éprouvettes testées. Cependant la durée de chargement est différente car elle n'a pas pu être définie de manière définitive avant expérimentation. Comme on l'a déjà mentionné précé-

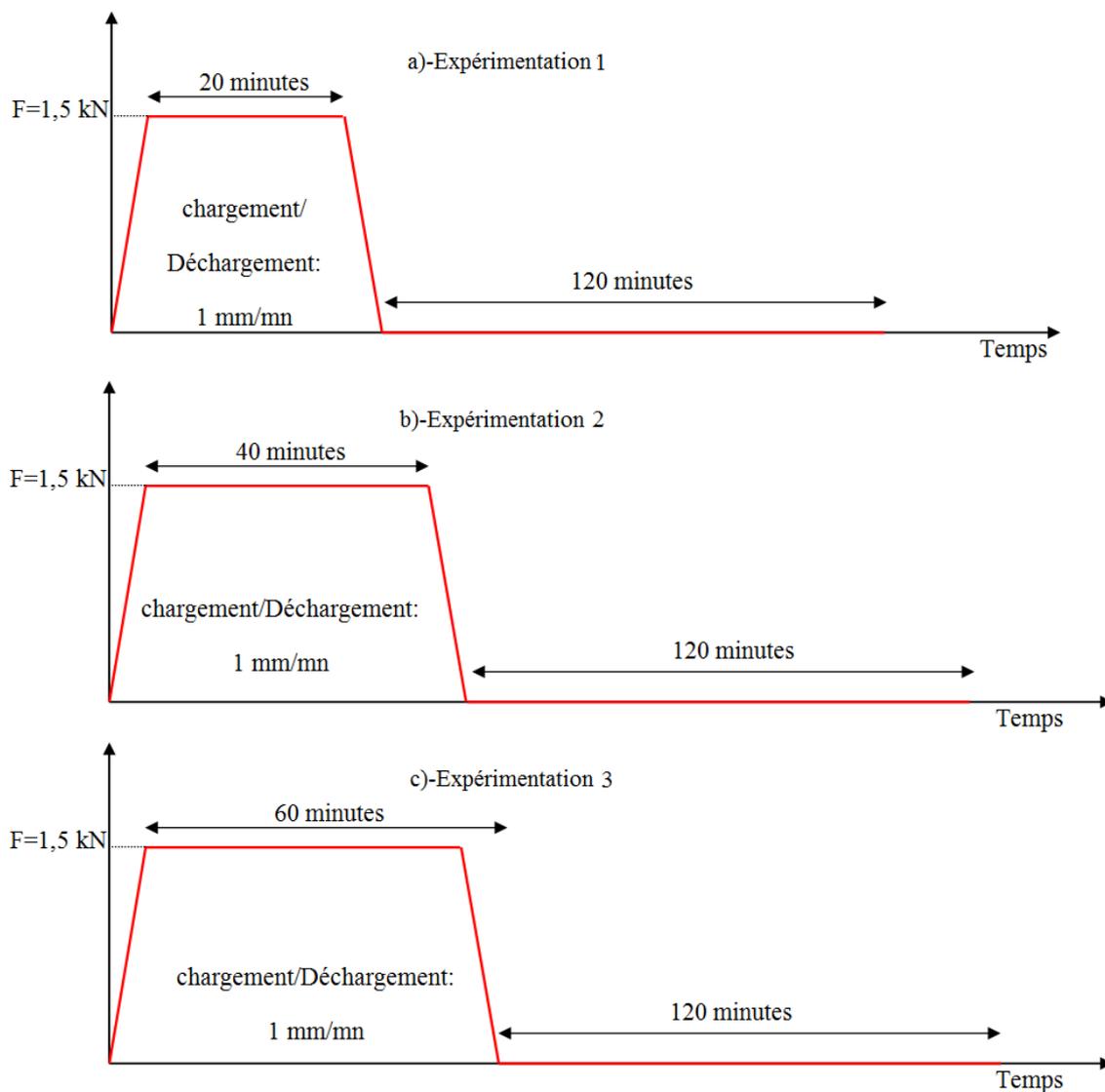


FIGURE 5.6: cycles de chargement/déchargement

demment, on souhaite une durée de chargement suffisamment longue pour que les effets de fluage et de mécanosorption se manifestent, et relativement courte pour ne pas engendrer une perte importante de masse (la masse est connue au début et à la fin de chaque chargement). La figure 5.6 présente les cycles de chargement/déchargement pour chacune des trois expérimentations.

1.4.3 Acquisition des images

Lors des trois expérimentations, la caméra est pilotée automatiquement via CamWare grâce à une macro *Ahk* comme déjà évoqué au chapitre 3. Ceci rend possible la moyenne des images à intervalles de temps réguliers afin de réduire le bruit. Cependant, le nombre d'images N_{im} à moyenner doit être fixée de sorte que l'éprouvette testée ne subisse pas, dans l'intervalle de prise de N_{im} , de modification significative géométrique à cause de chargement. Après validation, on a choisi $N_{im} = 8$. Le temps nécessaire pour prendre 8 images et pour les moyenner est d'environ d'une seconde, donc le matériau ne subit pas de modification significative. Chaque image traitée sera donc issue d'une moyenne de 8 images. Les moyennes sont les suivantes :

- une image moyennée sur 8 toutes les 15 secondes pour la phase de fluage de l'expérimentation 1,
- une image moyennée sur 8 toutes les 10 secondes pour la phase de fluage de l'expérimentation 2,
- une image moyennée sur 8 toutes les 15 secondes pour la phase de fluage de l'expérimentation 3,
- une image moyennée sur 8 toutes les 5 minutes pour la phase de recouvrance de l'expérimentation 3.

2 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux obtenus lors de trois expérimentations de séchage sous contrainte de compression sont présentés ici. Lors de la troisième expérimentation l'acquisition d'images a été faite pendant les phases de fluage (état chargé) et de recouvrance (état déchargé), tandis que pour les deux premières expérimentations, aucune image n'a été acquise pendant les phases de recouvrance. Les teneurs en eau sont déterminées par pesée avant et après chaque cycle de chargement afin d'obtenir les teneurs en eau.

2.1 Conditions hygrothermiques

Comme déjà spécifié dans la sous-section 1.2, chaque éprouvette est immergée pendant une durée inférieure à 24 heures dans de l'eau pour l'humidification. Ensuite elle est retirée, essuyée puis pesée pour connaître le gain de masse et en déduire la

teneur en eau. Les teneurs en eau obtenues étant élevées, les éprouvettes sont laissées à sécher naturellement dans la salle où se déroulent les expérimentations jusqu'à atteindre une teneur en eau intrinsèque jugée adéquate pour débiter le chargement mécanique. Le tableau 5.3 présente les teneurs en eau juste après immersion et au début du chargement mécanique pour chacune des trois éprouvettes testées. Au

Désignations	Expérimentation 1	Expérimentation 2	Expérimentation 3
W après immersion (%)	45,6	86,74	57,42
W avant chargement (%)	36,62	36,28	32,69

TABLE 5.3: teneur en eau après immersion et avant chargement mécanique

cours de chacune des expérimentations, la température et l'humidité de la salle sont sauvegardées grâce à un thermohygromètre piloté à distance. Le tableau 5.4 donne les valeurs moyennes de la température et de l'humidité relative ainsi que leurs écart-types pour chaque expérimentation. Comme on peut le constater dans ce tableau, les conditions hygrothermiques de la salle où se déroulent les expérimentations ne sont pas constantes pour une même expérimentation. Ces conditions varient également d'une expérimentation à l'autre. Il faut noter que l'humidité relative subit plus de fluctuations que la température. Les conditions hygrothermiques subissent plus de variabilité lors de la troisième expérimentation. Toutes ces observations annoncent qu'il sera très difficile de comparer les résultats expérimentaux issus de ces trois expérimentations.

Désignations	HR _{moy} (%)	Ecart-type _{HR} (%)	Temp _{moy} (°C)	Ecart-type _{Temp} (°C)
Expérimentation 1	48,33	2,29	21,85	0,32
Expérimentation 2	36,74	3,07	18,37	0,48
Expérimentation 3	34,81	3,38	22,01	1,21

TABLE 5.4: conditions hygrothermiques ambiantes

2.2 Cartes de déformation radiale en fluage/recouvrance sous séchage

2.2.1 Expérimentation 1

Dans ce paragraphe, les cartes de déformation radiale obtenues lors de la première expérimentation sont présentées. Au total, seize cycles de fluage/recouvrance sont effectués sur l'éprouvette testée. La prise d'images n'a été effectuée que pendant les phases de fluage. Sur la figures 5.7 on montre des cartes de déformation radiale lors de la phase de fluage du premier cycle. La figure 5.8 présente les cartes de déformation radiale lors de la phase de fluage du dernier cycle. Comme on peut le remarquer sur les cartes fournies sur ces deux figures, le niveau de déformation négative dans *EW* s'accroît au fur et à mesure que la sollicitation mécanique dure. Ce constat est tout à fait en accord avec les résultats escomptés lors d'essais de fluage en compression. Cependant, on note dès le début de chaque cycle la présence de déformations positives notamment dans *LW*, ce qui est assez contre l'intuition. En effet, après immersion, on a constaté à l'œil nu la formation "d'accordéon" (petites bosses principalement dans *LW*), sous compression les zones en saillie entrent en traction. Ceci pourrait expliquer la présence de ces déformations positives durant toute l'expérimentation. Il faut noter qu'en moyenne la déformation reste négative, ce qui est assez logique. Lorsqu'on compare les niveaux de déformation lors du fluage aux premier et dernier cycles pour des chargement identiques, il en ressort que l'éprouvette présente une réponse en termes de déformation négative plus prononcée lors du dernier cycle. Ceci est tout à fait normal car les cartes de déformation sont déterminées par rapport à une image prise juste avant de débiter le premier cycle. En effet, on retrouve dans ces cartes de déformation toute l'histoire hydromécanique de l'éprouvette à compter du premier cycle. Conformément à la section 3 du chapitre 1, cette histoire inclut les déformations liées au retrait, les déformations élastiques, viscoélastiques et mécanosorptives. Durant la phase de fluage du premier cycle, la teneur en eau totale varie de 32,62 % à 29,78 %, soit une perte de masse de 2,82 %. Concernant la phase de fluage du dernier cycle, la teneur en eau d'entrée est de 7,17 % et sa valeur finale est de 6,95 %, soit une perte de masse très faible de 0,22 %. Entre le début du premier cycle et celui du dernier cycle l'éprouvette a subi une perte de masse de 25,45 %.

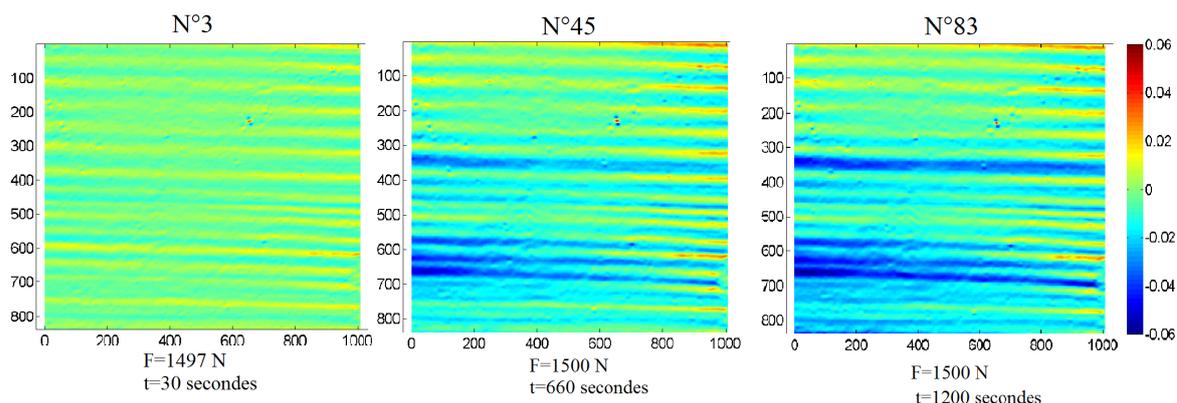


FIGURE 5.7: cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 (Ep1)

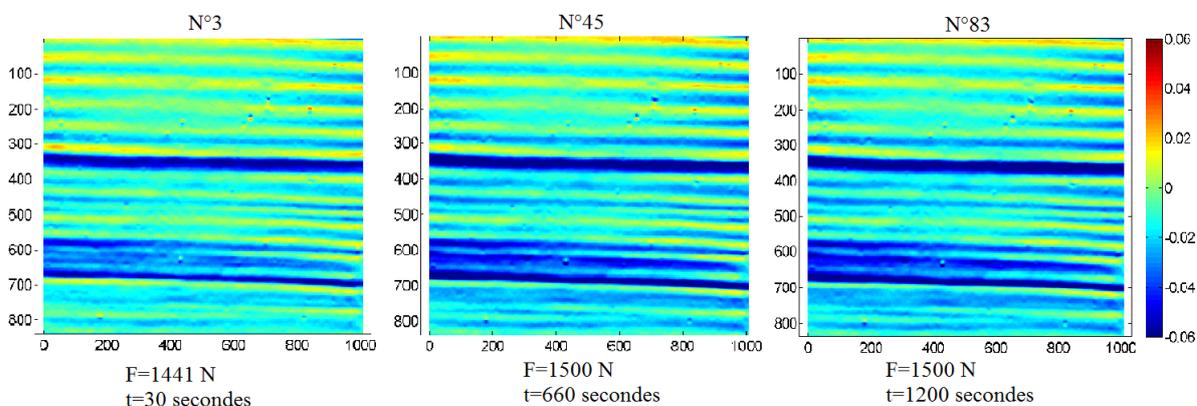


FIGURE 5.8: cartes de déformation radiale, fluage dernier cycle (Ep1)

2.2.2 Expérimentation 2

Dans ce paragraphe les cartes de déformation radiale obtenues lors de la deuxième expérimentation sont présentées. Huit cycles de fluage/recouvrance sont effectués sur l'éprouvette testée. Comme dans l'expérimentation 1, la prise d'images n'a été effectuée que pendant les phases de fluage. Le cumul de la durée de toutes les phases de fluage est le même pour les expérimentations 1 et 2. La seule différence réside dans la durée de la phase de fluage (40 minutes au lieu de 20 pour l'expérimentation 2) et du nombre de cycles (8 au lieu de 16 pour l'expérimentation 2). Ces différences sont liées aux conditions expérimentales et à la volonté de trouver une durée de fluage jugée convenable pour observer les phénomènes souhaités (viscoélas-

ticité, mécanosorption). La durée de recouvrance lors de ces expérimentations (1 et 2) pour chaque cycle étant la même, si les deux éprouvettes testées étaient matériellement identiques, le niveau de déformation non recouverte serait plus prononcé pour l'expérimentation 2. La figure 5.9 montre des cartes de déformation radiale lors de la phase de fluage du premier cycle. La figure 5.10 présente quelques cartes de déformation radiale lors de la phase de fluage du dernier cycle. Les cartes de déformation sur la figure 5.9 montrent que la réponse de l'éprouvette testée lors de l'expérimentation 2 est moins prononcée lors du premier cycle comparée à celle de l'éprouvette testée lors de l'expérimentation 1. De plus, lors de cette deuxième expérimentation, on constate également sur la figure 5.9 que le niveau de déformation positive est moindre par rapport à celui observé lors du premier cycle de la première expérimentation (5.7). Il faut noter que même si les éprouvettes testées lors des expérimentations 1 et 2 proviennent du même arbre et de la même planche, elles sont découpées à environ 35 cm de distance l'une par rapport à l'autre. Ceci pourrait expliquer les différences observées sur leur réponse en termes de déformation. En effet, les variabilités spatiales des propriétés liées à la zone de prélèvement sur le tronc peuvent être soupçonnées comme étant source de ces différences notables. Cependant, lors de la phase de fluage du dernier cycle de l'expérimentation 2 (voir figure 5.10), l'état de déformation de l'éprouvette est similaire à celui obtenu lors de la phase de fluage du dernier cycle de l'expérimentation 1 (voir figure 5.8). En effet, la figure 5.10 montre un niveau de déformation négative très prononcé dans EW comme dans le cas de la première expérimentation. L'augmentation du niveau de déformation est due à l'histoire de chargement hydromécanique. En effet, les cartes de déformation sont obtenues par rapport à une image de référence prise juste avant le débuter le premier cycle. Comme on l'a déjà mentionné dans la section 3 du chapitre 1, cette déformation inclut : les déformations liées au retrait, les déformations élastiques, viscoélastiques et mécanosorptives. On note également que le niveau de déformation positive apparaît de manière très notable contrairement au premier cycle, certainement à cause d'effets géométriques amplifiés par l'histoire hydromécanique. Durant la phase de fluage du premier cycle la teneur en eau totale varie de 36,38 % à 34,82 %, soit une perte de masse de 1,56 %, ce qui est plus faible que lors de la phase de fluage du premier cycle de l'expérimentation 1. A la phase de fluage du dernier cycle, la teneur en eau d'entrée est de 17,69 % et sa valeur finale est de 16,96 %, soit une perte de masse très faible de 0,73%. Entre le début du premier cycle et celui du dernier cycle l'éprouvette a subi une perte de masse

de 18,96 %. Les réponses hétérogènes obtenues lors de ces deux expérimentations

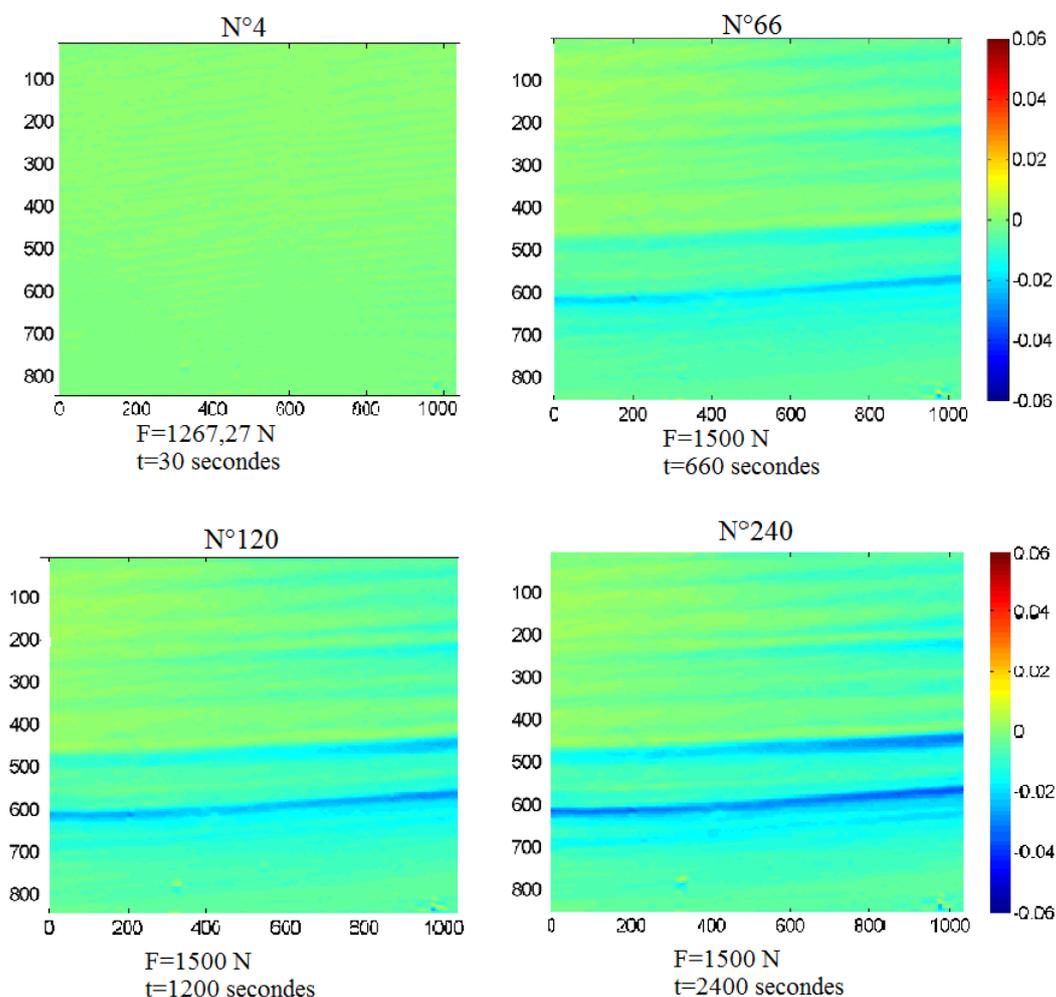


FIGURE 5.9: cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 (Ep2)

confirment la capacité des techniques de mesures de champs, comme déjà présenté au chapitre 2, à révéler des singularités liées aux propriétés locales du matériau (la méthode de la grille ici). Comme on a pu le constater, les résultats obtenus en termes de déformation montre la présence d'une alternance de valeurs positives et négatives de la déformation. Ceci rend difficile voire impossible le seuillage pour extraire les déformations négatives à l'échelle du cerne surtout dans *LW*. Afin de mieux appréhender l'origine des déformations positives, dans la troisième expérimentation qui suit, le suivi de l'état de déformation de l'éprouvette testée après immersion et avant chargement mécanique, est effectué. Les images prises lors de cette phase de séchage

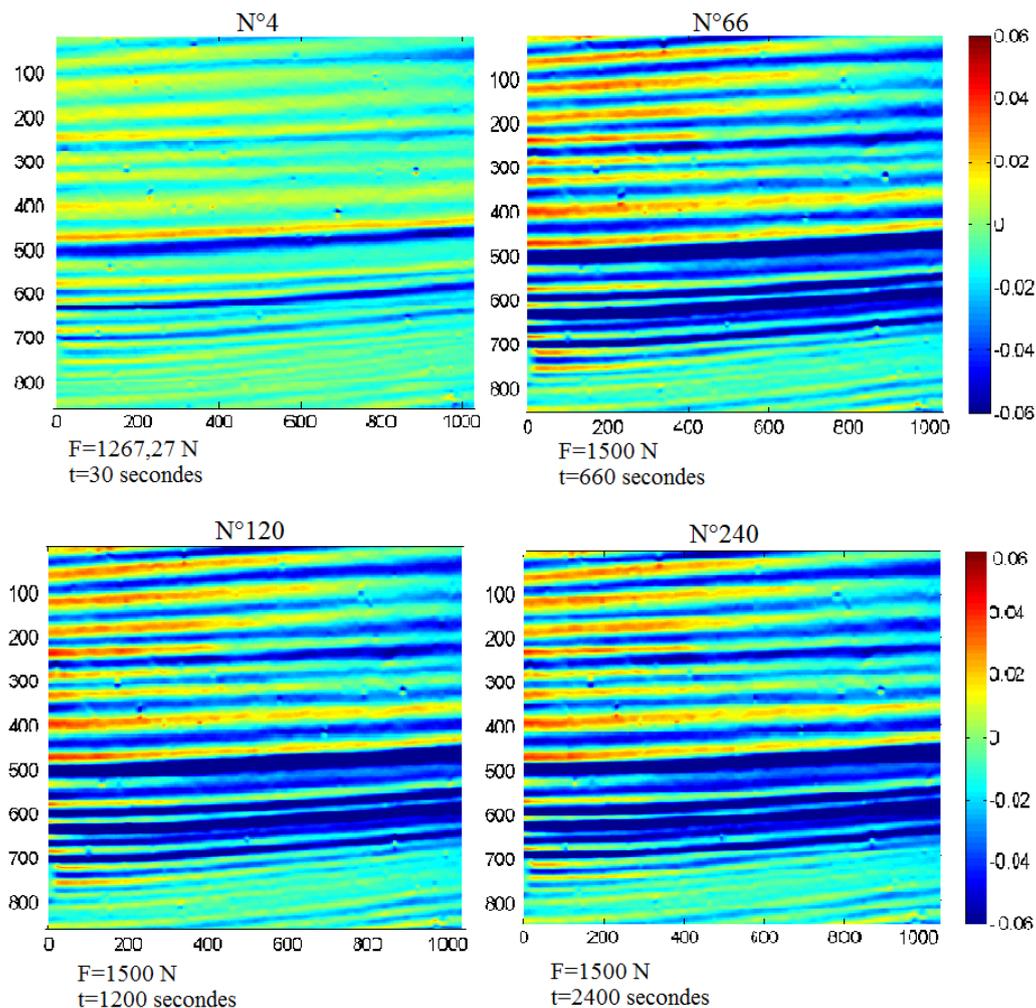


FIGURE 5.10: cartes de déformation radiale, fluage dernier cycle (Ep2)

sans contrainte mécanique sont dépouillées par rapport une image de référence prise avant immersion.

2.2.3 Expérimentation 3

Déroulement : On présente sur la figure 5.11 une schématisation du déroulement de l'expérimentation 3 ainsi que les images de références pouvant être utilisées pour le dépouillement des images afin d'obtenir des cartes de déformation avec ou sans prise en compte de l'histoire hydromécanique. Lorsque le dépouillement est effectué par rapport à l'image de référence *Im ref 0*, alors il y a prise en compte de l'histoire hydromécanique antérieure de l'éprouvette. Si le dépouillement est fait en utilisant

comme image de référence $Im\ ref\ k$; $k = 1, 2, 3, 4$, pour le cycle k considéré, alors il n'y a pas prise en compte de cette histoire. Dans un premier temps le matériau est immergé, puis il subit un séchage naturel pour baisser un peu le niveau de la teneur en eau. Cette dernière phase est suivie des cycles répétés de fluage/recouvrance.

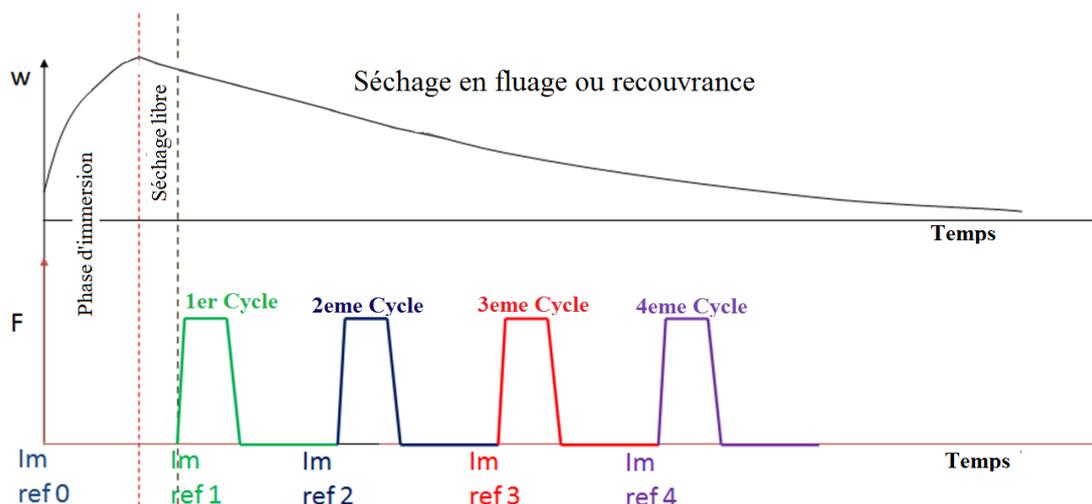


FIGURE 5.11: déroulement (Ep3)

Séchage libre sans contrainte : la présence des déformations positives est tout à fait normale puisque l'éprouvette a été immergée. L'augmentation du niveau de déformation positive pendant que l'éprouvette est soumise au séchage naturel libre peut être expliquée par le fait que la face étudiée n'est pas directement exposée au milieu ambiant. En effet, les 5 autres faces de l'éprouvette étant en contact direct avec l'air, celles-ci vont sécher plus vite, ce qui induit un accroissement de la déformation positive sur la face en contact avec la grille. Même si la durée du séchage naturel est relativement longue (10 heures), la cinétique de séchage ne dépend que des conditions hygrothermiques environnantes et des conditions d'échanges surfaciques (convection). Donc à T et HR faibles et relativement constantes, le retrait ne progresse pas trop vite. Le niveau de déformation négative ($1E-04$) témoigne de la faible cinétique de séchage qui affecte la face étudiée. Il faut noter que le niveau de déformation hydrique est plus prononcée dans LW conformément aux résultats expérimentaux déjà exposés au chapitre 3.

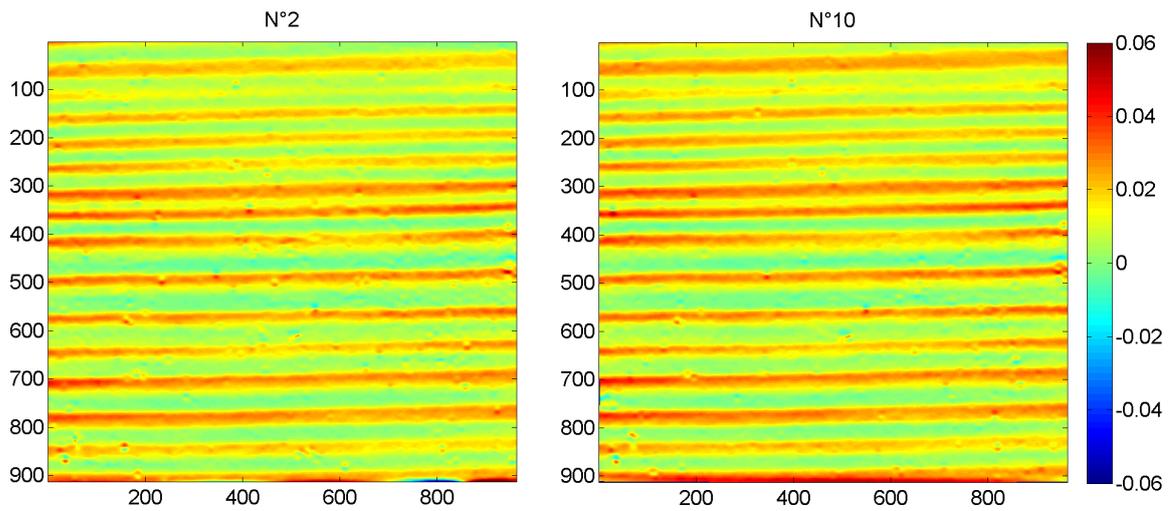


FIGURE 5.12: cartes de déformation radiale, séchage libre (Ep3)

Pertes de masse : le tableau 5.5 présente les valeurs de teneur en eau au début et à la fin de chaque phase de fluage ou de recouvrance. w_1 et w_2 sont respectivement les teneurs en eau au début et à la fin de la phase de fluage ou de recouvrance. La figure 5.14-a présente l'évolution non linéaire de la teneur en eau lors de l'expérimentation. Les points de cette courbe sont issus de mesures de pertes de masses faites depuis l'immersion avant chargement jusqu'au dernier cycle. Donc il y a bien des points où le matériau est sous retrait libre, des points où le matériau vient de subir une compression (fluage) et des points où le matériau vient de subir une recouvrance. La figure 5.14-b permet de voir l'influence du chargement en compression sur le taux de pertes de masses. On note avec flagrance que la présence d'un chargement en compression lors d'un séchage accélère la perte de masse. Ce résultat est tout à fait en accord avec les résultats obtenus par Merakeb (2006) lors de séchage sous contrainte de compression.

Fluage/recouvrance sous séchage : quelques cartes de déformation radiale sont présentées sur la figure 5.15. Ces cartes de déformation sont issues d'images prises sous chargement mécanique et dépouillées par rapport à l'image de référence prise avant immersion (*Im ref* 0, voir figure 5.11). Ces cartes prennent donc en compte

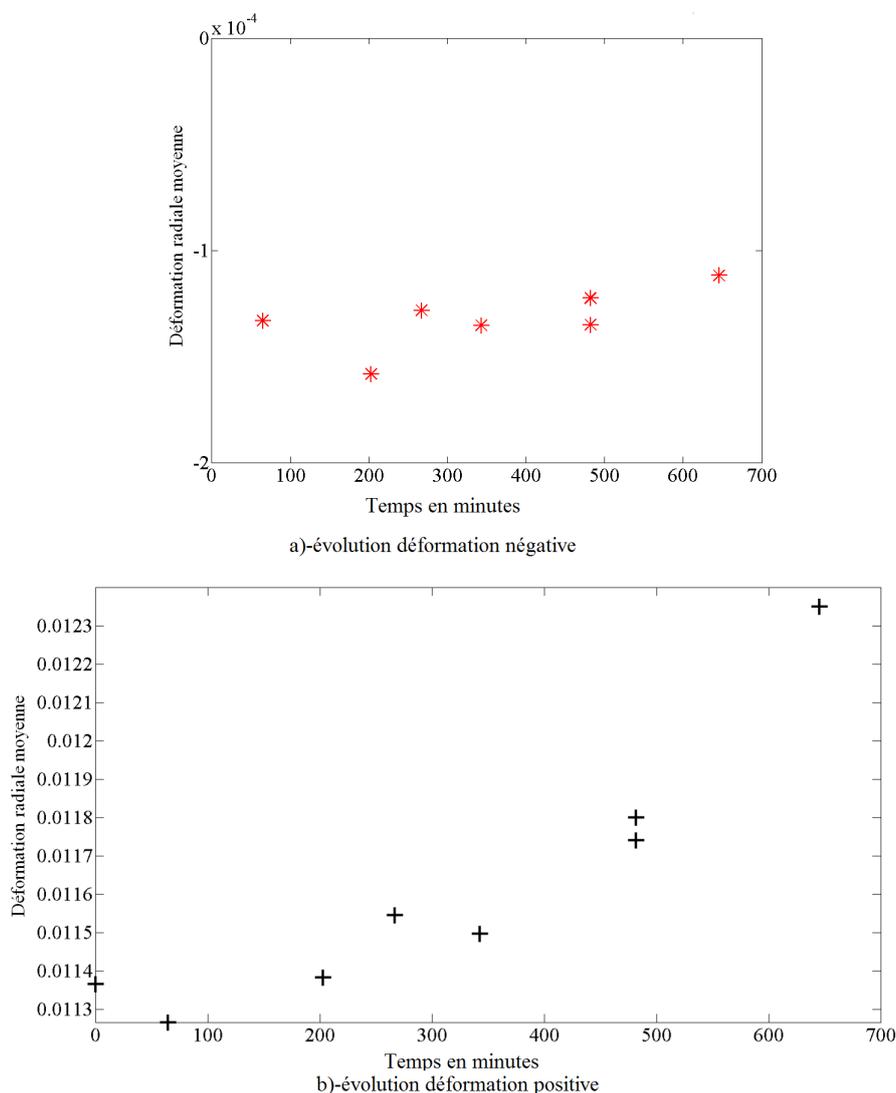


FIGURE 5.13: déformation radiale moyenne, séchage libre (Ep3)

l’histoire hydromécanique de l’éprouvette testée. Pendant cette phase de fluage, la teneur en eau varie de 32,69 % de 30,07 %. Comme on peut le constater, le niveau de déformation négative est de plus en plus prononcé au fur et à mesure que le séchage et le chargement mécanique durent dans le temps. Néanmoins, les déformations positives persistent encore même si elles diminuent ou s’annulent dans certaines zones de la face de l’éprouvette étudiée. En effet, les déformations positives qui persistent le sont dans *LW* principalement. *EW* subit un niveau de déformation négative plus

Désignations	Cycle 1 (fluage)	Cycle 2 (fluage)	Cycle 3 (fluage)	Cycle 4 (fluage)
W ₁ (%)	32,69	25,69	19,82	15,15
W ₂ (%)	30,07	23,68	17,78	14,12

(a)

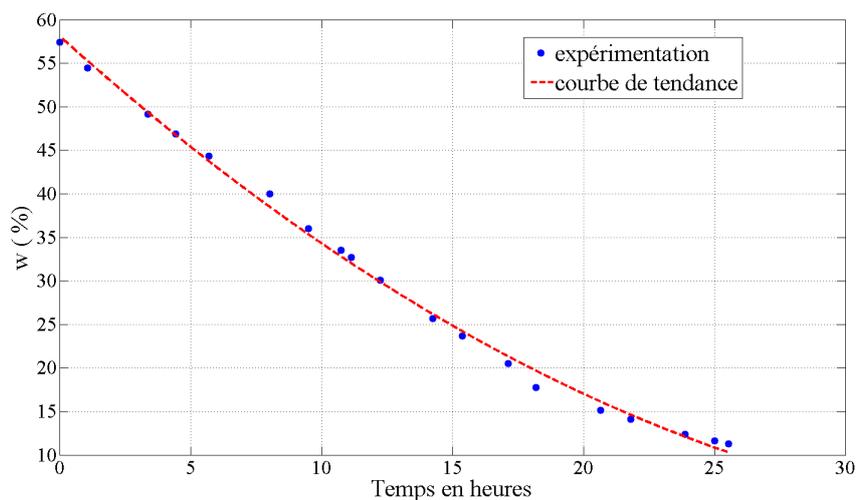
Désignations	Cycle 1 (recouvrance)	Cycle 2 (recouvrance)	Cycle 3 (recouvrance)	Cycle 4 (recouvrance)
W ₁ (%)	30,07	23,69	17,82	14,12
W ₂ (%)	25,69	19,82	15,15	12,4

(b)

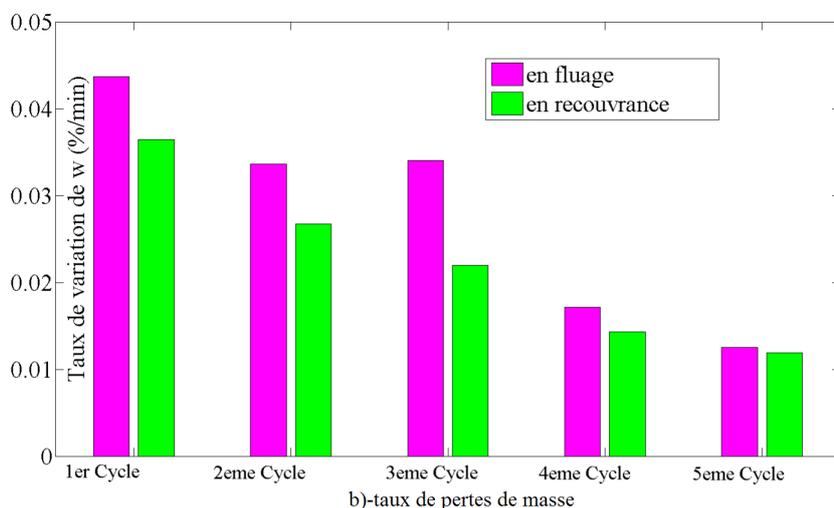
TABLE 5.5: pertes de masse durant l'expérimentation 3 (Ep3), a)-fluage, b)-recouvrance

élevé à raison de ses caractéristiques mécaniques plus faibles. Les singularités (zone en haut à droite plus déformée) constatées sur la réponse de l'éprouvette en termes de déformation, peuvent avoir diverses sources : l'hétérogénéité matérielle ou les conditions aux limites d'expérimentation.

La figure 5.16 montre des cartes de déformation obtenues à partir d'images prises lors de la phase de recouvrance du premier cycle. Ces cartes de déformation sont issues d'images prises sous séchage et sans chargement mécanique. Ces images sont dépouillées par rapport à l'image de référence prise avant immersion (*Im ref 0*, voir figure 5.11). Elles tiennent donc compte de l'histoire hydromécanique de l'éprouvette testée. Pendant cette phase de recouvrance la teneur en eau varie de 30,07 % à 25,69%. La différence est notable entre le niveau de déformation de la dernière carte de déformation de la phase de fluage du premier cycle (carte N° 240 de la figure 5.15) et la première carte de déformation correspondant à la première image prise lors de la phase de recouvrance (carte N° 2 de la figure 5.16). Cette différence peut être due entre autres au retour élastique du matériau. En effet, entre la fin de la phase fluage et le début de suivi de la recouvrance pour chaque cycle, l'éprouvette est enlevée pour être pesée. Pendant cet intervalle de temps, il n'y a aucune prise d'image effectuée. On perd donc une petite partie de l'information lors de la recouvrance. L'instant auquel on commence le suivi de la recouvrance et le moment où elle a réellement débuté sont différents. Par ailleurs, on peut noter sur la figure 5.16 que le niveau de déformation négative s'atténue. Au même moment le niveau de déformation positive s'accroît. L'état de déformation de la face étudiée à la fin de la phase de recouvrance du premier cycle (carte N° 25 de la figure 5.16) est similaire



a)-évolution de la teneur en eau totale



b)-taux de pertes de masse

FIGURE 5.14: pertes de masse durant l’expérimentation 3 (Ep3), a)-teneur en eau totale, b)-taux de pertes de masse

à celui de la carte N° 3 de la figure 5.15 (début du chargement mécanique). On peut donc conclure que pendant ce premier cycle de fluage/recouvrance, la déformation est presque totalement recouverte.

La figure 5.17 présente les mêmes cartes de déformation que celles montrées sur la figure 5.15, mais sans prise en compte de l’histoire hydromécanique en terme de déformation. En effet, les images sont dépouillées cette fois par rapport à une image (*Im ref 1*) prise juste avant de débuter la phase de fluage du cycle 1 (voir figure

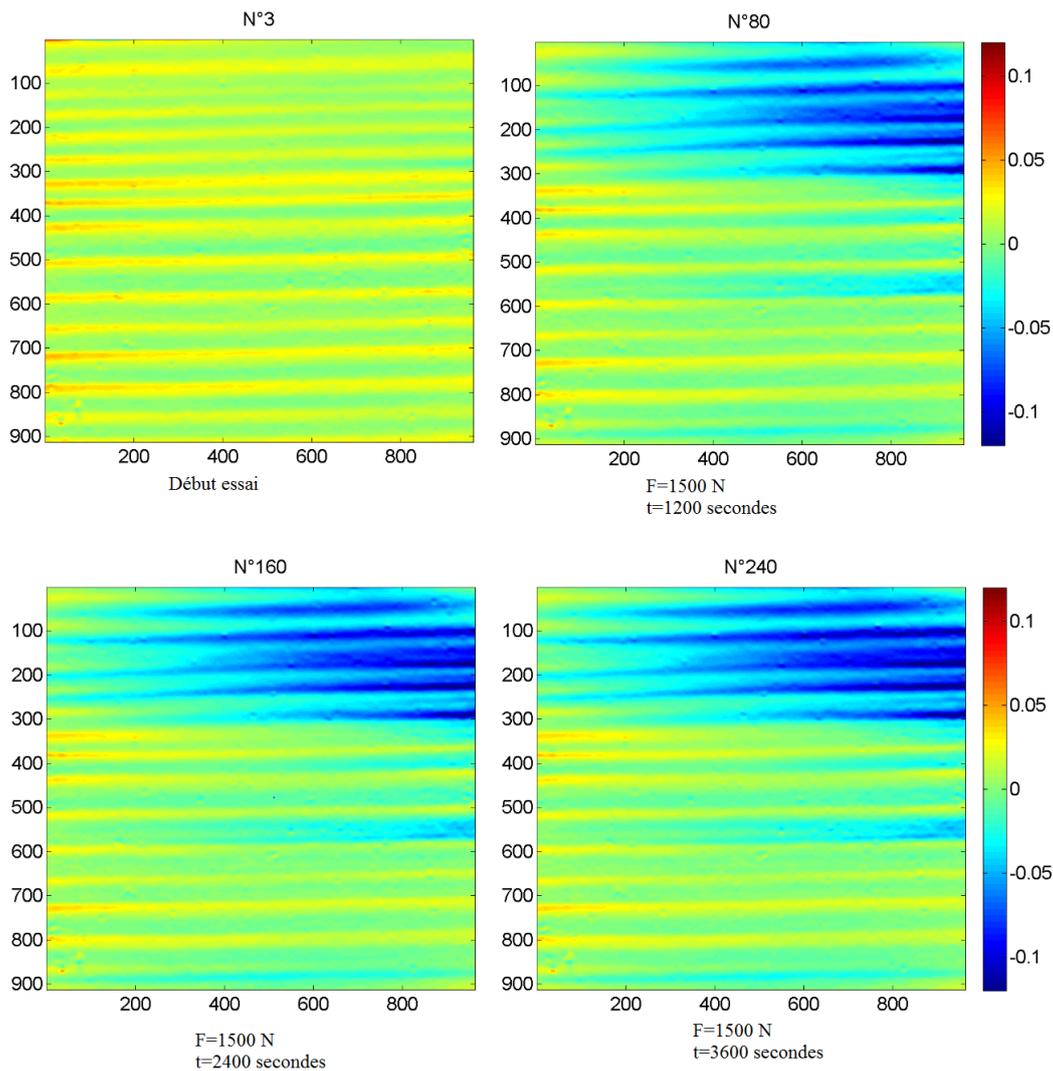


FIGURE 5.15: cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 (Ep3)

5.11). Lorsqu'on compare les cartes de déformation sur ces deux figures, le premier constat est que pour la carte N° 3 de la figure 5.17, la déformation est quasiment nulle partout. Cependant, on constate sur les autres cartes de déformation de cette même figure l'apparition de déformations positives dont le niveau est très faible par rapport à celui avec prise en compte de l'histoire hydromécanique. Ces déformations positives qui apparaissent seraient dues à la présence d'une signature géométrique façonnée par l'histoire hydromécanique de l'éprouvette. Ces déformations positives sont donc uniquement dues au fluage lors du cycle 1. D'autre part, les cartes N° 80,

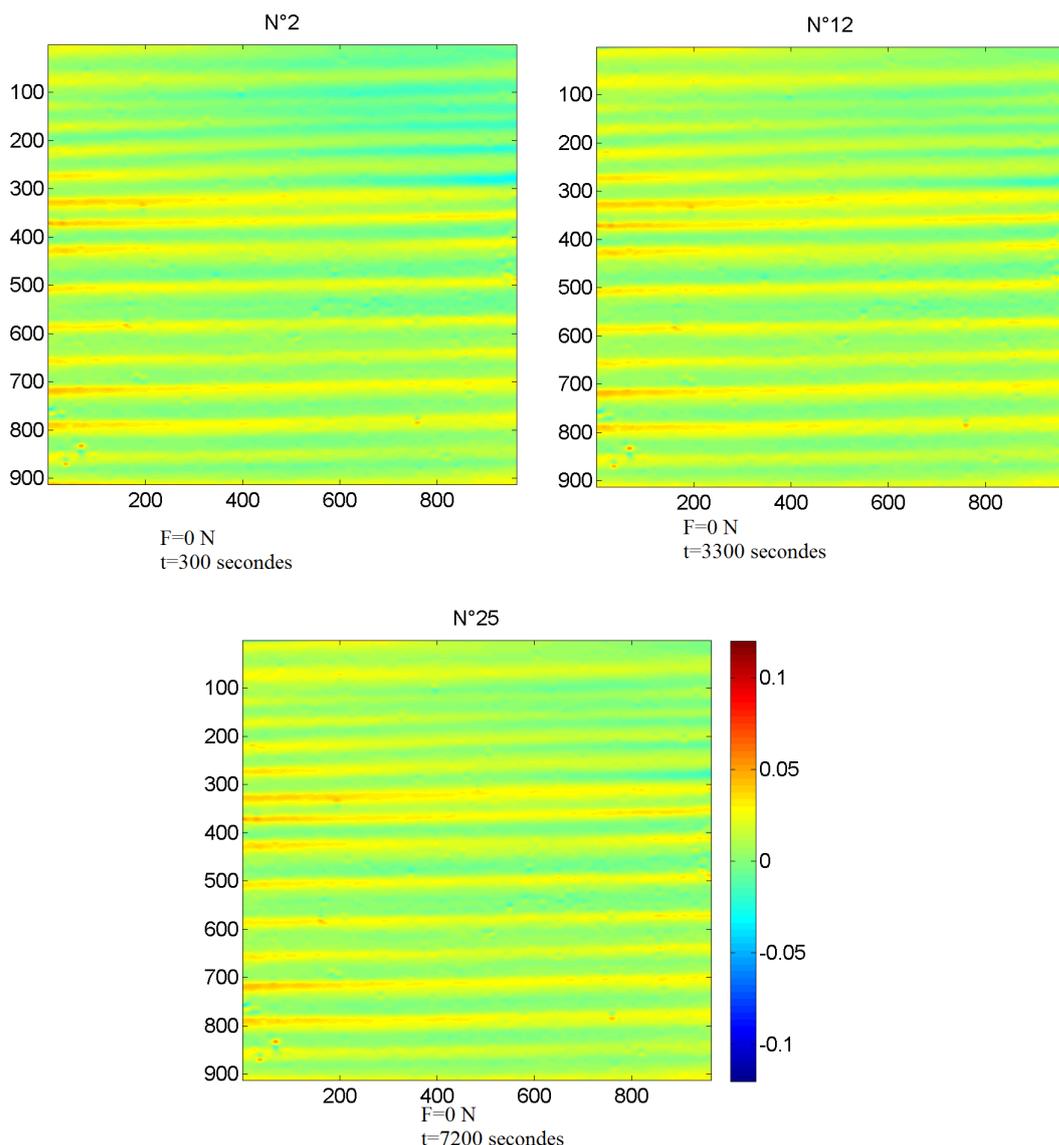


FIGURE 5.16: cartes de déformation radiale, recouvrance cycle 1 (Ep3)

160 et 240 (figure 5.17) exhibent un niveau de déformation négative plus prononcé que dans le cas qui intègre l’histoire hydromécanique (figure 5.15, cartes N° 80, 160 et 240). Ceci voudrait dire que la prise en compte de l’histoire hydromécanique baisse l’amplitude de la déformation négative.

La figure 5.18 montre des cartes de déformations lors de la phase de fluage du deuxième cycle avec prise en compte de l’histoire hydromécanique (*Im ref 0*, voir figure 5.11). Pendant cette phase de fluage, la teneur en eau varie de 25,69 % à 23,68

%. On retrouve un profil de déformations similaire à celui obtenu lors de la phase de fluage du cycle 1. Le constat reste le même que lors de la phase de fluage du premier cycle. En effet, il y a augmentation du niveau de déformation négative (EW , LW) et persistance des déformations positives dans LW principalement pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment dans le cycle 1. Il faut noter que le niveau de déformation négative lors de cette phase de fluage du cycle 2 est légèrement plus prononcé que celui lors de celle du premier cycle. Cette augmentation peut être reliée aux variations de teneur en eau intrinsèque qui peuvent impacter les caractéristiques mécaniques. En effet, le niveau de chargement et la durée de celui-ci sont les mêmes que dans le cycle 1. Tout accroissement du niveau de déformation peut donc être relié aux variations de teneur en eau ainsi qu'à leur couplage avec le chargement mécanique.

Sur la figure 5.19 on présente les cartes de déformation lors de la phase de fluage de cycle 2 sans prise en compte de l'histoire hydromécanique antérieure de l'éprouvette en terme de déformation. Ces cartes sont obtenues en dépouillant des images prises lors de cette phase de fluage par rapport à l'image de référence $Im\ ref\ 2$ (voir figure 5.11). Comme dans le cas du cycle 1, on remarque qu'il y a absence de déformation positive au début du cycle 2 (carte N° 2 de la figure 5.19). On observe également sur les cartes N° 80, 160 et 240 de la figure 5.19 qu'il y a un accroissement du niveau de déformation négative par rapport aux cartes N° 80, 160 et 240 de la figure 5.18. On peut donc en déduire, comme dans le cas de la phase de fluage du cycle 1, que la prise en compte de l'histoire hydromécanique en termes de déformation conduit à une baisse du niveau de déformation négative. Cependant, il y a aussi apparition de faibles déformations positives, comme lors du fluage du premier cycle. Ces déformations sont issues également d'une signature géométrique due à l'histoire hydromécanique de l'éprouvette testée.

On s'intéresse maintenant à la phase de recouvrance du cycle 2 (figure 5.19). Les cartes de déformations présentées sur cette figure proviennent d'images prises lors du suivi de la recouvrance. Le dépouillement est effectué par rapport à l'image de référence $Im\ ref\ 0$ (voir figure 5.11). Les cartes de déformation tiennent donc compte de l'histoire hydromécanique. On observe une différence énorme entre la carte N° 2 de la figure 5.19) et la dernière carte de la phase de fluage du cycle 2 (N° 240 de la figure 5.18) en terme de niveau de déformation. Ceci est dû à la même raison spécifiée lors de la phase de recouvrance du cycle 1, c'est à dire qu'il y a une part de la déformation recouvrée avant de commencer le suivi par prise d'images. Néanmoins,

contrairement à la fin de la recouvrance du cycle 1, la dernière carte (N° 25, figure 5.19) indique que la déformation n'est pas entièrement recouverte. Une explication possible est que pour un niveau de déformation plus notable lors de la phase de fluage du cycle 2, on a la même durée de recouvrance que dans le cycle 1. On peut donc en déduire qu'en plus des déformations liées au retrait, aux comportements élastique, viscoélastique et mécanosorptif, les déformations dans la phase de fluage à partir du cycle 3, incluent les déformations non recouvertes.

De passage, il faut noter que le comportement exhibé par l'éprouvette testée lors de l'expérimentation 3 est différent de ceux des deux expérimentations précédentes (1 et 2). Néanmoins, on observe les mêmes phénomènes du point de vue alternance de déformations positives et négatives à l'échelle du cerne. On avait déjà mentionné qu'il était difficile de faire un seuillage sur les cartes de déformation obtenues lors des expérimentations 1 et 2. on essaiera donc de procéder à un seuillage que pour les cartes issues de l'expérimentation 3 afin de mieux investiguer le comportement en fluage/recouvrance sous séchage à l'échelle du cerne. La sous-section 2.3 est dédiée à cette étude.

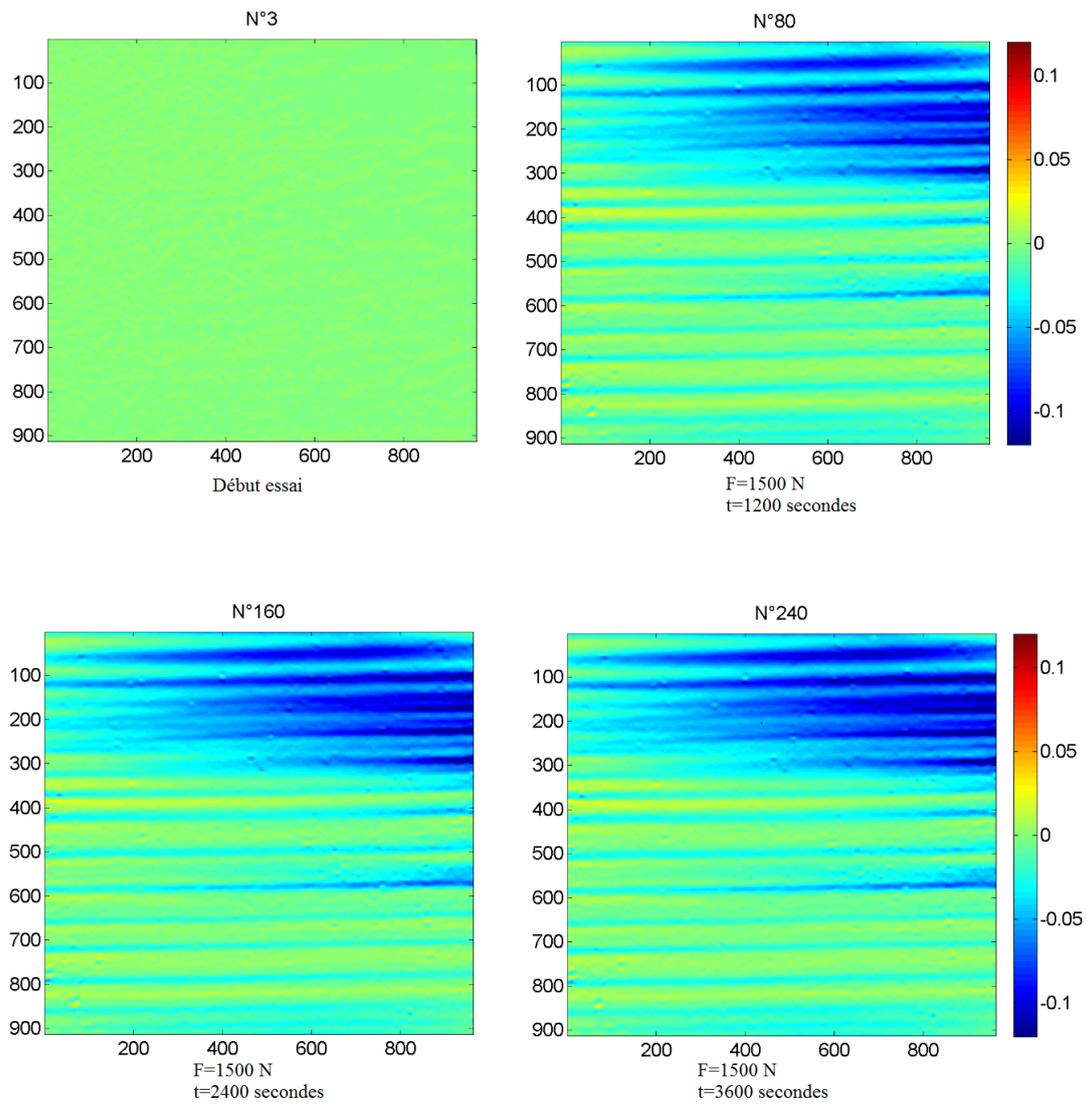


FIGURE 5.17: cartes de déformation radiale, fluage cycle 1 sans histoire (E_{p3})

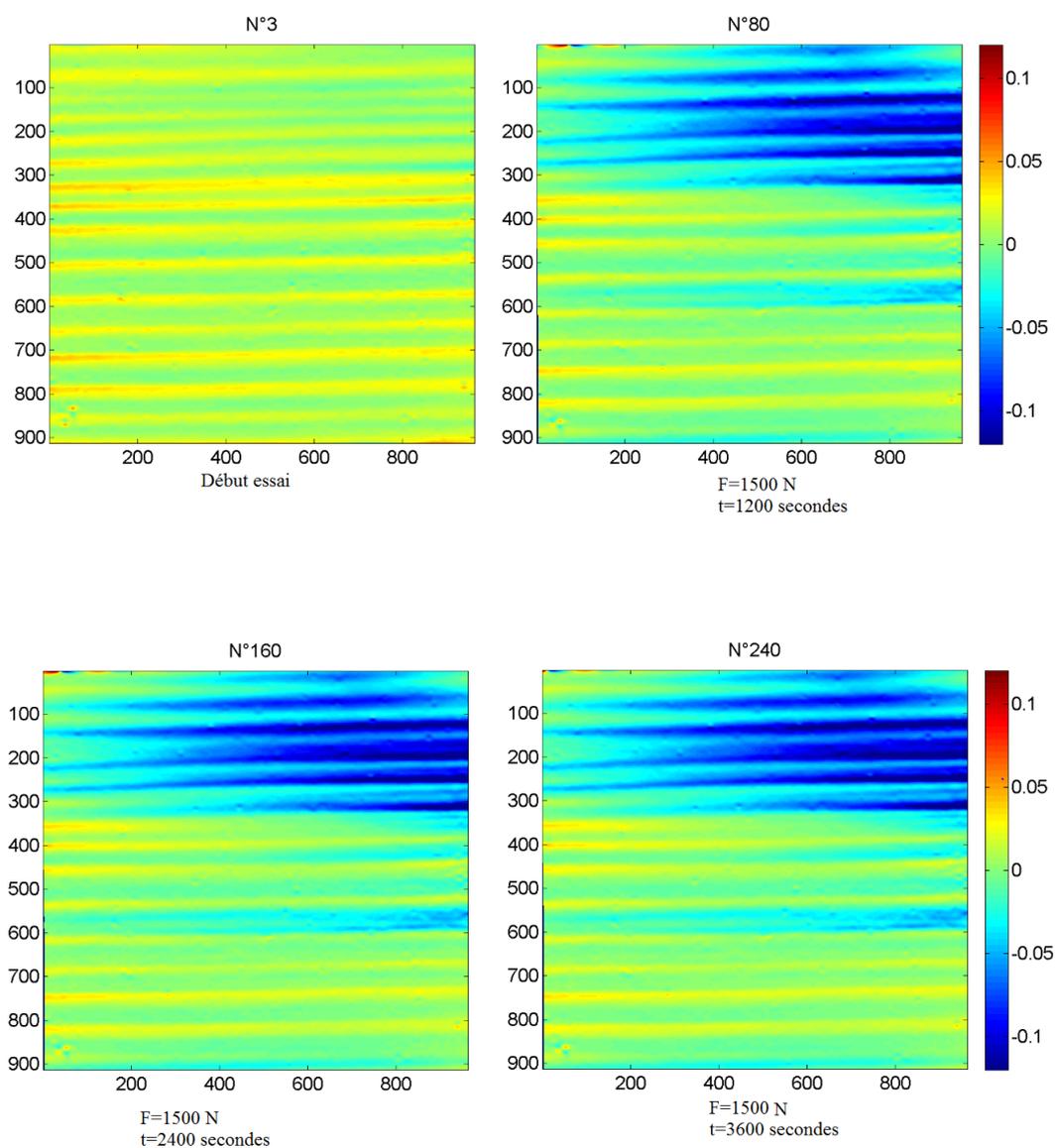


FIGURE 5.18: cartes de déformation radiale, fluage cycle 2 (Ep3)

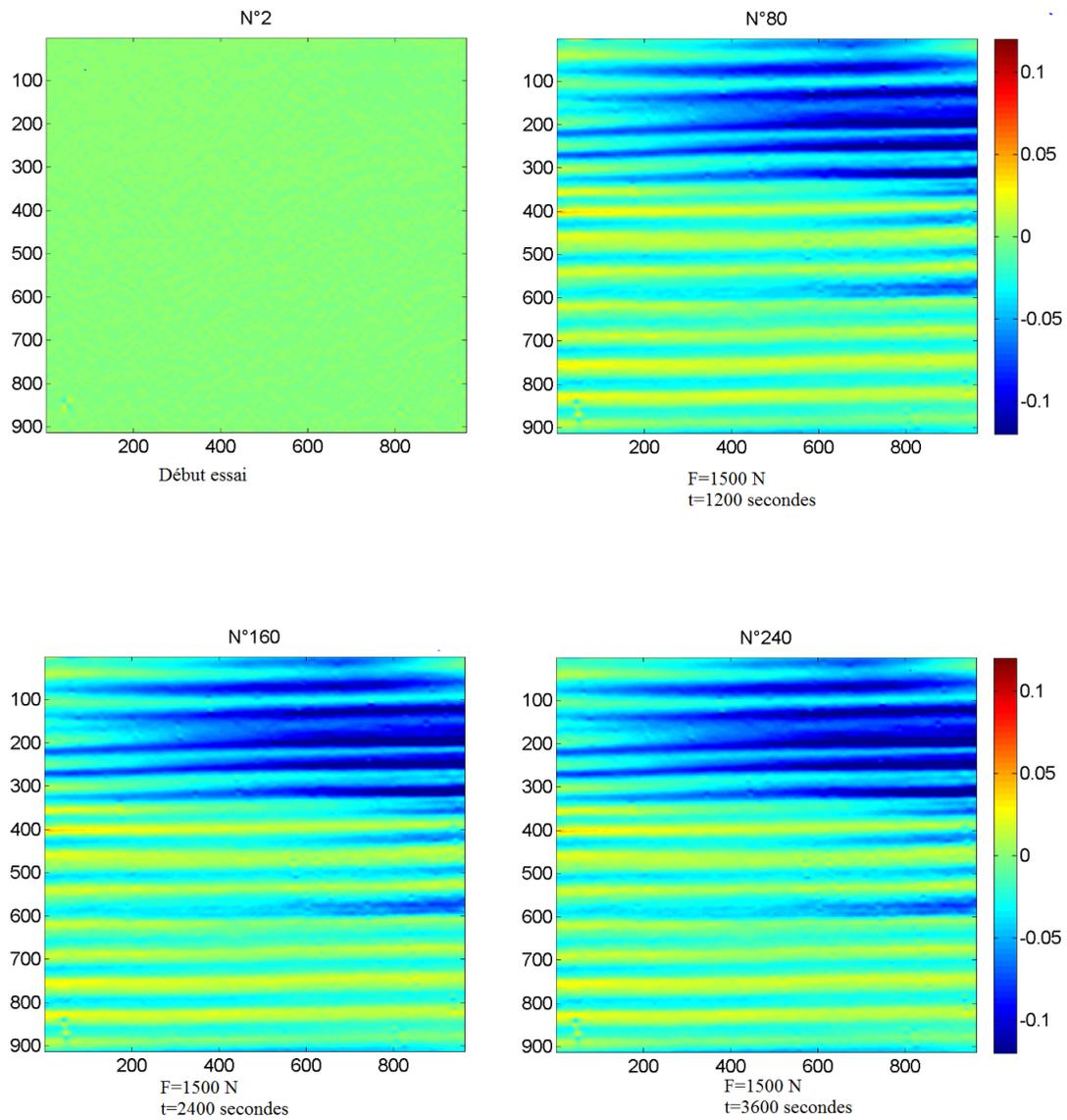


FIGURE 5.19: cartes de déformation radiale, fluage cycle 2 sans histoire (E_p3)

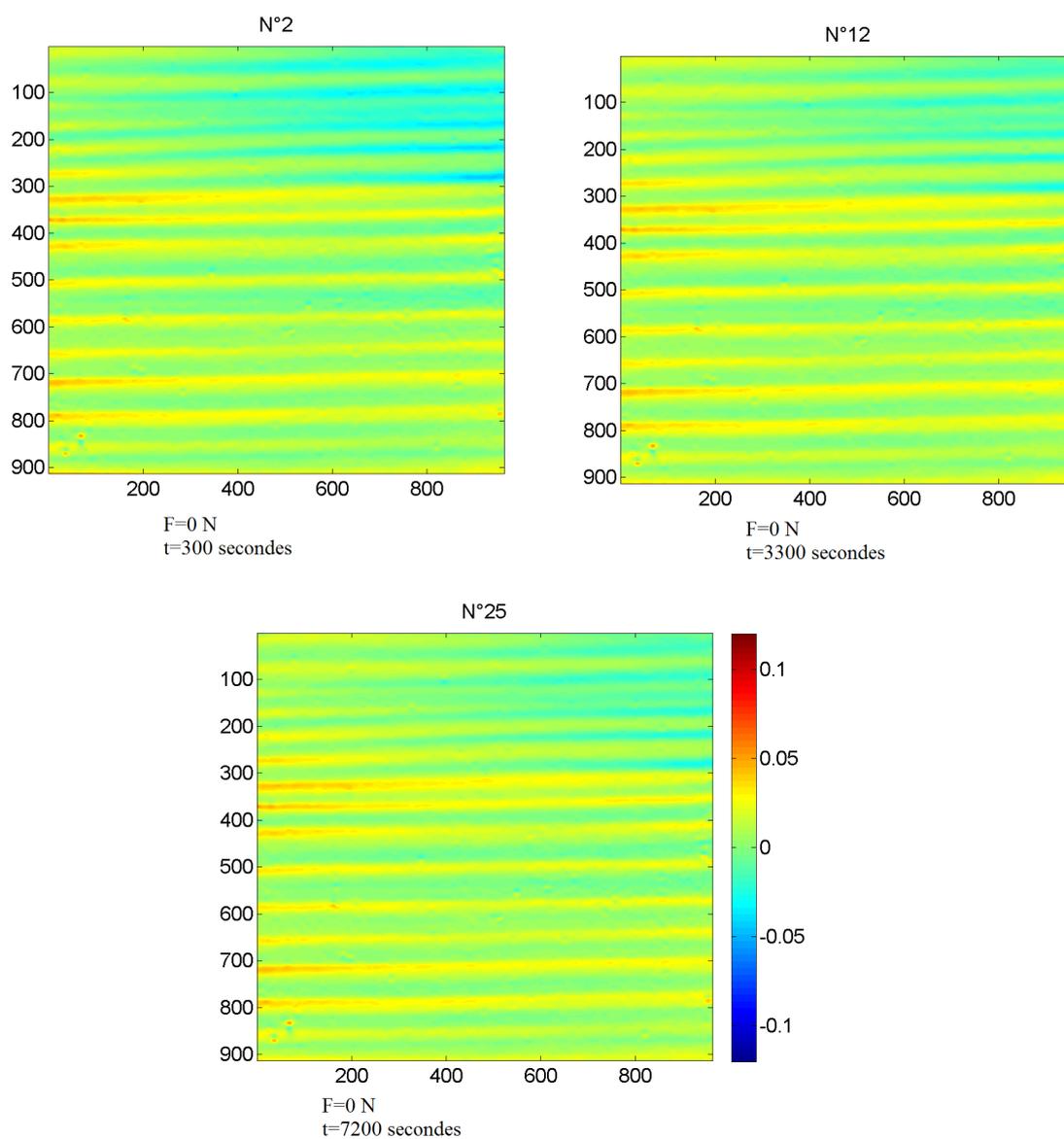


FIGURE 5.20: cartes de déformation radiale, recouvrance cycle 2 (Ep3)

2.3 Investigation de la déformation à l'échelle du cerne

2.3.1 Zones d'intérêt et seuillage

Afin d'extraire et de suivre l'évolution des déformations dans EW et LW , on procède par seuillage. Le principe est le même que celui déjà utilisé dans le chapitre 3 (section 6). On est donc confronté aux mêmes difficultés quant à la construction des masques à partir du scan de la face étudiée de l'éprouvette. Pour obtenir les masques, on commence d'abord par définir la zone d'intérêt où on aura des déformations négatives significatives dans EW et dans LW en même temps. Le seuillage consiste alors à construire un masque défini sur cette zone d'intérêt à partir de la dernière carte de déformation en fluage. Pour obtenir les masques il faut fixer les valeurs minimales et maximales des déformations dans EW et dans LW . Un exemple de zone d'intérêt est donné sur la figure 5.21. Les équations 5.1 et 5.2 sont appliquées à cette zone afin de générer les masques pour EW et LW . Pour le cycle 1 on a : $\varepsilon_{EW_{min}} = -0,15$, $\varepsilon_{EW_{max}} = -0,08$, $\varepsilon_{LW_{min}} = -0,045$ et $\varepsilon_{LW_{max}} = 0$.

$$\varepsilon_{EW_{min}} < \varepsilon_{EW} < \varepsilon_{EW_{max}} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{LW_{min}} < \varepsilon_{LW} < \varepsilon_{LW_{max}} \quad (5.2)$$

Cette procédure est appliquée à chacun de cycles étudiés. Les masques obtenus sont ensuite utilisés pour calculer les déformations radiales moyennes dans les paragraphes 2.3.2 et 2.4.

2.3.2 Fluage et recouvrance sous séchage à l'échelle du cerne

La phase de fluage pour chaque cycle (voir figure 5.22) exhibe une déformation de EW supérieure à celle de LW conformément aux données de la littérature (voir chapitre 1, sous-section 1.3). En effet, une observation au microscope révèle que la taille des lumens dans EW est plus grande et avec une épaisseur plus faible des trachéides que dans LW . La phase de recouvrance (état déchargé) montre une augmentation du niveau de déformation non recouverte au fur et à mesure des cycles. Ceci peut être expliqué par le caractère viscoélastique du matériau combiné aux effets de l'humidité. On note également que la pente de la phase de fluage devient moins raide au fur et à mesure que les cycles sont répétés. Une des explications possibles de cette observation est l'approche de la fin du séchage donc de la diminution des

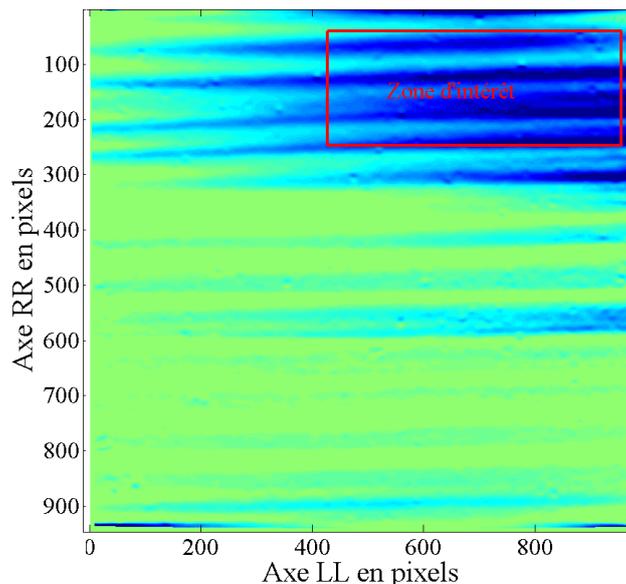


FIGURE 5.21: zone d'intérêt, cycle 1 (Ep3)

variations de la teneur en eau ainsi que de ses effets dus à la présence du chargement mécanique. Il faut noter aussi que le matériau a un comportement rigidifiant lors du séchage ce qui le rend moins déformable lorsque celui-ci devient plus prononcé.

2.4 Mise en évidence des effets de l'histoire hydromécanique à l'échelle du cerne

Sur la figure 5.23, l'évolution de la déformation radiale moyenne dans EW , est présentée pour chaque phase de fluage et pour chaque cycle, ceci sans prise en compte de l'histoire hydromécanique antérieure. Durant les trois premiers cycles, la déformation en fluage sans prise en compte de l'histoire est supérieure, mais on constate déjà une diminution de son écart par rapport à celle obtenue avec prise en compte de l'histoire au troisième cycle. Dans le quatrième cycle, la déformation en fluage sans prise en compte de l'histoire hydromécanique antérieure est devenue plus faible. La diminution de la déformation lorsque l'histoire n'est pas prise en compte, montre que EW se rigidifie. L'inversion des courbes à partir du quatrième cycle est une conséquence de l'augmentation de la rigidité de EW . Dans cette réponse où l'effet du chargement mécanique est prépondérant, l'amplitude diminue. La décroissance de la pente au fil des cycles en est aussi une conséquence.

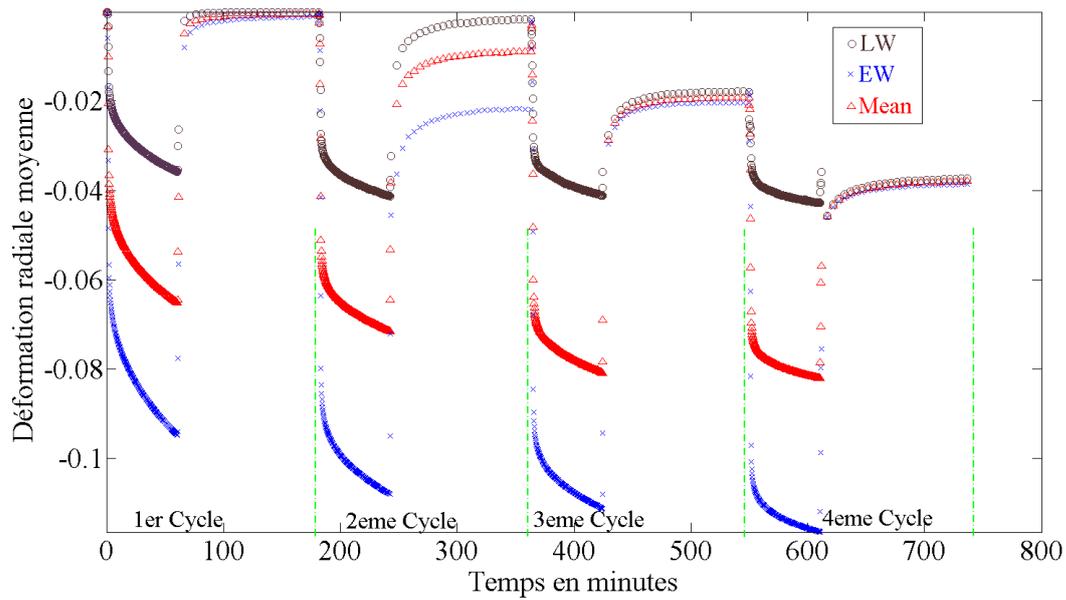


FIGURE 5.22: déformation radiale moyenne, fluage/recouvrance avec histoire (Ep3)

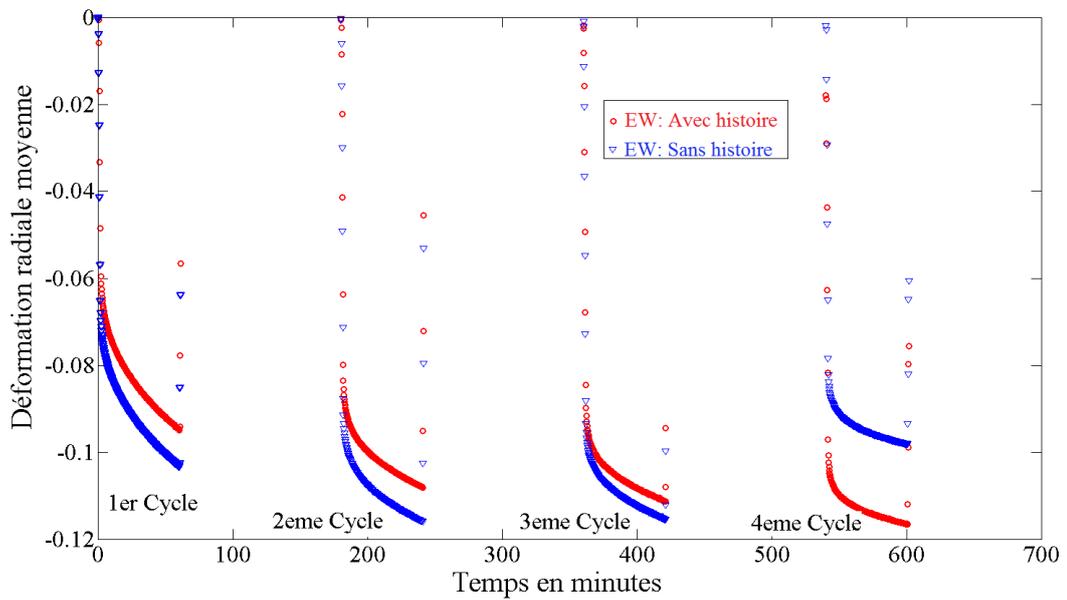


FIGURE 5.23: déformation radiale moyenne de EW, effet de l'histoire hydromécanique en fluage sous séchage (Ep3)

L'évolution de la déformation radiale moyenne dans LW , est présentée sur la figure 5.24 pour chaque phase de fluage et pour chaque cycle, avec et sans prise en compte de l'histoire hydromécanique antérieure. Comme pour EW , durant les trois premiers cycles, la déformation en fluage sans prise en compte de l'histoire est supérieure mais on constate déjà une diminution de son écart par rapport à celle obtenue avec prise en compte de l'histoire au troisième cycle. Lors du quatrième cycle, la déformation en fluage ne prenant pas en compte l'histoire hydromécanique antérieure est moins prononcée. La diminution de la déformation lorsque l'histoire n'est pas prise en compte, montre également que LW se rigidifie. Le phénomène d'inversion des courbes à partir du quatrième cycle apparaît aussi dans le cas de LW . Dans cette réponse de LW , l'effet du chargement mécanique est prépondérant et l'amplitude de la déformation diminue. La décroissance de la pente au fil des cycles est aussi une conséquence de cette perte de souplesse. L'investigation du compor-

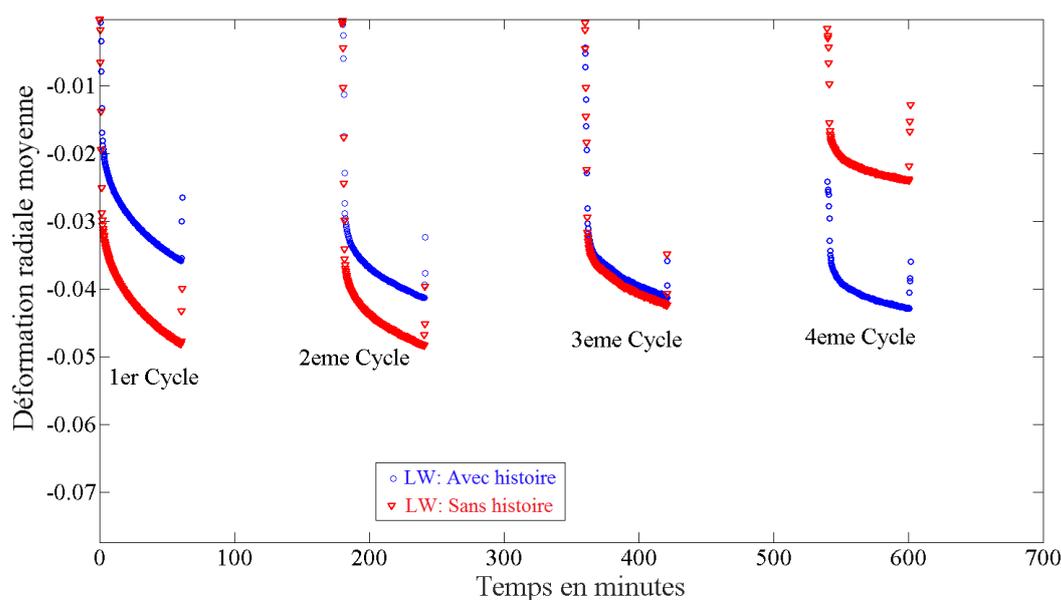


FIGURE 5.24: déformation radiale moyenne de LW , effet de l'histoire hydromécanique en fluage sous séchage (Ep3)

tement hydromécanique du bois à l'échelle du cerne a été faite via la construction de masques pour EW et LW . On a pu mettre en évidence les comportements en fluage et en recouvrance de EW et LW avec prise en compte de l'histoire hydromécanique antérieure. L'influence de la non prise en compte de cette dernière a été

également abordée. En effet, on a pu mettre en relief l'accroissement de la rigidité de EW et LW , d'une part par la diminution de la pente et d'autre par le phénomène d'inversion de courbes. Maintenant, dans la section 3, l'identification des propriétés de comportement mécanique de EW et LW , en environnement constant ou variable, sera abordée. On procédera également à une partition de la déformation totale dans EW et LW .

3 Identification inverse et partition de la déformation totale

L'objectif de cette section est principalement axé sur la caractérisation mécanique du bois à l'échelle du cerne. Afin d'identifier des paramètres mécaniques en environnement variable, il y a nécessité de connaître la valeur initiale de chacun de ces paramètres. Pour ce faire, on procède à un essai de compression radiale viscoélastique à teneur en eau constante ($w = 12\%$). Comme on l'a déjà mentionné dans la section 3 du chapitre 1, l'un des modèles utilisés pour le comportement viscoélastique du bois est celui de Burgers. L'avantage de ce modèle est qu'il fournit une solution analytique à une teneur en eau donnée. Ce modèle couplé aux données expérimentales permet par identification inverse d'évaluer les paramètres recherchés. Ensuite, l'identification inverse en environnement variable sera effectuée en faisant varier chaque paramètre en fonction de la teneur en eau.

3.1 Identification des paramètres mécaniques initiaux

L'éprouvette testée provient du même tronc que celles déjà utilisées dans ce chapitre. Elle a pour dimensions $L \times R \times T = 44 \times 42 \times 17 \text{ mm}^3$. La force appliquée en compression radiale est de 3 kN pour une durée de fluage de 16 heures. Durant l'expérimentation, une image moyennée sur 8 (minimisation du bruit) est prise toutes les 4 minutes. Le dépouillement des images obtenues permet d'accéder aux cartes de déformation radiale. Ensuite une zone d'intérêt est définie sur les cartes de déformation. Sur cette zone d'intérêt on vient appliquer la même procédure de seuillage que celle présentée dans les équations 5.1 et 5.2. Un seul type de masque est utilisé tout en étant conscient, comme on l'a déjà vu au chapitre 4, que le choix du masque impacte les résultats obtenus. Les bornes choisies pour construire les masques sont les

suivantes : $\varepsilon_{EW_{min}} = -0,15$, $\varepsilon_{EW_{max}} = -0,03$, $\varepsilon_{LW_{min}} = -0,015$ et $\varepsilon_{LW_{max}} = 0$. Ces masques permettent de calculer les déformations moyennes dans EW et dans LW ainsi celles de la zone d'intérêt où ces masques sont définis. Cette zone d'intérêt est appelée $SAMPLE$ dans ce qui suit. Le modèle de Burgers utilisé pour le comportement viscoélastique est présenté sur la figure 5.25. La solution analytique de ce modèle en déformation est donnée dans l'équation 5.3. A partir du moment où on peut extraire les déformations moyennes dans EW , dans LW et dans $SAMPLE$, ce modèle leur est applicable individuellement.

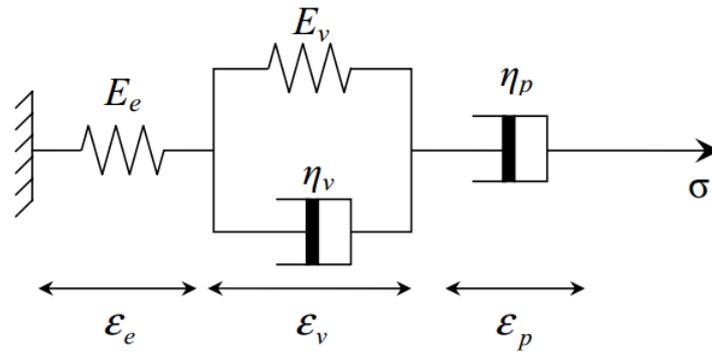


FIGURE 5.25: modèle de Burgers

$$\varepsilon_{iR}(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_{eiR}} + \frac{1}{E_{viR}} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{viR}t}{\eta_{viR}}\right) \right) + \frac{t}{\eta_{piR}} \right] \quad (5.3)$$

avec E_{eiR} le module élastique (MPa), E_{viR} le module visqueux (MPa), η_{viR} la viscosité dynamique (MPa.h) et η_{piR} le paramètre de non recouvrance (MPa.h); $i = EW, LW, SAMPLE$. Ces paramètres sont les inconnues du problème. Au total on a douze paramètres à identifier. σ est la contrainte mécanique appliquée en compression ($\sigma < 0$).

L'approche utilisée est axée sur la minimisation de fonctions coût (voir équation 5.4) construites à partir des déformations issues de l'expérimentation et de la solution analytique du modèle de Burgers.

$$F_i = \sum_{Im_1}^{Im_2} [\varepsilon_{imoyExpR} - \varepsilon_{imoyModR}]^2 \quad (5.4)$$

où $\varepsilon_{imoyExp_R}$ et $\varepsilon_{imoyMod_R}$ sont respectivement les déformations radiales expérimentales et issues de l'équation 5.3. Im_1 est la première image à partir de laquelle les fonctions coût seront construites et Im_2 est la dernière image de la série de données. Im_1 et Im_2 sont fixées à partir des cartes de déformations obtenues lors de l'expérimentation. $i = EW, LW, SAMPLE$.

Les contraintes linéaires d'inégalité auxquelles est soumis le problème d'optimisation, sont présentées dans la l'équation 5.5. En plus de ces contraintes, chacun des paramètres recherchés doit être strictement supérieur à zéro.

$$\begin{pmatrix} E_{eEW_R} - E_{eLW_R} \\ E_{\nu EW_R} - E_{\nu LW_R} \\ \eta_{\nu EW_R} - \eta_{\nu LW_R} \\ \eta_{pEW_R} - \eta_{pLW_R} \end{pmatrix} < \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

L'algorithme développé est inspiré de l'algorithme d'identification inverse déjà présenté au chapitre 4 (figure 4.3). Il est donné sur la figure 5.26. Un algorithme similaire est également fait pour l'identification des propriétés locales dans le cas d'une compression longitudinale.

Les paramètres identifiés après application de cet algorithme sont présentés dans le tableau 5.6. Ces valeurs de paramètres obtenues sont en accord avec les niveaux

Désignations	E_e (MPa)	E_{θ} (MPa)	η_{θ} (MPa.h)	η_p (MPa.h)
EW	81,97	286,32	312	7497,67
SAMPLE	124,93	468,82	672,85	12755,05
LW	626,34	1802,67	1600,43	58823,55

TABLE 5.6: paramètres identifiés (à teneur en eau initiale w=12 %)

de déformation dans EW et LW retenus grâce aux masques. En effet, conformément aux données de la littérature les paramètres de comportement mécanique de LW sont supérieurs à ceux de EW . Les valeurs des paramètres de l'éprouvette testée identifiées sur la zone d'intérêt sont compris entre les paramètres de EW et de LW . Sur la figure 5.27 on a représenté l'évolution de la déformation moyenne expérimentale et celle issue du modèle à partir des paramètres identifiés. La figure 5.27-a montre que les paramètres obtenus pour EW donnent une allure tout à fait en accord avec la courbe expérimentale. Les paramètres évalués pour LW donnent une évolution acceptable de la déformation du modèle malgré la perturbation qu'on

peut noter dans l'allure de la courbe expérimentale (figure 5.27-b). De même, la figure 5.27-c témoigne d'une identification correcte des paramètres recherchés pour *SAMPLE*. Ces résultats permettent de confirmer que l'algorithme proposé est tout à fait capable d'évaluer correctement les paramètres de comportement locaux.

Sur la figure 5.28 la partition de chacune des déformations radiales moyennes est proposée. En effet, dans cette déformation on retrouve une part de déformation élastique, une part due à la viscoélasticité et une autre due à la déformation non recouvrable.

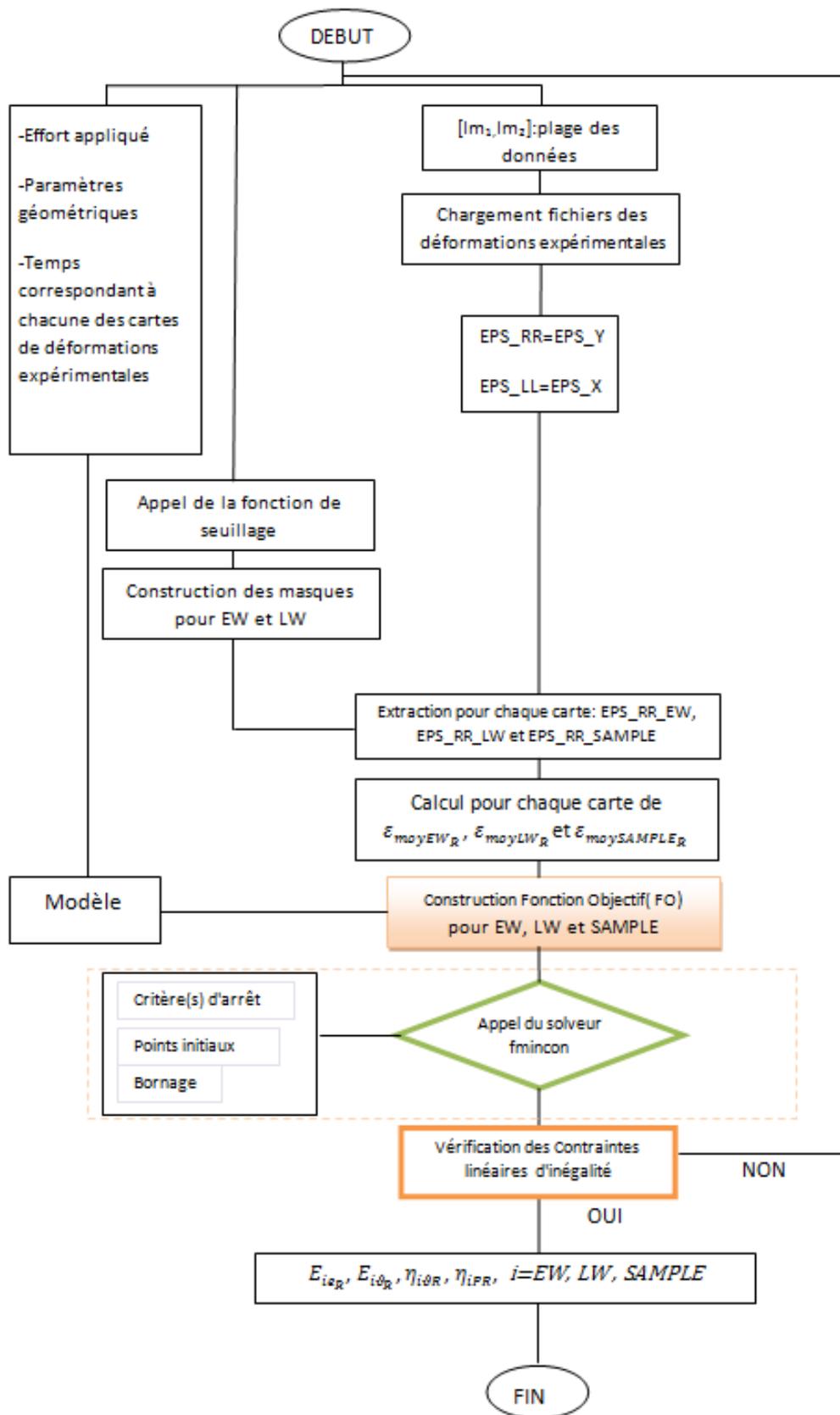


FIGURE 5.26: algorithme d'identification des paramètres initiaux (teneur en eau constante, compression radiale)

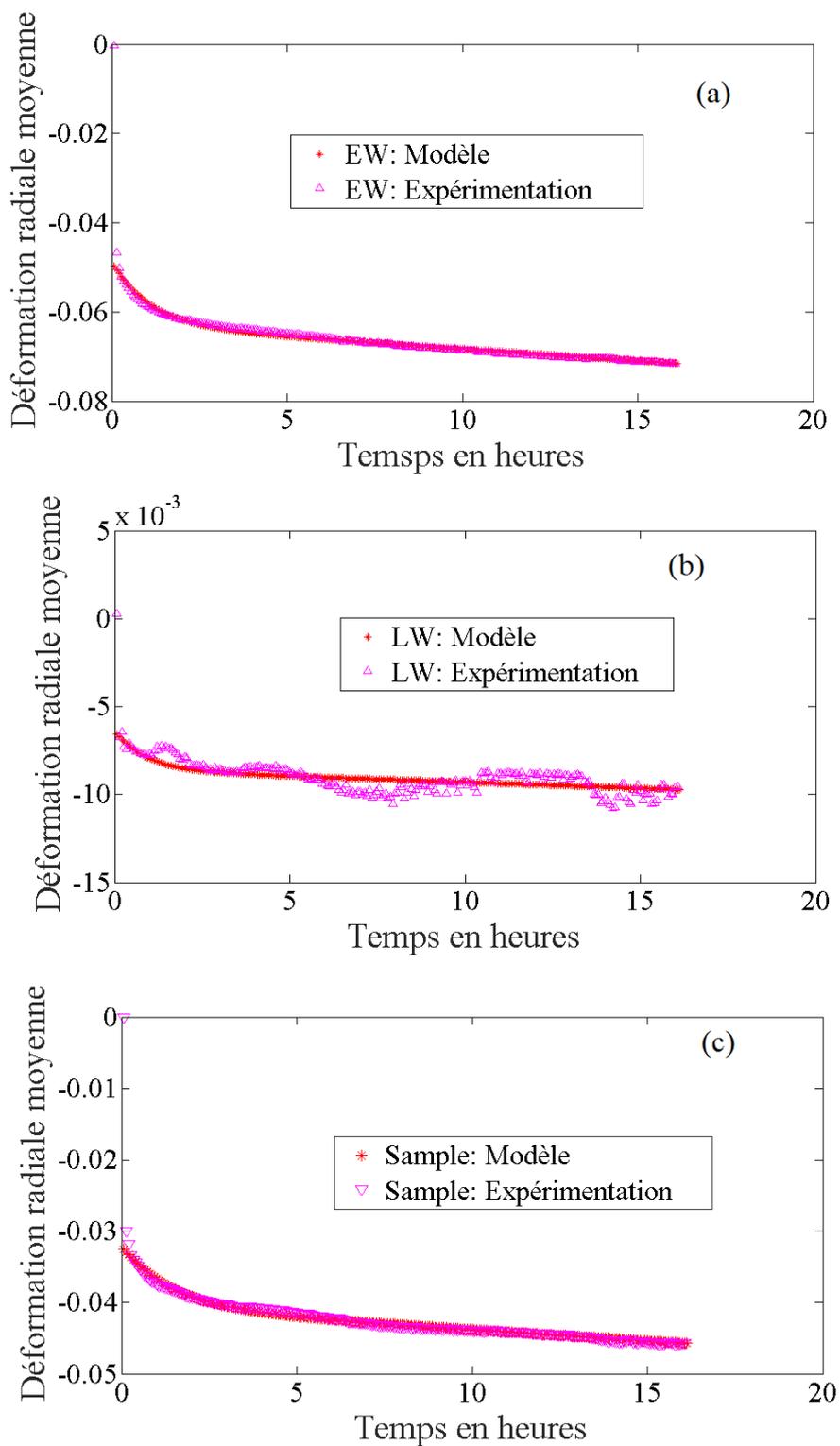


FIGURE 5.27: comparaison courbes expérimentales et issues du modèle de Burgers (à teneur en eau initiale $w=12\%$), (a) : EW, (b) : LW, (c) : Sample

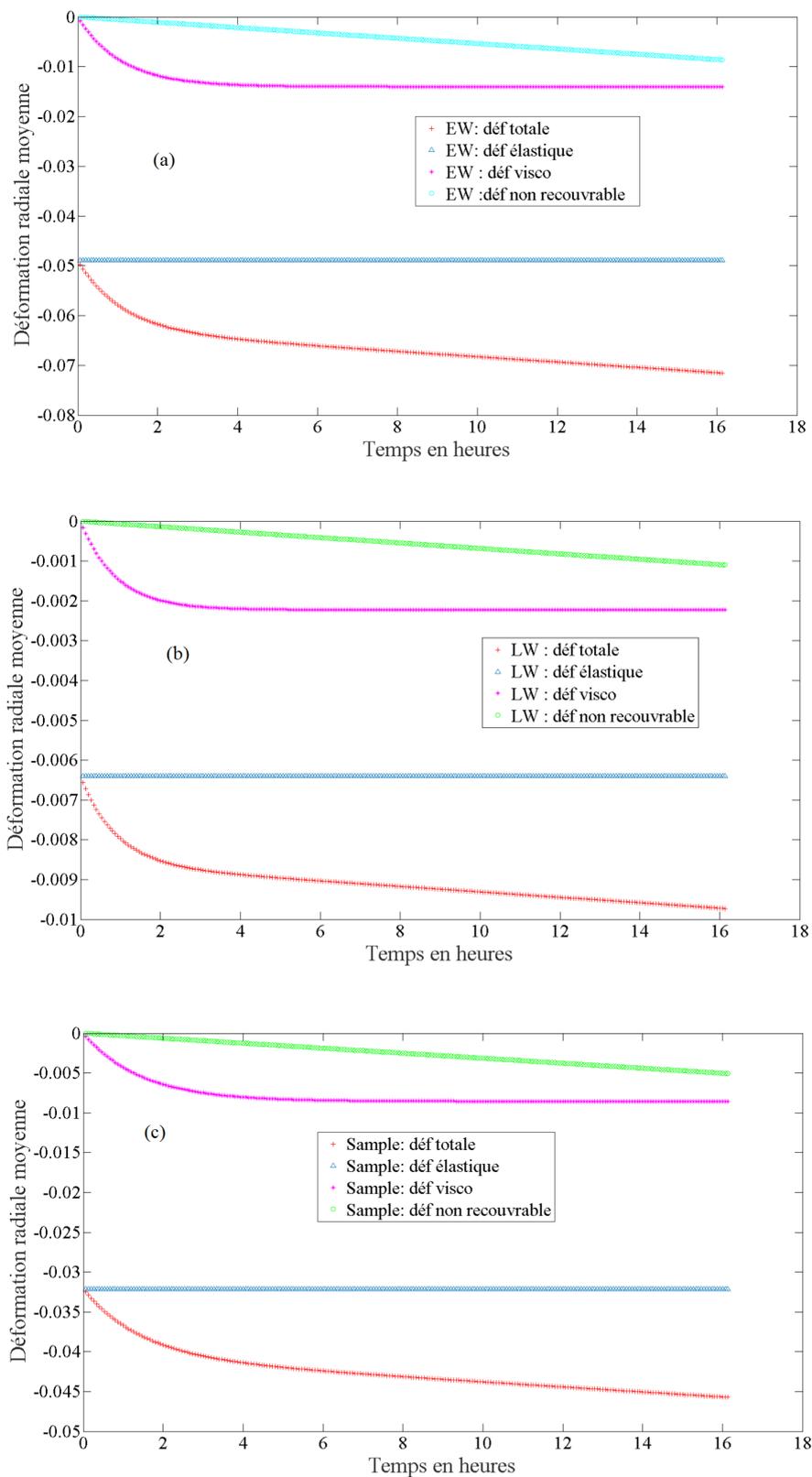


FIGURE 5.28: partition de la déformation totale (à teneur en eau initiale $w=12$ %), , (a) : EW, (b) : LW, (c) : Sample

3.2 Identification des paramètres en environnement variable

Comme on a l'a déjà vu dans la section 3 du chapitre 1, l'identification des paramètres en environnement variable dans le domaine hygroscopique en séchage va nécessiter la prise en compte de la variation des caractéristiques mécaniques, de la déformation due au retrait ainsi que de la déformation mécanosorptive en plus de la déformation élastique et du fluage viscoélastique. A cela s'ajoute la déformation non recouvrable. On fait l'hypothèse que le modèle de Burgers est applicable pour chaque teneur en eau lorsque les paramètres mécaniques sont mis à jour par rapport à cette teneur en eau. Ceci permettrait d'évaluer les déformations élastique et non recouvrable ainsi que le fluage viscoélastique tenant compte de la variation des paramètres mécaniques. La déformation regroupant ces trois termes est donnée dans l'équation 5.6. La prise en compte de la variation des paramètres mécaniques est présentée dans l'équation 5.6. Cette équation est inspirée des formules de Guitard (Moutee (2006)).

$$\varepsilon_{i_R}(w(t)) = \sigma \left[\frac{1}{E_{ei_R}(w(t))} + \frac{1}{E_{vi_R}(w(t))} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_{vi_R}(w(t))t}{\eta_{vi_R}(w(t))} \right) \right) + \frac{t}{\eta_{pi_R}(w(t))} \right] \quad (5.6)$$

$$P_{i_R}(w(t)) = P_{i_{Rw_{ini}}} [1 - \gamma_{i_R}(w(t) - w_{ini})] \quad (5.7)$$

où P_{i_R} est le paramètre mécanique considérée, $P_{i_{Rw_{ini}}}$ est la valeur de ce paramètre à la teneur en eau initiale w_{ini} ($w_{ini}=12\%$). Les valeurs des paramètres initiaux sont prises égales à celles présentées dans le tableau 5.6. γ_{i_R} est un paramètre sans unité ($i = EW, LW, SAMPLE$).

On ne connaît que l'évolution de la teneur en eau totale de l'éprouvette testée. On suppose que le retrait dans EW , LW et $SAMPLE$ peut être estimée par l'équation 5.8. Le paramètre k_{i_R} est différent du coefficient de retrait car la teneur en eau connue est la valeur globale. Ce coefficient tient donc compte aussi du gradient d'humidité existant dans l'épaisseur de l'éprouvette testée ($i = EW, LW, SAMPLE$).

$$\varepsilon_{w_{i_R}} = k_{i_R} \Delta w(t) \quad (5.8)$$

Le terme de déformation qui reste à écrire est la déformation mécanosorptive. Comme on l'a déjà vu dans la section 2 du chapitre 1, il existe différents modèles pour représenter le comportement mécanosorptif du bois dont celui de Ranta-Maunus (Moutee (2006)). Ce modèle permet d'exprimer le taux de variation de la déforma-

tion comme indiqué dans l'équation 5.9. σ est la teneur en eau appliquée, considérée constante ici. m_{i_R} est le paramètre mécanosorptif ($i = EW, LW, SAMPLE$). L'évolution de la teneur en eau totale est obtenue à partir d'une interpolation de la courbe expérimentale.

$$\frac{d\varepsilon_{ms_{i_R}}(t)}{dt} = m_{i_R}\sigma \left| \frac{dw(t)}{dt} \right| \quad (5.9)$$

En intégrant l'équation 5.9 entre un instant t_0 (début du chargement constant) et un instant t fini (fin du chargement constant), on obtient l'équation 5.10 donnant la déformation mécanosorptive. Dans cette équation $w(t_0)$ est la valeur de la teneur en eau à $t = t_0$.

$$\varepsilon_{ms_{i_R}}(t) = \int_{t_0}^t m_{i_R}\sigma \left| \frac{dw(t)}{dt} \right| dt = m_{i_R}\sigma (|w(t) - w(t_0)|) \quad (5.10)$$

Pour EW , LW ou $SAMPLE$, la déformation totale est la somme des déformations présentées dans les équations 5.6, 5.8 et 5.10.

$$\varepsilon_{i_{R_{tot}}}(w(t)) = \sigma \left[\frac{1}{E_{ei_R}(w(t))} + \frac{1}{E_{vi_R}(w(t))} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_{vi_R}(w(t))t}{\eta_{vi_R}(w(t))}\right) \right) + \frac{t}{\eta_{pi_R}(w(t))} \right] + k_{i_R}\Delta w(t) + m_{i_R}\sigma (|w(t) - w(t_0)|) \quad (5.11)$$

Les paramètres γ_{i_R} , k_{i_R} et m_{i_R} sont inconnus ($i = EW, LW, SAMPLE$). Connaissant les résultats expérimentaux en termes de teneur en eau et de déformation à l'échelle du cerne, et les paramètres de comportement mécaniques initiaux donnés dans le tableau 5.6, il serait possible d'évaluer ces inconnues par méthode inverse. Cette dernière passe par la construction de fonctions coût à minimiser comme dans le cas du paragraphe 3.1. Ces fonctions coût sont construites à partir du modèle présenté dans l'équation 5.11, et des déformations moyennes expérimentales. Typiquement, de telles courbes expérimentales sont celles obtenues dans la phase de fluage de chaque cycle de l'expérimentation 3 (voir figure 5.22). L'algorithme proposé est présenté sur la figure 5.29. Cet algorithme s'inspire de celui présenté sur la figure 5.26. Il a été appliqué aux déformations expérimentales en fluage du cycle 1 de l'expérimentation 3 (que pour EW et LW). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.7.

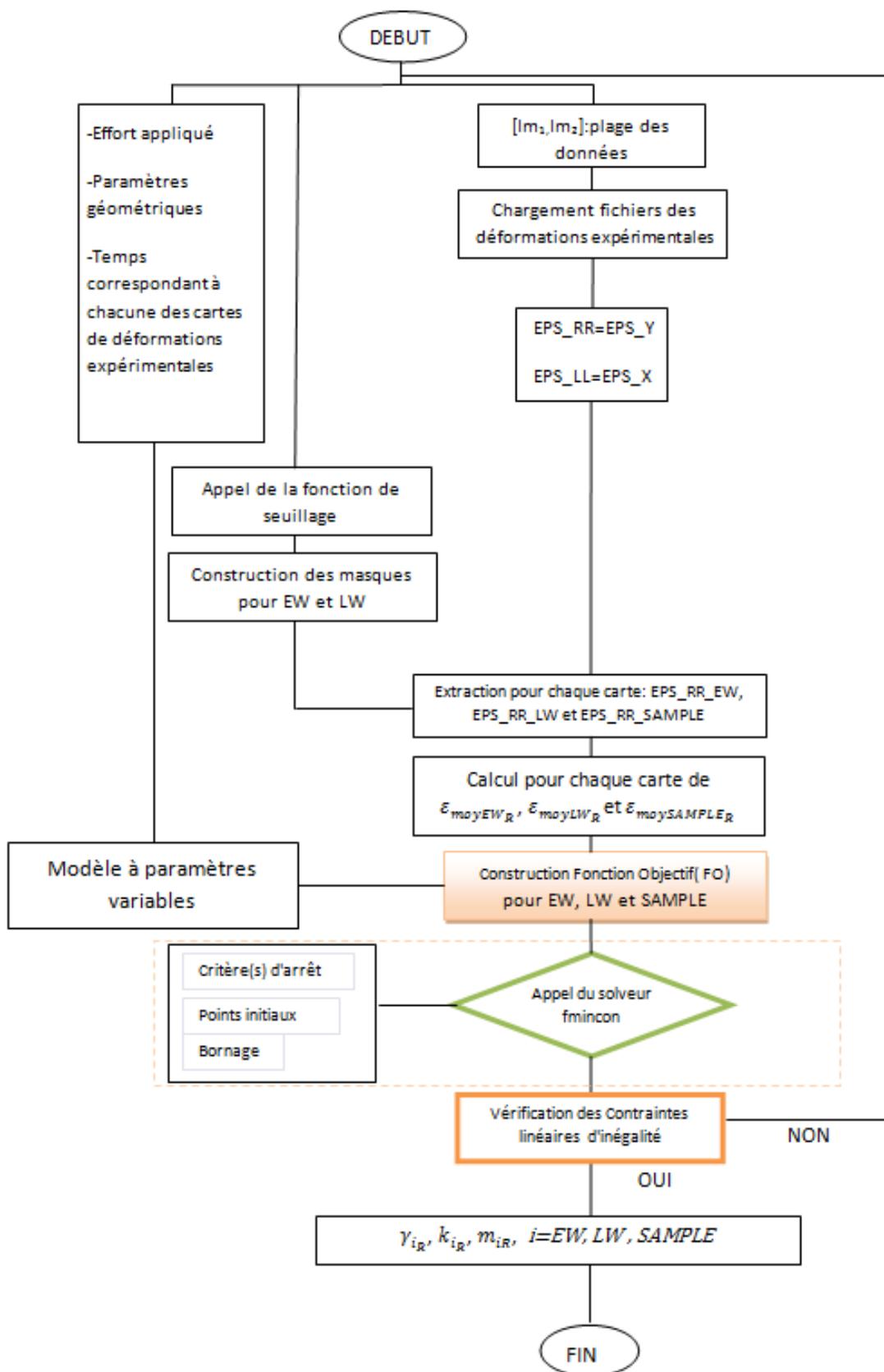


FIGURE 5.29: algorithme d'identification des paramètres en environnement variable (compression radiale)

Cependant, ces paramètres obtenus pour *EW* et *LW* ne permettent pas une partition correcte de la déformation totale. On peut en déduire que l'algorithme proposé pour l'identification en environnement variable ne permet pas de caractériser correctement le comportement du bois en séchage sous contrainte. Cet échec pourrait être dû à l'hypothèse faite sur l'évolution de la teneur en eau surfacique à partir de la teneur en eau globale. En effet, en plus du fait que les teneurs en eau dans *EW* et *LW* sont différentes, il existe un gradient d'humidité dans l'épaisseur de l'éprouvette testée dans l'expérimentation 3. A cela s'ajoute la durée très courte de la phase de fluage des cycles de l'expérimentation 3. Il se trouve que la durée de chargement mécanique dans un cycle est juste d'une heure. Cette durée est faible pour permettre aux effets viscoélastiques de se manifester correctement. Comme on l'a déjà mentionné précédemment, cette durée a été limitée par le fait que la teneur en eau n'était connue qu'au début et à la fin de chaque phase de fluage, ce qui donne une droite. Par conséquent si on souhaite augmenter la durée de chargement avec le même procédé de mesure des pertes de masses, on s'éloignerait de l'allure réelle de l'évolution de la teneur en eau. Cette faible durée de chargement conjuguée à des conditions de séchage naturel ne semblent pas permettre une expression prononcée des effets mécanosorptifs. L'échec pourrait être également lié aux paramètres initiaux utilisés qui sont issus de l'identification en environnement constant d'une éprouvette différente. La validité des modèles utilisés peut également être indexée comme cause de cet échec. On voit bien qu'il y a plusieurs raisons possibles pouvant être liées directement ou indirectement à l'obtention de résultats erronés avec cet algorithme.

Désignations	k	m	γ
EW	1,064	0,109	0,032
LW	0,488	0,028	0,032

TABLE 5.7: paramètres identifiés en environnement variable (phase de fluage cycle 1, expérimentation 3)

Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier le comportement du bois à l'échelle du cerne de croissance sous l'effet couplé de chargements hydrique (séchage) et mé-

canique (compression). Pour ce faire la méthode de la grille ici a été utilisée pour l'obtention des champs de déformation. Dans un premier temps les conditions expérimentales ont été présentées. Dans ce premier point on a abordé les contraintes expérimentales ainsi que les moyens matériels et méthodes qui ont été déployés pour mener à bien les expérimentations. Les résultats expérimentaux ont ensuite été présentés. Les cartes de déformations radiales obtenues lors des différentes expérimentations ont été présentées et discutées. Une investigation à l'échelle du cerne de la déformation du bois en séchage sous contrainte a été effectuée. Ensuite, des méthodes d'identification paramétrique axées sur la minimisation de fonctions coût construites à partir des déformations expérimentales et issues de modèles ont été proposées afin de caractériser le bois en environnement constant ou variable sous contrainte. On a pu s'apercevoir que l'algorithme d'identification inverse proposé pour obtenir les paramètres de comportement mécanique en environnement constant donnait des résultats tout à fait corrects. En effet, on a pu constater cela en comparant après identification des paramètres mécaniques, les courbes expérimentales et celles issues du modèle viscoélastique de Burgers. La partition de la déformation totale en environnement constant a été également possible grâce à ce modèle. Cependant, l'algorithme proposé pour l'identification des paramètres en environnement variable n'a pas permis de décrire de manière adéquate le comportement du bois à l'échelle du cerne. On a vu que cet échec pouvait être liée à l'hypothèse faite sur l'évolution de la teneur en eau surfacique à partir de la teneur en eau globale. La durée très courte de la phase de fluage des cycles de l'expérimentation 3 a été également soulignée comme cause potentielle. En effet, il a été mentionné que cette durée d'une heure était relativement faible pour permettre aux effets viscoélastiques de se manifester correctement. D'autre part, l'échec pouvait être également lié aux paramètres initiaux utilisés qui sont issus de l'identification en environnement constant d'une éprouvette différente. La validité des modèles utilisés a été également indexée comme cause possible de cet échec. La mise en place d'un dispositif expérimental pour une meilleure maîtrise des conditions hygrothermiques et une obtention de la teneur en eau à temps réel à l'échelle du cerne permettraient d'escompter de meilleurs résultats. Il est également envisageable de tester d'autres modèles rhéologiques disponibles dans la littérature (Maxwell généralisé, Kelvin-Voigt généralisé) afin de comparer les résultats obtenus. Ceci permettrait de choisir le modèle rhéologique le mieux adapté.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions

L'objectif général de ce travail de thèse était de caractériser les hétérogénéités du bois par le biais de mesures de champs. Pour ce faire, dans un premier temps, une étude bibliographique a été menée afin de mieux comprendre le caractère hétérogène du bois et ses comportements annexes. En effet, l'appréhension du caractère hétérogène et multi-échelle du bois est indispensable pour une meilleure caractérisation de ce matériau sous sollicitations hydriques et/ou mécaniques. On a vu qu'il existait dans la littérature différentes méthodes pour déterminer les propriétés hydriques du bois. Ces méthodes ne proposent pas une caractérisation complète donnant à la fois les teneurs en eau, les coefficients de diffusion et de retrait/ gonflement. Celles-ci ne permettent pas non plus la prise en compte des gradients de propriétés liés entre autres à la présence des cernes. L'importance de la prise en compte des hétérogénéités dans le bois a été mentionnée par certains auteurs. Les structures bois en service sous humidité constante ou variable exhibent des comportements très complexes qui sont liés à la durée d'application de la charge (comportement viscoélastique), mais aussi au couplage entre le chargement et les variations hydriques (comportement mécanosorptif). Là encore, les données de la littérature que nous avons fournies au chapitre 1 ne prennent pas en compte la présence des gradients locaux de propriétés. On a pu s'apercevoir que ces derniers devraient être considérés dès que l'on commence à travailler sur des éprouvettes très minces, comme c'est le cas en général pour les essais "purement" mécanosorptifs. On a vu que l'utilisation de techniques de mesures de champs sans contact permet d'obtenir une réponse hétérogène d'un matériau à gradients de propriétés comme le bois sous sollicitations hydriques et/ou mécaniques. Il peut être possible ensuite de remonter par identification inverse aux propriétés locales du matériau grâce aux champs hétérogènes obtenus. En effet,

comme on a pu le voir, ces techniques permettent de révéler des singularités pouvant être liées à des gradients de propriétés, notamment la présence de EW et de LW .

Par ailleurs, on a pu voir que les techniques de mesures de champs ont rendu plus pratique la résolution des problèmes d'identification inverse. En effet, l'obtention d'une réponse du matériau mettant en évidence une réponse hétérogène liée à la présence de gradients de propriétés offre la possibilité d'évaluer les propriétés locales du matériau étudié. Cependant, la plupart des méthodes d'identification inverse présentées n'a jamais été appliquée au matériau bois sous sollicitations hydriques ou hydromécaniques. Néanmoins, on retrouve des méthodes inverses qui ont été développées pour de tels problèmes mais leur mise en œuvre a été basée sur des champs homogènes de teneur en eau. Par conséquent, elles ne permettent pas une caractérisation du bois sous sollicitations hydriques ou hydromécaniques en tenant compte des gradients de propriétés.

L'étude bibliographique menée a montré que l'établissement de méthodes capables de caractériser de manière la plus complète possible le bois sous sollicitations hydriques et/ou mécaniques tout en prenant en compte son caractère hétérogène lié principalement à la présence de LW et EW , serait tout à fait légitime. La méthode de la grille a été utilisée comme technique de mesures de champs. Cette méthode a été dans un premier temps appliquée au bois en adsorption et désorption. On a vu qu'une telle étude présentait un certain nombre de contraintes liées à l'expérimentation. Néanmoins, un dispositif adapté a été mis en place. Des essais sur le pin des Landes et sur le sapin blanc du Massif Central ont permis un choix définitif de l'épaisseur dans la direction tangentielle et des conditions limites. Les résultats obtenus sur le pin ainsi que sur le sapin blanc ont permis de valider le dispositif expérimental. Ce dernier a été ensuite utilisé pour mener une campagne d'essais sur des éprouvettes de sapin blanc prélevées de part et d'autre du cœur. Les résultats expérimentaux montrent et confirment que LW subit un niveau de déformation plus prononcé sous sollicitations hydriques (adsorption, désorption) comparé à EW . On a pu mettre en évidence que la transition au sein des cernes ne se fait pas de manière brusque mais plutôt progressive. Partant de cette constatation, une procédure de construction de masques a été mise en place afin d'accéder aux déformations à l'échelle du cerne. En outre, on a pu constater que les éprouvettes issues de part et d'autre du cœur ne subissaient pas le même niveau de déformation. Pour comprendre la raison de ce constat, des éprouvettes ont été prélevées dans les mêmes zones et observées au

MEB, et les résultats sur l'épaisseur des trachéides semblent être en bon accord. Par ailleurs, une méthode d'identification inverse des propriétés hydriques du bois à l'échelle du cerne a été mise au point pour une caractérisation de LW et EW . Celle-ci permet d'évaluer les coefficients de diffusion et d'expansion hydriques de LW et EW ainsi que leur teneur en eau en phase d'adsorption. La résolution du problème posé s'est appuyée sur des hypothèses notamment concernant la validité de la relation linéaire entre la variation de la teneur en eau et la déformation hydrique, ainsi que de validité de la loi de Fick pour un problème unidimensionnel. La résolution de la loi de Fick a été faite de manière numérique en utilisant Matlab^(R). Ce modèle numérique résolvant la loi de Fick a été couplé aux résultats expérimentaux pour construire des fonctions coût dont la minimisation sur Matlab^(R) a permis d'accéder aux paramètres recherchés. Dans un premier temps la méthode a été validée numériquement. L'étude de l'influence du maillage ainsi que celle de la valeur du PSF ont été également effectuées. L'application de la méthode aux données expérimentales a donné des paramètres tout à fait en accord avec les résultats escomptés. L'étude de l'impact du masque d'extraction des déformations et de la valeur du PFS a été conduite.

Afin de prendre en compte simultanément les sollicitations mécanique et hydrique, des études ont été menées afin d'investiguer le comportement du bois en séchage sous contrainte (compression) à l'échelle du cerne. Pour ce faire la méthode de la grille a été également utilisée pour l'obtention des champs de déformation. Les cartes de déformations radiales obtenues lors des différentes expérimentations ont révélé l'existence d'un comportement très complexe du bois à l'échelle du cerne. Une investigation à l'échelle du cerne de la déformation du bois en séchage sous contrainte a été effectuée. Des méthodes d'identification paramétrique axées sur la minimisation de fonctions coût construites à partir des déformations expérimentales et issues de modèles, ont été proposées afin de caractériser le bois en environnement constant ou variable sous contrainte. On a pu s'apercevoir que l'algorithme d'identification inverse proposé pour obtenir les paramètres de comportement mécanique en environnement constant donnait des résultats tout à fait corrects. En effet, la comparaison (après identification des paramètres mécaniques) des courbes de déformation expérimentale et celles issues du modèle viscoélastique de Burgers, a permis de confirmer cela. La partition de la déformation totale en environnement constant a également été rendue possible grâce à ce modèle.

Cependant, l'algorithme proposé pour l'identification des paramètres en environne-

ment variable n'a pas permis de décrire adéquatement le comportement du bois à l'échelle du cerne. Ce problème peut être lié à l'hypothèse faite sur l'évolution de la teneur en eau surfacique à partir de la teneur en eau globale. La durée très courte de la phase de fluage des cycles de la troisième expérimentation a été également soulignée comme cause potentielle. En effet, cette durée d'une heure était relativement faible pour permettre aux effets viscoélastiques de se manifester correctement. Le problème peut être également lié aux paramètres initiaux utilisés qui sont issus de l'identification en environnement constant d'une éprouvette différente. La validité des modèles utilisés a été également indexée comme cause possible de cet échec.

Perspectives

En termes de perspectives, il serait intéressant d'adapter la méthode d'identification inverse à l'évaluation des propriétés hydriques du bois en désorption à l'échelle du cerne. En effet, à cause du phénomène d'hystérésis, les propriétés hydriques du bois sont différentes en adsorption et en désorption. Le modèle devant être couplé aux données expérimentales doit prendre en compte les conditions aux limites, notamment la convection au niveau des parties de l'éprouvette en contact directe avec le milieu séchant. D'autre part, la réalisation d'expérimentations avec différentes épaisseurs serait cruciale. En effet, la validité de l'hypothèse d'une approche en diffusion unidimensionnelle dépend fortement de l'épaisseur dans la direction de diffusion. Une telle étude permettrait donc de mieux appréhender la sensibilité des paramètres de comportement hydriques recherchés aux dimensions de l'éprouvette notamment l'épaisseur. On devrait être capable par la suite de définir une valeur minimale et une valeur maximale de l'épaisseur pour la validité de l'hypothèse de diffusion unidimensionnelle.

La prise en compte du couplage entre les transferts de masse et de chaleur est envisageable. Une telle approche nécessite la connaissance des conditions limites et d'équilibre en température de l'éprouvette testée. La mise en place d'un système permettant de connaître l'évolution de la température sur les faces de l'éprouvette testée peut être très délicate, vu qu'on utilise une technique de mesure de champs sans contact.

Par ailleurs, l'identification des propriétés hydriques de nœuds en appliquant la méthode inverse proposée semble être faisable. En effet, comme a pu le voir lors de ce

travail de thèse, la méthode de la grille a permis de révéler les gradients de propriétés en EW et LW par le biais des cartes de déformation. L'utilisation de cette technique sur des éprouvettes présentant des nœuds permettrait également de mettre en relief le comportement singulier de ceux-ci. L'application de la méthode d'identification inverse, proposée au chapitre 4, rendrait possible la détermination des propriétés hydriques des nœuds étudiés.

D'autres points pourraient également être examinés notamment la prise en compte des phénomènes liés à la diffusion non-fickienne. En effet, des études ont indexé la manifestation de phénomène n'obéissant pas à la loi de Fick lors du processus de diffusion hydrique. La prise en compte de tels phénomènes est donc envisageable pour voir leur éventuelle influence sur les paramètres identifiés sous l'hypothèse de la validité de la loi de Fick. D'autre part, il serait également intéressant de développer une approche 3-D de la diffusion et de généraliser la méthode d'identification inverse des paramètres hydriques. La résolution du problème de diffusion 3-D est sans aucun doute l'approche la plus complète. Cependant, elle peut être très délicate voir difficile, surtout si l'on souhaite en plus de l'orthotropie du bois prendre en compte les gradients de propriétés entre EW et LW dans chaque direction. La généralisation de la méthode d'identification inverse serait également une tâche très délicate car le nombre de paramètres à identifier serait très important.

Quant à l'étude du bois en environnement variable, la réalisation d'un dispositif expérimental permettant de connaître la teneur en eau en temps réel lors des phases de fluage et de recouvrance par mesures de champs, semble être une piste importante à explorer. Pour réaliser un tel dispositif, on a besoin d'avoir dans une même enceinte le dispositif d'application de la charge, le système d'obtention de l'évolution de la masse de l'éprouvette testée, la caméra pour la prise d'images et un système de contrôle de la température et de l'humidité relative. La mise en place d'un tel dispositif mériterait une attention particulière notamment en ce qui concerne l'influence de l'humidité relative sur la qualité des images qui vont permettre de connaître l'état de déformation de l'éprouvette étudiée. Un tel dispositif permettrait de faire des essais de séchage sous contrainte avec une durée plus longue dans des conditions de température et d'humidité relative plus maîtrisées.

En ce qui concerne l'identification des propriétés mécaniques, le développement d'autres méthodes d'identification inverse basées sur les modèles rhéologiques de Kelvin-Voigt et de Maxwell généralisés, est envisageable. La difficulté principale sera axée sur le nombre de paramètres à identifier surtout lorsqu'on prend en compte les

gradients de propriétés comme la présence de LW et EW . Il y a aussi une difficulté majeure concernant la prise en compte de tous les phénomènes qui se cachent dans la réponse du bois sous sollicitation mécanique notamment en environnement variable (fluage viscoélastique, fluage mécanosorptif, effet hygroverrou, retrait/gonflement...). Enfin, une étude de l'influence de la prise en compte des gradients de propriétés à l'échelle de la structure permettrait d'aboutir à des conclusions très pertinentes.

Bibliographie

- Agoua, E., Zohoun, S. & Perré, P. (2001), 'A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water in wood in unsteady-state conditions : determination of the best fitting method by numerical simulation', *International Journal of Heat and Mass Transfer* **44**(19), 3731–3744.
- Almeida, G., Assor, C. & Perré, P. (2008), 'The dynamic of shrinkage/moisture content behavior determined during drying of microsamples for different kinds of wood', *Drying Technology* **26**(9), 1118–1124.
- Armstrong, L. D. & Christensen, G. N. (1961), 'Influence of moisture changes on deformation of wood under stress', *Nature* **191**, 869–870.
- Armstrong, L. D. & Kingston, R. S. T. (1962), 'The effect of moisture content changes on the deformation of wood under stress', *Australian journal of applied science* **13**(4), 257–276.
- Armstrong, L. D., Kingston, R. S. et al. (1960), 'Effect of moisture changes on creep in wood.', *Nature, London* **185**(4716), 862–3.
- Babiak, M. (1995), 'Letter to the editors. is fick's law valid for the adsorption of water by wood?', *Wood Science and Technology* **29**(3), 227–229.
- Badel, E. (1999), 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, PhD thesis, Thèse ENGREF.
- Badulescu, C. (2010), Accurate calculation of plane strain with the grid method. Application to an aluminium multycrystal, Theses, Université Blaise Pascal -

- Clermont-Ferrand II.
URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00719415>
- Badulescu, C., Grédiac, M. & Mathias, J. D. (2009), ‘Investigation of the grid method for accurate in-plane strain measurement’, *Measurement Science and Technology* **20**(9), 095102.
- Baronas, R. & Ivanauskas, F. (2004), ‘Reducing spatial dimensionality in a model of moisture diffusion in a solid material’, *International journal of heat and mass transfer* **47**(4), 699–705.
- Bazant, Z. P. (1979), ‘Thermodynamics of solidifying or melting viscoelastic material’, *Journal of the Engineering Mechanics Division* **105**(6), 933–952.
- Bigorgne, L., Brunet, M., Maigre, H., Simon, P. & Chaudet, P. (2011), ‘Investigation of softwood fracture criteria at the mesoscopic scale’, *International journal of fracture* **172**(1), 65–76.
- Bonneau, P. (1991), *Modélisations du séchage d’un matériau hétérogène : application à un bois de résineux*.
URL: <https://books.google.fr/books?id=feXCMgEACAAJ>
- Bytebier, K. (2009), Etude du comportement mécanique de la paroi cellulaire du bois par Microscopie à Force Atomique, PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Cave, I. D. (1997), ‘Theory of x-ray measurement of microfibril angle in wood’, *Wood science and technology* **31**(4), 225–234.
- Clair, B. (2011), Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l’échelle de la paroi cellulaire : essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse, PhD thesis, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts Centre de Montpellier.
- Cramer, S., Kretschmann, D., Lakes, R. & Schmidt, T. (2005), ‘Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine’, *Holzforschung* **59**(5), 531–538.
- Crank, J. (1975), *The Mathematics of Diffusion*, Elsevier.

- CSTB (2009), Extrait du guide technique transfert de vapeur à travers les parois, Technical report, CSTB.
- Dang, D., Moutou Pitti, R., Toussaint, E. & Grédiac, M. (2014), Experimental evidence of water diffusion gradient in wood using the grid method. Final Cost Action FP0904 Conference.
- Dang, D., Toussaint, E., Moutou Pitti, R. & Grédiac, M. (2016), Investigation of the hydric transfer phenomenon in wood at the ring scale with the grid method, *in* 'Experimental and Applied Mechanics, Volume 4', Springer, pp. 77–81.
- Dinh, A. T. (2011), Linear elastic and non-linear behaviour of wood according to its structure, Theses, AgroParisTech.
- Dubois, F. (1997), Modélisation du comportement mécanique des milieux viscoélastiques fissurés : Application au matériau bois, PhD thesis.
- Eder, M., Jungnikl, K. & Burgert, I. (2009), 'A close-up view of wood structure and properties across a growth ring of norway spruce (picea abies [L.] karst.)', *Trees* **23**(1), 79–84.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-008-0256-1>
- Freyburger, C., Longuetaud, F., Mothe, F., Constant, T. & Leban, J.-M. (2009), 'Measuring wood density by means of x-ray computer tomography', *Annals of forest science* **66**(8), 804.
- Gauvin, C., Jullien, D., Doumalin, P., Dupré, J. C. & Gril, J. (2014), 'Image correlation to evaluate the influence of hygrothermal loading on wood', *Strain* **50**(5), 428–435.
- Grédiac, M. & Hild, F. (2011), *Mécanique et Ingénierie : Mesures de champs et identifications en mécanique des solides*, HERMES.
- Grédiac, M. & Sur, F. (2014), 'Effect of sensor noise on the resolution and spatial resolution of displacement and strain maps estimated with the grid method', *Strain* **50**(1), 1–27.
- Grédiac, M., Sur, F. & Blaysat, B. (2016), 'The grid method for in-plane displacement and strain measurement : A review and analysis', *Strain* **52**(3), 205–243.

- Grédiac, M. (1989), ‘Principe des travaux virtuels et identification’, *Comptes rendus de l’Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l’univers, Sciences de la Terre* **309**(1), 1–5.
- Grédiac, M. (1996), ‘The use of heterogeneous strain fields for the characterization of composite materials’, *Composites science and technology* **56**(7), 841–846.
- Grédiac, M. (2004), ‘The use of full-field measurement methods in composite material characterization : interest and limitations’, *Composites Part A : applied science and manufacturing* **35**(7), 751–761.
- Grédiac, M. & Toussaint, E. (2013), ‘Studying the mechanical behaviour of asphalt mixture with the grid method’, *Strain* **49**(1), 1–15.
- Grédiac, M., Toussaint, E. & Pierron, F. (2002a), ‘Special virtual fields for the direct determination of material parameters with the virtual fields method. 1—principle and definition’, *International Journal of Solids and Structures* **39**(10), 2691–2705.
- Grédiac, M., Toussaint, E. & Pierron, F. (2002b), ‘Special virtual fields for the direct determination of material parameters with the virtual fields method. 2—application to in-plane properties’, *International Journal of Solids and Structures* **39**(10), 2707–2730.
- Grédiac, M., Toussaint, E. & Pierron, F. (2003), ‘Special virtual fields for the direct determination of material parameters with the virtual fields method. 3. application to the bending rigidities of anisotropic plates’, *International Journal of Solids and Structures* **40**(10), 2401–2419.
- Gril, J. (1988), Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure, PhD thesis.
- Guo, B. (2007), Identification simultanée des paramètres de rigidité et d’amortissement de plaques isotropes minces en vibration par la méthode des champs virtuels, PhD thesis.
- Hild, F. (2004), ‘Mesure de champs de déplacement par corrélation d’images et applications en mécanique des solides’.
- Hunt, D. G. (1984), ‘Creep trajectories for beech during moisture changes under load’, *Journal of Materials Science* **19**(5), 1456–1467.

- Hunt, D. G. (1989), 'Linearity and non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood in compression and bending', *Wood Science and Technology* **23**(4), 323–333.
- Hunt, D. G. & Shelton, C. F. (1987a), 'Progress in the analysis of creep in wood during concurrent moisture changes', *Journal of Materials Science* **22**(1), 313–320.
- Hunt, D. G. & Shelton, C. F. (1987b), 'Stable-state creep limit of softwood', *Journal of Materials Science Letters* **6**(3), 353–354.
- Hunt, D. G. & Shelton, C. F. (1988), 'Longitudinal moisture-shrinkage coefficients of softwood at the mechano-sorptive creep limit', *Wood Science and Technology* **22**(3), 199–210.
- Husson, J. M. (2009), Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire application à la mecanosorption dans le bois, PhD thesis, Université de Limoges.
- Ishimaru, Y. & Iida, I. (2001), 'Transverse swelling behavior of hinoki (*chamaecyparis obtusa*) revealed by the replica method', *Journal of wood science* **47**(3), 178–184.
- Jebrane, M. (2009), Fonctionnalisation chimique du bois par transesterification des esters d'enol, PhD thesis, Université Bordeaux 1.
- Jeong, G. Y. (2008), Tensile properties of loblolly pine strands using digital image correlation and stochastic finite element method, PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Kardjilov, N., Manke, I., Hilger, A., Strobl, M. & Banhart, J. (2011), 'Neutron imaging in materials science', *Materials Today* **14**(6), 248–256.
- Kavanagh, K. T. & Clough, R. W. (1971), 'Finite element applications in the characterization of elastic solids', *International Journal of Solids and Structures* **7**(1), 11–23.
- Ladevèze, P., Moës, N. & Douchin, B. (1999), 'Constitutive relation error estimators for (visco) plastic finite element analysis with softening', *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **176**(1), 247–264.
- Lawrence, F. S. & Jacek, K. (2011), 'Parabolic-elliptic partial differential equations in 1-d', *Copyright 1984-2011 The MathWorks, Inc .*

- Lehmann, E. H. (2009), *Neutron Applications in Earth, Energy and Environmental Sciences*, Springer US, Boston, MA, chapter Neutron Imaging Methods and Applications, pp. 319–348.
- Liu, J. Y., Simpson, W. T. & Verrill, S. P. (2001), ‘An inverse moisture diffusion algorithm for the determination of diffusion coefficient’, *Drying Technology* **19**(8), 1555–1568.
- Mannes, D., Lehmann, E., Cherubini, P. & Niemz, P. (2007), ‘Neutron imaging versus standard x-ray densitometry as method to measure tree-ring wood density’, *Trees* **21**(6), 605–612.
- Marčok, M., Kudela, J. & Čunderlík, I. (1996), ‘Identification of reaction beech wood by x-ray computed tomography’, *European Journal of Wood and Wood Products* **54**(2), 97–98.
- Méité, M., Dubois, F., Pop, O. & Absi, J. (2013), ‘Mixed mode fracture properties characterization for wood by digital images correlation and finite element method coupling’, *Engineering Fracture Mechanics* **105**, 86–100.
- Merakeb, S. (2006), Modeling of the timber structures in variable environment, PhD thesis, University of Limoge.
- Montero, C. (2010), Caractérisation du comportement viscoélastique asymptotique du bois, PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Moutee, M. (2006), Modeling of the mechanical behaviour of wood during drying, PhD thesis, University of Laval.
- Moutou Pitti, R. (2008), Découplage des modes mixtes de rupture dans les matériaux viscoélastiques orthotropes : modélisation et expérimentation, PhD thesis, Université de Limoge.
- Moutou Pitti, R. (2012), *Mesures de déplacements par analyse d’images : déformations lors du séchage d’une rondelle de bois vert*, Edition Européenne Universitaire.
- Moutou Pitti, R., Badulescu, C. & Grédiac, M. (2014), ‘Characterization of a cracked specimen with full-field measurements : direct determination of the crack tip and

- energy release rate calculation', *International Journal of Fracture* **187**(1), 109–121.
- Murata, K. & Masuda, M. (2006), 'Microscopic observation of transverse swelling of latewood tracheid : effect of macroscopic/mesoscopic structure', *Journal of Wood Science* **52**(4), 283–289.
- Nakano, T. (1994*a*), 'Non-steady state water adsorption of wood : Part 1. a formulation for water adsorption', *Wood Science and Technology* **28**(5), 359–363.
- Nakano, T. (1994*b*), 'Non-steady state water adsorption of wood : Part 2. validity of the theoretical equation of water adsorption', *Wood Science and Technology* **28**(6), 450–456.
- Nakato, K. (1958), 'On the cause of the anisotropic shrinkage and swelling of wood. ix. on the relationship between the microscopic structure and the anisotropic shrinkage in the transverse section (2)', *Mokuzai Gakkaishi* **4**(4), 134–141.
- Nakato, K. & Kajita, S. (1955), 'On the cause of the anisotropic shrinkage and swelling of wood. vi. on the relationships between the annual ring and the anisotropic shrinkage', *J Jpn Forest Soc* **37**(1), 22–25.
- Natterer, J. (2004), *Construction en bois : matériau, technologie et dimensionnement*, Vol. 13, PPUR presses polytechniques.
- Nguyen, T. A. (2014), Experimental and numerical approaches to the study of hygroscopic transfers in wood, Phd thesis, Université de Limoges.
URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01130828>
- Ormarsson, S., Dahlblom, O. & Petersson, H. (1998), 'A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation part 1 : Theory', *Wood Science and Technology* **32**(5), 325–334.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H. & Asundi, A. (2009), 'Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review', *Measurement Science and Technology* **20**(6), 062001.
- Passas, R. (2008), Caractérisation de la morphologie des fibres de bois. Cours en ligne INP Grenoble.

- Peck, E. C. (1933), 'Specific gravity and related properties of softwood lumber'.
- Penumadu, D. (2009), *Neutron Imaging and Applications : A Reference for the Imaging Community*, Springer US, Boston, MA, chapter Material Science and Engineering with Neutron Imaging, pp. 209–227.
- Pereira, J., Xavier, J., Morais, J. & Lousada, J. (2013), 'Assessing wood quality by spatial variation of elastic properties within the stem : Case study of pinus pinaster in the transverse plane 1', *Canadian Journal of Forest Research* **44**(2), 107–117.
- Perré, P., Houngan, A. & Jacquin, P. (2007), 'Mass diffusivity of beech determined in unsteady-state using a magnetic suspension balance', *Drying technology* **25**(7-8), 1341–1347.
- Peters, W. & Ranson, W. (1982), 'Digital imaging techniques in experimental stress analysis', *Optical engineering* **21**(3), 213427–213427.
- Peters, W., Ranson, W., Sutton, M., Chu, T. & Anderson, J. (1983), 'Application of digital correlation methods to rigid body mechanics', *Optical Engineering* **22**(6), 226738–226738.
- Piro, J. L. & Grédiac, M. (2004), 'Producing and transferring low-spatial-frequency grids for measuring displacement fields with moiré and grid methods', *Experimental Techniques* **28**(4), 23–26. Society for Experimental Mechanics.
- Pittet, V. (1996), 'Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée'.
- Pop, O., Meite, M., Dubois, F. & Absi, J. (2011), 'Identification algorithm for fracture parameters by combining dic and fem approaches', *International journal of fracture* **170**(2), 101–114.
- Pottier, T. (2010), Identification paramétrique par recalage de modèles éléments finis couplée à des mesures de champs cinématiques et thermiques, PhD thesis, Université de Savoie.
- Randriambololona, H. (2003), Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable . Thèse de doctorat : Génie Civil. Limoges, PhD thesis, Université de Limoge.

- Ranta-Maunus, A. (1975), 'The viscoelasticity of wood at varying moisture content', *Wood science and technology* **9**(3), 189–205.
- Rémond, R., Passard, J. & Perré, P. (2007), 'The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood : A comprehensive model applied to drying and bending', *European Journal of Mechanics-A/Solids* **26**(3), 558–572.
- Ruelle, J. (2006), Analyse de la diversité du bois de tension de 3 espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide de Guyane française, PhD thesis, Université des Antilles et de la Guyane, Kourou.
- Sahlberg, U., Salmén, L. & Oscarsson, A. (1997), 'The fibrillar orientation in the s2-layer of wood fibres as determined by x-ray diffraction analysis', *Wood Science and Technology* **31**(2), 77–86.
- Saifouni, O. (2014), Modeling of rheological effects in materials : application to the mechano-sorptive behaviour of wood, Phd thesis, University of Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01069026>
- Saiki, H. et al. (1970), 'Proportion of component layers in the tracheid wall of early wood and late wood of some conifers.', *Journal of the Japan Wood Research Society* **16**(5), 244–9.
- Salin, J.-G. (1992), 'Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model', *Holz als Roh-und Werkstoff* **50**(5), 195–200.
- Sanabria, S. J., Lanvermann, C., Michel, F., Mannes, D. & Niemz, P. (2015), 'Adaptive neutron radiography correlation for simultaneous imaging of moisture transport and deformation in hygroscopic materials', *Experimental Mechanics* **55**(2), 403–415.
- Silva, F., Morais, J., Dourado, N., Xavier, J., Pereira, F. & de Moura, M. (2014), 'Determination of cohesive laws in wood bonded joints under mode II loading using the enf test', *International Journal of Adhesion and Adhesives* **51**, 54–61.
- Simon, P. (2009), Approche multiéchelle du comportement mécanique du bois dans le plan transverse, PhD thesis, Villeurbanne, INSA.
- Simpson, W. T. (1991), 'Dry kiln operator's manual'.

- Sirvio, J. (2001), 'Variation of cross-sectional properties within single norway spruce tracheids', *Wood and fiber science* **33**(1), 16–25.
- Söderström, O. (1996), 'Surface conditions and fick's law', *Wood Science and Technology* **30**(2), 149–151.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J. & Schreier, H. (2009), *Image correlation for shape, motion and deformation measurements : basic concepts, theory and applications*, Springer Science & Business Media.
- Sutton, M., Wolters, W., Peters, W., Ranson, W. & McNeill, S. (1983), 'Determination of displacements using an improved digital correlation method', *Image and vision computing* **1**(3), 133–139.
- Syed-Muhammad, K. (2007), Sur quelques aspects numériques de la Méthode des Champs Virtuels : optimisation de conditions d'essai et champs virtuels définis par sous-domaines, PhD thesis, Université Blaise Pascal Cermont-Ferrand II.
URL: <http://www.theses.fr/2007CLF21726>
- Tanaka, T., Avramidis, S. & Shida, S. (2009), 'Evaluation of moisture content distribution in wood by soft x-ray imaging', *Journal of wood science* **55**(1), 69–73.
- Thibaut, B., Gril, J. & Fournier, M. (2001), 'Mechanics of wood and trees : some new highlights for an old story', *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series {IIB} - Mechanics* **329**(9), 701 – 716.
- Viguiier, J. (2012), Méthode des champs virtuels pour des matériaux à gradients de propriétés : étude expérimentale par la méthode de la grille sur du bois, Master's thesis, Université Blaise Pascal, Laboratoire Institut Pascal.
- Wadsö, L. (1993), 'Measurements of water vapour sorption in wood : Part 2. results', *Wood Science and Technology* **28**(1), 59–65.
URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00193877>
- Watanabe, U., Norimoto, M., Fujita, M. & Gril, J. (1998), 'Transverse shrinkage anisotropy of coniferous wood investigated by the power spectrum analysis', *Journal of wood science* **44**(1), 9–14.

- Watanabe, U., Norimoto, M., Ohgama, T. & Fujita, M. (1999), 'Tangential youngs modulus of coniferous early wood investigated using cell models', *Holzforschung* **53**(2), 209–214.
- Xavier, J., Monteiro, P., Morais, J. J. L., Dourado, N. & de Moura, M. F. S. F. (2014), 'Moisture content effect on the fracture characterisation of pinus pinaster under mode i', *Journal of Materials Science* **49**(21), 7371–7381.
- Xavier, J., Oliveira, M., Monteiro, P., Morais, J. J. L. & de Moura, M. F. S. F. (2014), 'Direct evaluation of cohesive law in mode i of pinus pinaster by digital image correlation', *Experimental Mechanics* **54**(5), 829–840.

Annexes

Annexe 4.1 : Diffusion 1-D selon loi de Fick, influence de l'épaisseur sur l'évolution de la teneur en eau

Cette annexe présente l'évolution de la teneur en eau solution numérique de la loi de Fick 1-D en fonction de l'épaisseur d'un matériau homogène. Le coefficient de diffusion est pris égal à 10^{-10} m²/s et le *PSF* est égal à 30 %. Les conditions aux limites et initiales sont les mêmes que celles déjà spécifiées au chapitre 4. La figure 1 montre l'évolution de la teneur en eau à tout instant t au sein de chaque épaisseur étudiée. Sur la figure 2, on présente l'évolution (à $t = t_f$) de la teneur en eau au sein de chaque épaisseur. La figure 2 illustre l'allure de la courbe de la teneur en eau à tout instant t en $x=l$. On voit bien que pour une épaisseur très faible (<3 mm) la teneur en eau atteint très rapidement une valeur proche du *PSF* en tout point. Une valeur de l'épaisseur >8 mm donne une évolution très lente de la teneur en eau au sein de celle-ci. Ces remarques montrent que l'épaisseur influence fortement l'allure de la solution numérique de la loi de Fick 1-D.

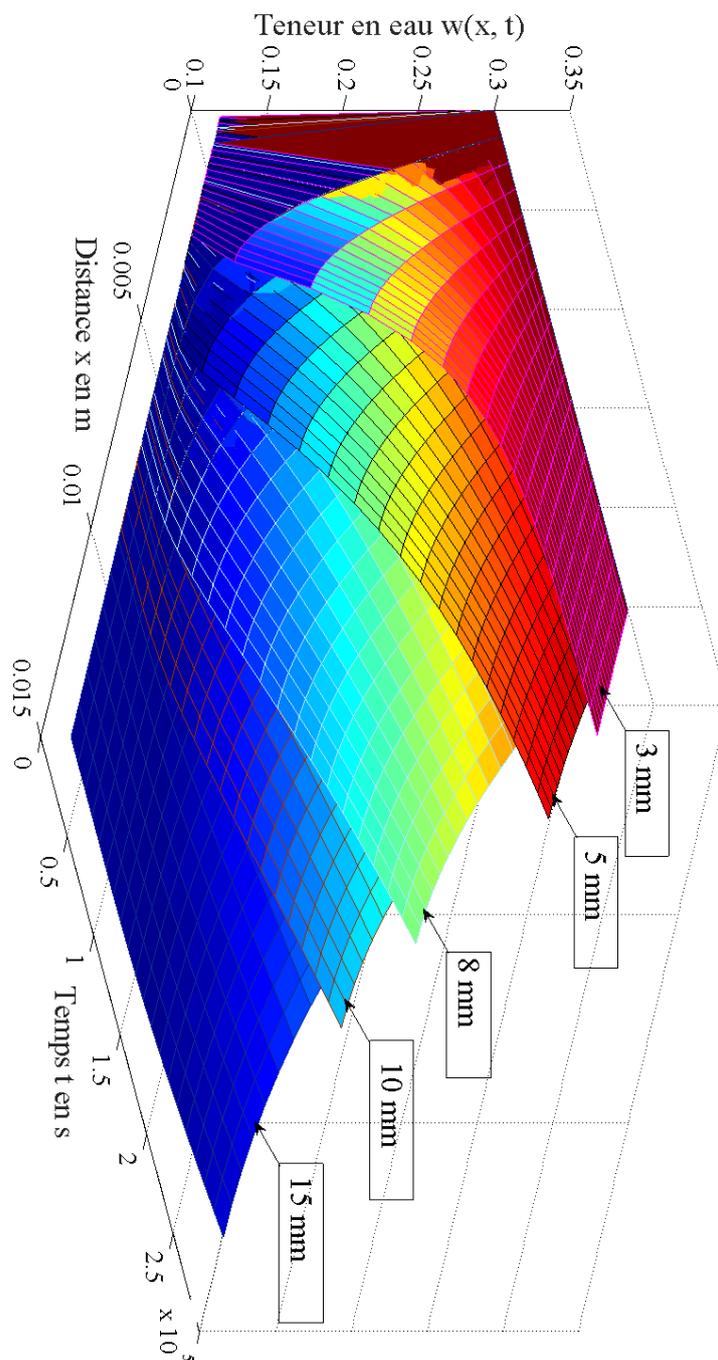


FIGURE 1: profils de teneur en eau au sein de l'épaisseur en fonction de l'épaisseur

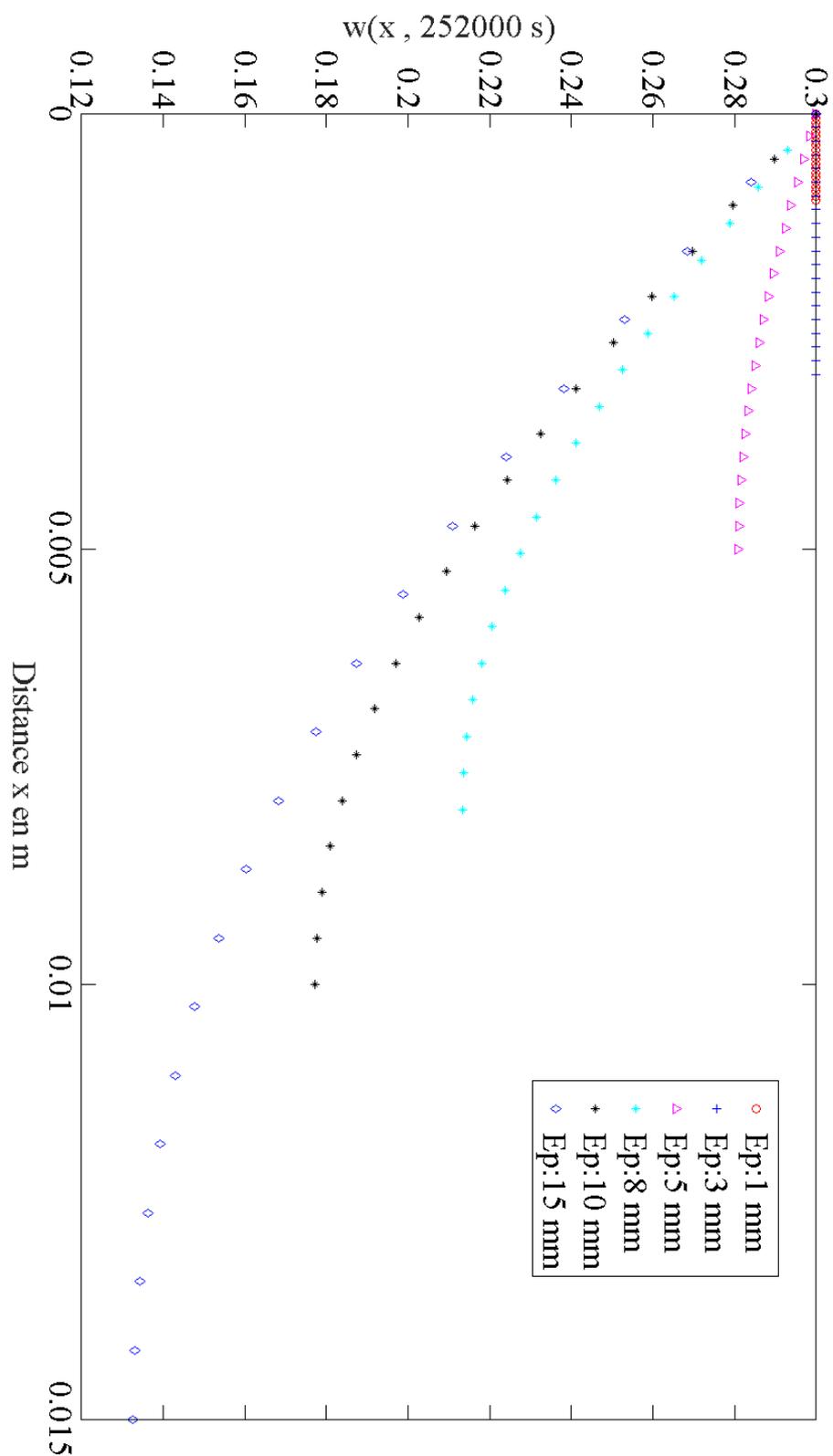


FIGURE 2: évolution à $t=t_f=252000 \text{ s}$ de la teneur selon l'épaisseur

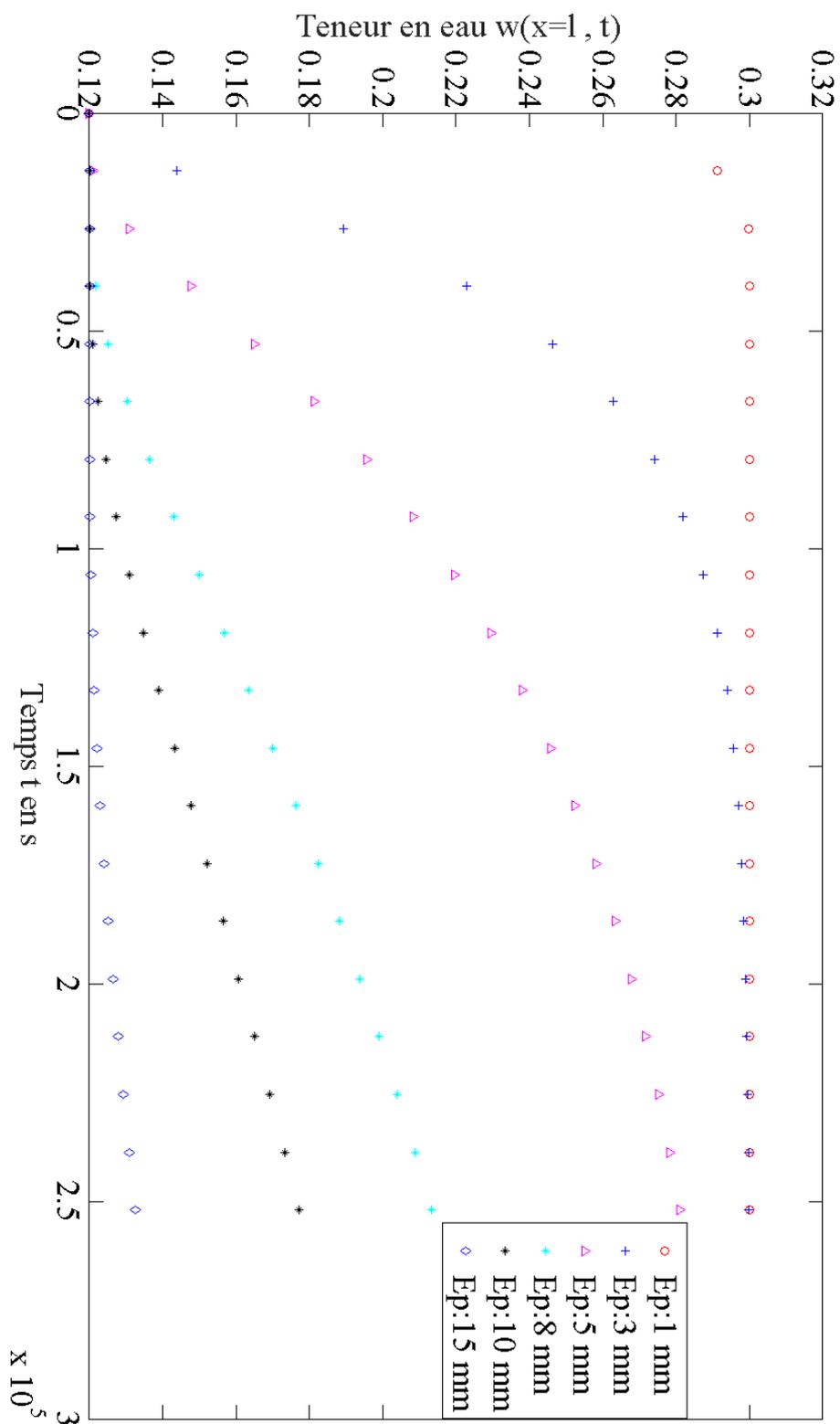


FIGURE 3: évolution au bord $x=1$ de la teneur en eau selon l'épaisseur

Annexe 4.2 : Exemples de masques utilisés pour extraire les déformations dans EW et LW

Cette annexe donne des exemples de masques utilisés lors de l'identification des paramètres de EW et LW pour les éprouvettes A et B

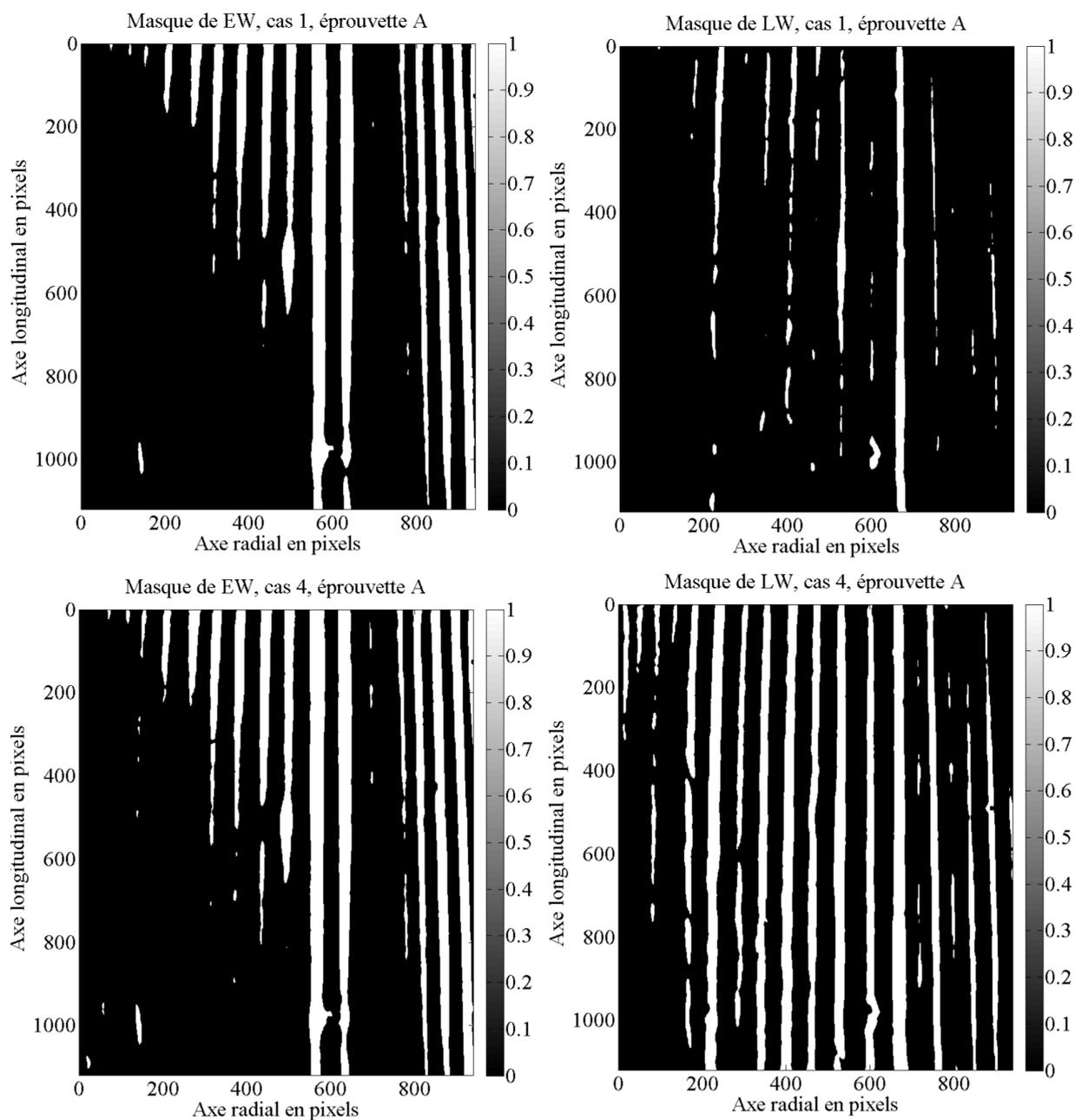


FIGURE 4: exemples de masques de l'éprouvette A, cas 1 et 4

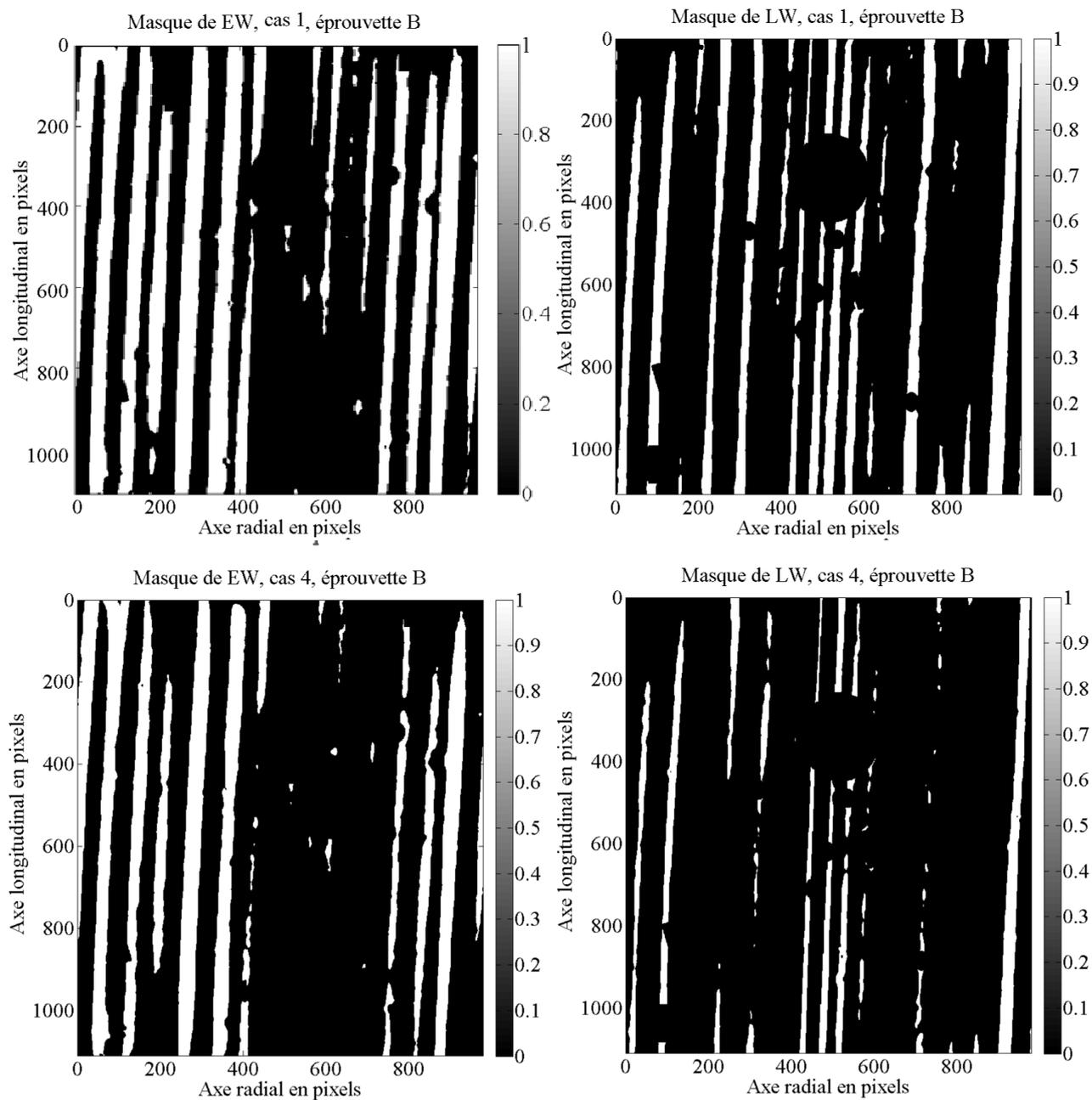


FIGURE 5: exemples de masques de l'éprouvette B, cas 1 et 4